



Mémoire de Master

en Électronique
Option : Instrumentation

Présenté par

Rabia Adel

&

Bentrat Farah

Conception et Réalisation d'un Emulateur de Panneau Photovoltaïque Basé sur un Convertisseur DC-DC Contrôlé par un Microcontrôleur à 32 bits

Proposé par : Dr TADRIST Rezki & Pr BRADAI Rafik

Année Universitaire 2024-2025

ملخص:

يهدف مشروعنا إلى تصميم وتنفيذ جهاز محاكاة (مُقلد) للوحة كهروضوئية قادر على إعادة إنتاج السلوك الديناميكي الحقيقي لمولد شمسي بدقة عالية. اعتمد المُقلد على وحدة تحكم دقيقة من نوع ESP32 إلى جانب محول تيار مستمر من نوع Buck. يقوم النظام بتوليد إشارة PWM متغيرة تتحكم في الجهد المطبق على حمل مقاوم. ويُستخدم دَوَّار قياس مدمجة لقراءة قيم الجهد والتيار، والتي يستخدمها الـ ESP32 لحساب المقاومة المكافئة للحمل وتقدير الجهد الذي يمكن أن تنتجه لوحة شمسية حقيقية، وذلك بالاعتماد على نموذج رياضي وخوارزمية رقمية. أظهرت نتائج المحاكاة والتجارب العملية دقة تفوق 0.1% في قياس كل من الجهد والتيار.

كلمات المفاتيح: PWM ؛ DC-DC محول ؛ ESP32 المتحكم ؛ اللوحة الشمسية

Résumé :

L'objectif de notre projet est de concevoir et de réaliser un émulateur de panneau photovoltaïque capable de reproduire de manière fidèle le comportement dynamique d'un générateur solaire réel. L'émulateur repose sur l'utilisation d'un microcontrôleur ESP32 associé à un convertisseur DC-DC de type Buck. Le système génère un signal PWM modulé, qui permet de contrôler la tension appliquée à une charge résistive. Des circuits de mesure intégrés assurent l'acquisition des grandeurs électriques (tension et courant), à partir desquelles l'ESP32 calcule la résistance équivalente de la charge et estime la tension que produirait un véritable panneau solaire, en s'appuyant sur un modèle mathématique et un algorithme numérique. Les résultats, issus à la fois des simulations et des tests expérimentaux, montrent une précision supérieure à 0,1 % sur les valeurs mesurées de tension et de courant.

Mots clés : PWM ; ESP32 ; Convertisseur DC-DC ; Algorithme numérique.

Abstract :

The objective of our project is to design and implement a photovoltaic panel emulator capable of accurately reproducing the dynamic behavior of a real solar generator. The emulator is based on an ESP32 microcontroller and a Buck DC-DC converter. The system generates a variable PWM signal to control the voltage applied to a resistive load. Integrated measurement circuits acquire voltage and current values, from which the ESP32 calculates the equivalent load resistance and estimates the voltage that a real photovoltaic panel would produce, using a mathematical model and a numerical algorithm. Simulation and experimental results demonstrate a measurement accuracy better than 0.1% for both voltage and current.

Keywords : PWM ; ESP32 ; DC-DC converter ; Numerical algorithm

Remerciements

Nous souhaitons exprimer notre plus sincère gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Nous adressons nos remerciements les plus chaleureux à Monsieur le Dr TADRIST Rezki et au Professeur BRADAI Rafik pour la qualité de leur encadrement, la pertinence de leurs conseils et leur accompagnement constant tout au long de ce travail. Leur disponibilité, leur écoute et leur soutien ont été des atouts précieux dans la concrétisation de ce projet.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur Guessoum Abderrezak, Président du jury, ainsi qu'aux membres du jury, Monsieur Boukenoui Rachid notamment, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants et enseignants-chercheurs du département d'électronique, pour la qualité de leur enseignement, leur engagement et les savoirs qu'ils nous ont transmis tout au long de notre parcours universitaire.

Nos pensées les plus reconnaissantes vont à nos familles, en particulier à nos parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience, leur compréhension et leur soutien moral indéfectible. Merci également à nos frères et sœurs pour leurs encouragements et leur présence bienveillante.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos collègues, amis et camarades de promotion, ainsi que toutes les personnes que nous avons sollicitées au cours de ce travail, pour leur disponibilité, leur aide et leurs conseils précieux.

DEDICACE :

Je dédie ce mémoire à mes parents.

À ma mère, pour son amour infini, ses sacrifices silencieux, ses prières constantes, son soutien inconditionnel et sa patience, qui ont été ma lumière tout au long de ce parcours.

À mon père, pour sa bienveillance, son calme rassurant et sa manière généreuse de toujours être là quand il le faut.

À ma sœur, pour sa bienveillance et ses mots rassurants dans les moments de doute.

À tous mes amis, qui m'ont entouré de leur énergie, de leur humour et de leur amitié sincère.

Je pense aussi avec une grande reconnaissance à mes camarades et amis du club de physique Al-Kindi, qui ont su nourrir ma curiosité scientifique et partager avec moi des moments inoubliables.

Merci à vous tous.

Tout le monde veut savoir ce que j'aurais fait si je n'avais pas gagné... je suppose qu'on ne le saura jamais.

RABIA ADEL

DEDICACE :

Ce travail est dédié spécialement À ma chère mère, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour votre patience, votre amour et vos sacrifices. À mon cher père, pour votre amour, votre soutien constant et votre dévouement tout au long de mon parcours. À vous, mes parents, je dis merci de tout cœur pour avoir fait de moi celle que je suis aujourd'hui. Aucune parole ne pourra exprimer assez mes respects, ma gratitude et mon admiration. Puisse ce travail vous témoigner tout mon amour et ma reconnaissance. À ma famille, Merci pour votre affection, votre soutien et votre présence dans ma vie. Vous avez toujours été là, chacun à votre manière, et cela a compté énormément pour moi. À mes amies : Merci pour votre bienveillance, vos encouragements et les moments partagés qui ont rendu cette étape plus douce et plus forte à la fois. À mon enseignant, Monsieur Maamoun Mountassar, Merci pour vos conseils précieux et la confiance que vous m'avez accordée tout au long de ce projet.

À tous ceux qui m'ont soutenue de près ou de loin, À ceux que j'aime et qui m'aiment, Je vous dédie ce mémoire.

BENTRAT FARAH

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	2
1.1 Introduction	3
1.2 Générateur photovoltaïque	3
1.2.1 Le Principe de Fonctionnement de la cellule photovoltaïque	3
1.2.2 Les différents types de la cellule photovoltaïque	4
1.2.3 Circuits équivalents et modèle mathématique.....	6
1.2.4 Association des cellules.....	8
1.2.5 Paramètres et caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques	11
1.2.6 Caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques.....	12
1.3 Les convertisseurs DC-DC	13
1.3.1 Types de convertisseur DC-DC Hacheur série (Buck)	14
1.4 Les émulateurs de panneaux photovoltaïques	17
1.4.1 Définition.....	17
1.4.2 Concept et réalisation	18
1.4.3 Émulateur photovoltaïque analogique à régulation logarithmique.....	19
1.4.4 Émulateur photovoltaïque numérique à base de FPGA et convertisseur Buck	21
1.4.5 Émulateurs photovoltaïques disponibles sur le marché	21
1.6 Conclusion	23
CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION	24
2.1 Introduction	25
2.2 Schéma Synoptique	25
2.3 Synthèse d'un émulateur	26
2.4 Implémentation de l'algorithme Newton-Raphson sur Matlab Simulink.....	27
2.4.1 Synthèse d'un algorithme de Newton-Raphson avec filtrage FIR.....	27
2.4.2 Schéma du système sur Matlab-Simulink	28
2.4.3 Le Convertisseur abaisseur (Buck)	31
2.4.4 Convertisseur élévateur (Boost)	32
2.4.5 Contrôleur PWM.....	33
2.5 Modélisation numérique du panneau solaire avec Newton-Raphson sous MATLAB	33
2.6 Etude comparative des panneaux solaires par la méthode Newton-Raphson	34

2.6.1 Modélisation du panneau solaire Dow Chemical (13 W)	34
2.6.2 Modélisation du panneau solaire SunPower (76.275 W)	38
2.6.3 Synthèse d'une commande par la méthode de Newton-Raphson pour le panneau solaire Dow Chemical DPS-13-1000.....	41
2.6.4 Synthèse d'une commande par la méthode de Newton-Raphson pour le panneau solaire SunPower-76R-BLK-U	43
2.7 Conclusion	49
CHAPITRE 3: REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	50
3.1 Introduction.....	51
3.2 Étapes de réalisation et d'implémentation.....	51
3.2.1 ESP32-WROOM-32 Development Board – DevKit v1 (38 pins).....	51
3.2.2 Convertisseur DC-DC Buck SZBK07	53
3.2.3 Transition d'un convertisseur DC-DC à tension fixe vers un convertisseur à tension variable	57
3.2.4 Circuit Adaptation DC-DC Et De Mesure.....	60
3.2.5 L'alimentation ATX JJ-PSU450	66
3.2.6 Charge du système	68
3.3 Conclusion	68
CONCLUSION GENERALE.....	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	70

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

FIGURE 1.1. LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE.	4
FIGURE 1.2. LES TYPES DES CELLULES PV.	6
FIGURE 1.3. CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE IDEALE.	6
FIGURE 1.4. CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE REELLE.	7
FIGURE 1.5. INFLUENCE DES RESISTANCES SERIE ET SHUNT SUR LA CARACTERISTIQUE COURANT- TENSION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE [4].	8
FIGURE 1.6. CARACTERISTIQUE RESULTANT D'UN REGROUPEMENT DE N_s CELLULES EN SERIE [6].	9
FIGURE 1.7. CARACTERISTIQUE RESULTANT D'UN REGROUPEMENT DE N_p CELLULES PARALLELE [6].	10
FIGURE 1.8. CARACTERISTIQUES RESULTANT D'UN REGROUPEMENT DE N_s ET N_p CELLULES SERIE-PARALLELE [6].	11
FIGURE 1.9. INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT (A) ET DE LA TEMPERATURE (B) SUR $I = f(V)$ ET $P = f(V)$	13
FIGURE 1.10. SCHEMA D'UN HACHEUR SERIE (BUCK).	14
FIGURE 1.11. SCHEMA D'UN HACHEUR PARALLELE (BOOST).	15
FIGURE 1.12. SCHEMA D'UN HACHEUR SERIE-PARALLELE (BUCK- BOOST).	16
FIGURE 1.13. SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN EMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE ANALOGIQUE A BASE DE REGULATION LINEAIRE [11].	19
FIGURE 1.14. SCHEMA ELECTRIQUE DES COMPOSANTS ANALOGIQUES DU CONTROLEUR DE L'EMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE LEGENDE : (A) CIRCUIT DE TRAITEMENT. (B) CIRCUIT AMPLIFICATEUR LOGARITHMIQUE. (C) TENSION CARACTERISTIQUE PV. (D) CIRCUIT DU REGULATEUR PI. (E) CIRCUIT COMPAREUR.	20
FIGURE 1.15. SCHEMA BLOC D'UN EMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE NUMERIQUE BASE SUR UN CONTROLEUR FPGA ET UN CONVERTISSEUR BUCK [12].	21

CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION

FIGURE 2.1. SYNOPTIQUE DE L'ÉMULATEUR DE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.	26
FIGURE 2.2. D'UN ALGORITHME DE NEWTON-RAPHSON AVEC FILTRAGE FIR.	27
FIGURE 2.3. SCHEMA DE LA COMMANDE NEWTON RAPHSON SUR MATLAB SIMULINK.	28
FIGURE 2.4. LA VARIATION DE COURANT FILTREE (A) EN FONCTION DU TEMPS (S).	28
FIGURE 2.5. LA VARIATION DE LA PUISSANCE FILTREE (W) EN FONCTION DU TEMPS (S).	29
FIGURE 2.6. LA VARIATION DE LA TENSION FILTREE (V) EN FONCTION DU TEMPS (S).	30
FIGURE 2.7. LA VARIATION DE RAPPORT CYCLIQUE EN FONCTION DU TEMPS (S).	30
FIGURE 2.8. MODELE BUCK SUR SIMULINK.	31
FIGURE 2.9. MODELE BOOST SUR SIMULINK.	32
FIGURE 2.10. MODELE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE SUR SIMULINK.	35
FIGURE 2.11. CARACTERISTIQUES I-V ET P-V DU MODULE PV UTILISE.	36
FIGURE 2.12. CARACTERISTIQUE I-V DU MODULE PV UTILISE.	37
FIGURE 2.13. CARACTERISTIQUE P-V DU MODULE PV UTILISE.	37

FIGURE 2.14. MODELE PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE SUR SIMULINK.....	38
FIGURE 2.15. CARACTERISTIQUES I-V ET P-V DU MODULE PV UTILISE.....	39
FIGURE 2.16. CARACTERISTIQUE I-V DU MODULE PV UTILISE.	39
FIGURE 2.17. CARACTERISTIQUE P-V DU MODULE PV UTILISE.....	40
FIGURE 2.18. SCHEMA DE LA COMMANDE BASEE SUR L'ALGORITHME DE NEWTON-RAPHSON.....	41
FIGURE 2.19. COURBES(I-V) (P-V) OBTENUE A PARTIR DU CODE MATLAB.....	42
FIGURE 2.20. SCHEMA DE LA COMMANDE BASEE SUR L'ALGORITHME DE NEWTON-RAPHSON.....	43
FIGURE 2.21. COURBES(I-V) (P-V) OBTENUE A PARTIR DU CODE MATLAB.....	44

CHAPITRE 3: REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

FIGURE 3.1. DESCRIPTION DE LA CARTE ESP32.....	53
FIGURE 3.2. SCHEMA DE CABLAGE ET D'IDENTIFICATION DES BORNES DU MODULE BUCK SZBK07.....	54
FIGURE 3.3. VUE ARRIERE DU MODULE CONVERTISSEUR ABAISSEUR DC-DC (BUCK) SZBK07.....	54
FIGURE 3.4. SCHEMA FONCTIONNEL DE BUCK SZBK07.....	56
FIGURE 3.5. SCHEMA DE CONVERTISSEUR XL4015E1 DANS LE CAS FIXE.....	58
FIGURE 3.6. SCHEMA DE CONVERTISSEUR XL4015E1 DANS LE CAS VARIABLE.....	59
FIGURE 3.7. RELATION ENTRE VFB ET VOUT.....	60
FIGURE 3.8. CIRCUIT D'ADAPTATION DE CONVERTISSEUR DC-DC.....	61
FIGURE 3.9. CIRCUIT DE MESURE DE TENSION (VPV).....	63
FIGURE 3.10. CIRCUIT DE MESURE DE COURANT (IPV).....	64
FIGURE 3.11. CIRCUIT FINAL D'ADAPTATION ET DE MESURE COURANT ET TENSION AVEC REGULATEUR DE TENSION.....	66
FIGURE 3.12. L'ALIMENTATION ATX JJ-PSU450.....	67
FIGURE 3.13. CHARGE RESISTIVE DU SYSTEME.....	68

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

TABLEAU 2.1. LES VALEURS DES COMPOSANTS DU CONVERTISSEUR BUCK.	31
TABLEAU 2.2. LES VALEURS DES COMPOSANTS DU CONVERTISSEUR BOOST.	32
TABLEAU 2.3. LES PARAMÈTRES DE RÉGULATEUR DE CHARGE PWM.....	33
TABLEAU 2.4. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DU MODULE PV.....	35
TABLEAU 2.5. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES DU MODULE	38

CHAPITRE 3: RÉALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

TABLEAU 3.1. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES – ESP32-WROOM-32 DEVKIT V1	52
TABLEAU 3.2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DU MODULE SZBK07.....	55
TABLEAU 3.3. CONNEXIONS ET FONCTIONS DES BORNES.....	57
TABLEAU 3.4. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DE L'ALIMENTATION JJ-PSU450.....	67

LISTES DES ABREVIATIONS

PV : photovoltaïque.

PVE : panneau photovoltaïque (émulateur).

DC : courant continu (Direct Current).

AC : courant alternatif (Alternating Current).

PWM : Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion).

I-V : courant – tension (Current – Voltage).

P-V : puissance – tension (Power – Voltage).

ESP32 : microcontrôleur 32 bits .

DC-DC : convertisseur continu–continu.

V_{mp} : tension au point de puissance maximale (Voltage at Maximum Power Point).

I_{mp} : courant au point de puissance maximale (Current at Maximum Power Point).

V_{oc} : tension en circuit ouvert (Open Circuit Voltage).

I_{sc} : courant de court-circuit (Short Circuit Current).

I_o : courant de saturation inverse.

η: le rendement.

P_{max} : Puissance Maximale.

P_{pm} : Point de Puissance Maximale.

FF : Facteur de forme.

NP : Nombre de Cellules en Parallèle.

I_{ph} : courant de photopile.

PN : La jonction PN.

NS : Nombre de Cellules en Série.

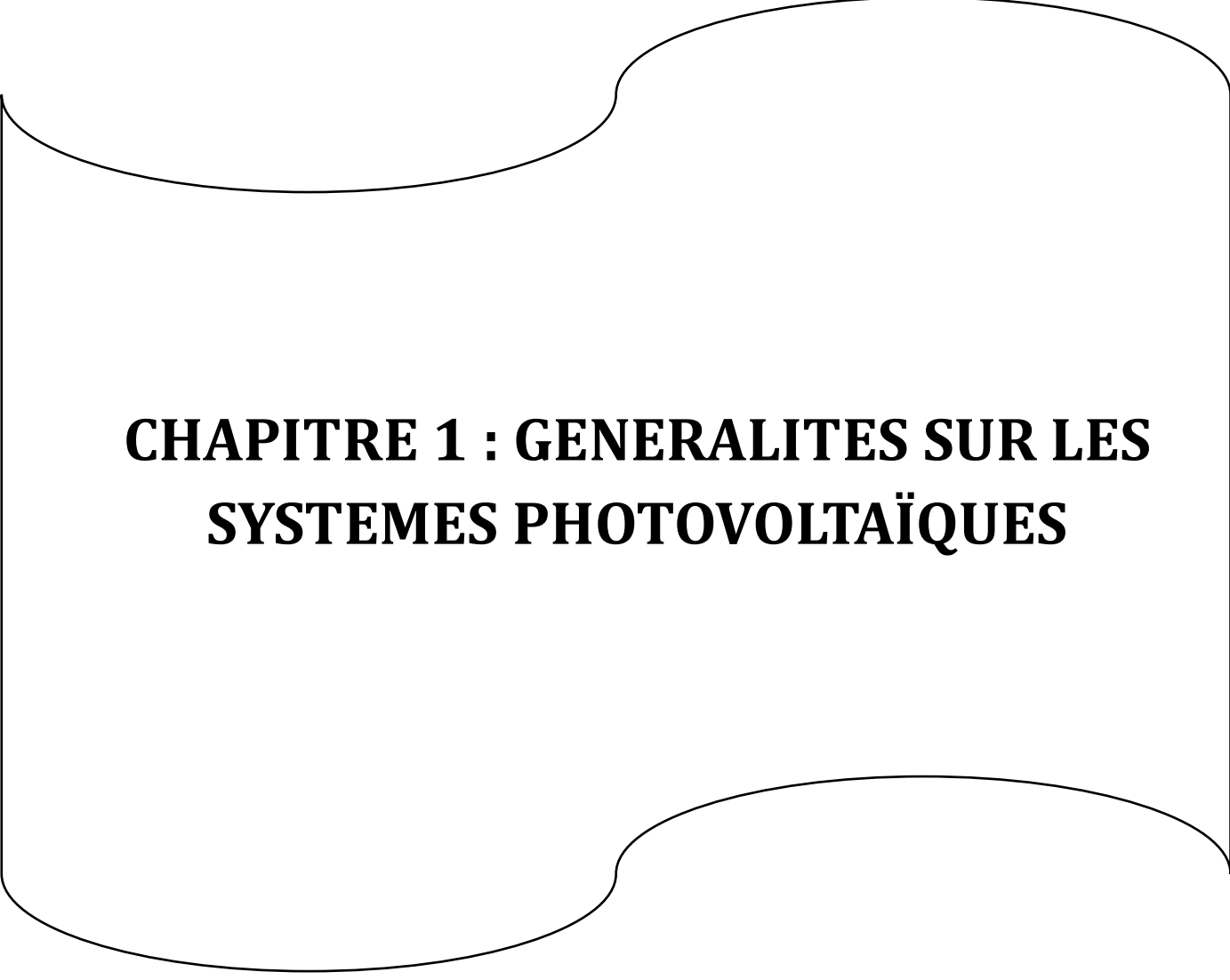
Rs : résistance série.

Rsh : résistance parallèle (shunt).

I_{pv} : courant généré par le panneau.

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, face à l'épuisement progressif des énergies fossiles, à la montée des préoccupations environnementales et au besoin croissant d'indépendance énergétique, les énergies renouvelables représentent une voie d'avenir incontournable. Parmi elles, l'énergie solaire photovoltaïque s'est imposée comme l'une des plus accessibles et prometteuses. Grâce à la conversion directe de la lumière en électricité, les panneaux photovoltaïques permettent une production d'énergie propre, silencieuse, et relativement facile à intégrer dans divers contextes, du résidentiel aux grandes installations industrielles. Au fil des années, de nombreux travaux ont permis de modéliser avec précision le comportement des cellules et modules photovoltaïques, prenant en compte les variations d'ensoleillement, de température et de charge. Cependant, pour valider ces modèles et étudier leur interaction avec les circuits électroniques de puissance (convertisseurs, MPPT, stockage, etc.), une validation expérimentale reste indispensable. Or, l'expérimentation directe avec des panneaux réels pose plusieurs problèmes : elle dépend fortement des conditions météorologiques, nécessite une grande surface d'installation, et engendre des coûts parfois élevés. De plus, elle limite la possibilité de reproduire des situations critiques comme les ombrages dynamiques ou les variations brutales d'irradiance. Dès lors, une question essentielle se pose : comment peut-on reproduire, en laboratoire et de manière contrôlée, le comportement électrique d'un générateur photovoltaïque réel sans recourir à une installation solaire complète ? C'est autour de cette problématique que s'est développée l'idée d'utiliser un émulateur photovoltaïque, un dispositif électronique capable de générer artificiellement les caractéristiques courant-tension d'un panneau solaire en fonction de paramètres définis. Contrairement aux simulateurs logiciels, l'émulateur interagit directement avec le matériel physique (convertisseurs, charges...), ce qui permet d'évaluer en temps réel le comportement du système dans un environnement expérimental maîtrisé. Dans ce contexte, le présent travail vise à concevoir et à réaliser un émulateur de panneau photovoltaïque basé sur une architecture simple et économique. Il repose sur l'utilisation d'un microcontrôleur ESP32, d'un convertisseur DC-DC de type Buck et sur l'implémentation de l'équation du courant photovoltaïque via la méthode numérique de Newton-Raphson. L'objectif est de créer une plateforme capable de simuler différentes conditions climatiques, de reproduire la courbe I-V d'un panneau réel, et d'interfacer efficacement avec une charge ou un système de gestion d'énergie.



CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1 Introduction

Face aux défis énergétiques mondiaux et à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables occupent une place de plus en plus centrale dans les politiques énergétiques. Parmi elles, l'énergie solaire photovoltaïque se distingue par son abondance, sa disponibilité et sa capacité à être exploitée de manière décentralisée. Elle permet de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité, sans bruit, sans émission polluante et avec un faible impact environnemental.

Ce chapitre vise à présenter les principes fondamentaux de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque. Il abordera dans un premier temps le mécanisme de conversion de l'énergie lumineuse en électricité à travers la cellule photovoltaïque, puis détaillera les différents types de cellules selon les matériaux utilisés. Ensuite, les modèles électriques représentatifs ainsi que les méthodes d'association des cellules seront exposés, avant d'aborder les principales caractéristiques électriques influencées par les conditions d'exploitation. Enfin, une attention particulière sera portée aux convertisseurs DC-DC, indispensables pour l'interface entre les générateurs photovoltaïques et les charges, ainsi qu'aux émulateurs permettant de simuler le comportement des modules solaires dans des conditions maîtrisées.

1.2 Générateur photovoltaïque

1.2.1 Le Principe de Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique capable de convertir directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité. Ce phénomène, connu sous le nom d'effet photovoltaïque, a été découvert en 1839. Toutefois, il a fallu attendre les années 1960 et le développement des technologies spatiales pour que cette découverte trouve ses premières applications concrètes, notamment dans l'alimentation électrique des satellites. Ce n'est qu'à partir de la fin des années 1980 que les panneaux solaires, constitués de multiples cellules photovoltaïques assemblées, ont commencé à se généraliser dans les installations terrestres.

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur des matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium. Lorsqu'ils sont exposés à la lumière, les photons transmettent leur énergie aux électrons du semi-conducteur. Ce mécanisme, expliqué par Albert Einstein en 1905 dans le cadre de l'effet photoélectrique, permet aux électrons de se libérer de leurs atomes.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Pour exploiter ce phénomène et produire un courant électrique utilisable, la cellule comprend une jonction PN, composée de deux couches de silicium dopées différemment :

- Une couche supérieure dopée au phosphore (type N), riche en électrons ;
- Une couche inférieure dopée au bore (type P), caractérisée par un déficit d'électrons, appelé "trous".

La jonction entre ces deux couches crée un champ électrique interne. Sous l'effet de ce champ, les électrons excités migrent vers la zone N, tandis que les trous se dirigent vers la zone P. Des électrodes métalliques recueillent ces charges, générant ainsi un courant électrique continu.

Pour limiter les pertes par réflexion (pouvant atteindre jusqu'à 30 %) une couche antireflet est appliquée à la surface de la cellule. D'autres avancées technologiques, telles que les surfaces texturées ou les structures multicouches, permettent également d'optimiser l'absorption lumineuse et d'améliorer le rendement énergétique global de la cellule [1].

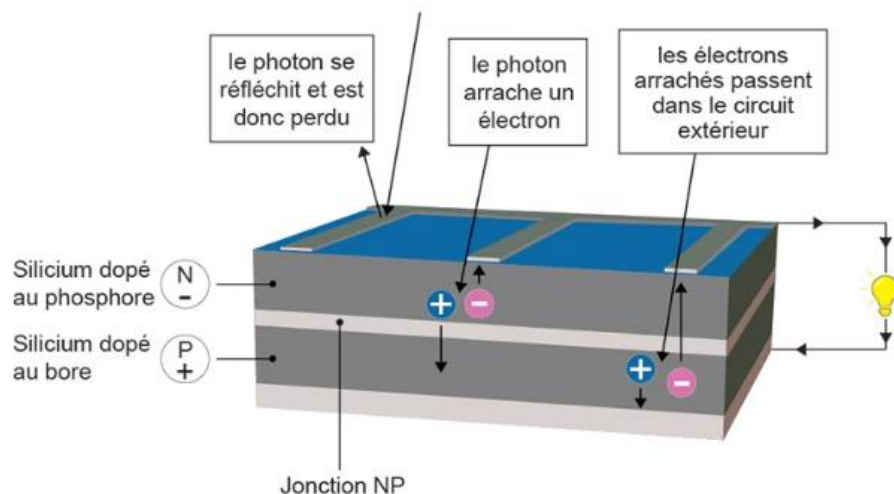


Figure 1.1. Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

1.2.2 Les différents types de la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin comptent parmi les technologies les plus répandues dans le secteur solaire. Elles offrent un rendement élevé (jusqu'à environ 25 %) et une longue durée de vie (estimée à 30 ans ou plus). Leur surface présente une couleur bleu très foncé uniforme, sans structure cristalline visible, en raison de leur fabrication à partir d'un seul cristal de silicium pur.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Cependant, leur performance diminue sous un faible ensoleillement, ce qui les rend particulièrement adaptées aux régions très ensoleillées, où elles peuvent exploiter pleinement leur potentiel [2].

Les cellules photovoltaïques en silicium polycristallin

Les cellules polycristallines se distinguent par leur surface bleutée et marbrée, où les motifs cristallins sont visibles à l'œil nu. Leur fabrication repose sur la fusion du silicium en lingots, un procédé moins coûteux que celui des cellules monocristallines, ce qui en fait une option économique. Leur rendement, généralement situé entre 10 % et 15 %, reste inférieur à celui des cellules monocristallines. Cependant, elles compensent cette différence par une meilleure performance en faible luminosité, grâce à leur capacité à exploiter efficacement la lumière diffuse [2].

Les cellules photovoltaïques en silicium amorphe

Fabriquées par dépôt en couche mince, les cellules en silicium amorphe sont produites par vaporisation de gaz silicium sur divers substrats (verre, plastique, métal). Leur aspect uniforme et leur couleur brun foncé les distinguent des cellules cristallines.

Avantage :

- Coût de production réduit (procédé moins énergivore)

- Grande flexibilité (intégration sur surfaces courbes ou légères)

- Bonnes performances par faible luminosité (efficacité préservée même par temps nuageux)

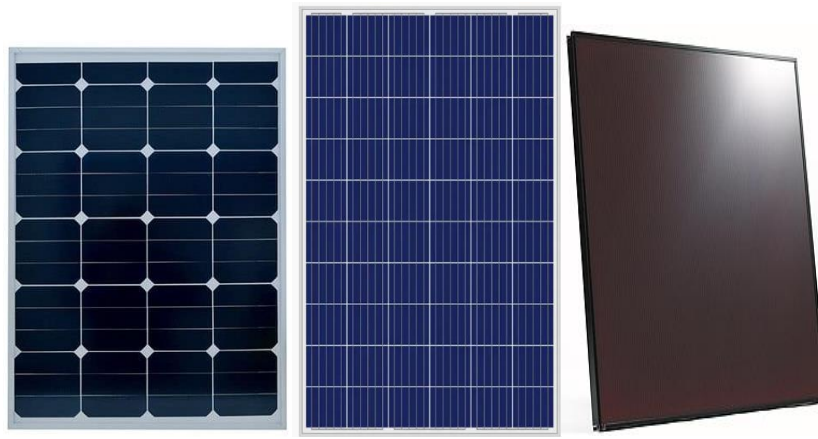
Limitations :

- Rendement modéré (environ 7 %, nécessitant une surface de captation plus étendue)

- Dégradation progressive (perte d'efficacité dans le temps, notamment en phase initiale)

Ces caractéristiques en font une solution privilégiée pour des applications spécifiques comme les dispositifs nomades, les bâtiments à intégration architecturale (BIPV) ou les zones à ensoleillement diffus [2].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES



(a) Cellule Monocristalline (b) cellule polycristalline (c) cellule amorphe

Figure 1.2. Les types des cellules PV.

1.2.3 Circuits équivalents et modèle mathématique

Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, une jonction PN sous éclairage photovoltaïque connectée à une charge peut être modélisée par un circuit équivalent comprenant :

- Un générateur de courant I_{ph} (courant photogénéré) en parallèle
- Une diode représentant la jonction PN

Ce modèle, illustré dans la figure 1.3, décrit le comportement électrique fondamental d'une cellule solaire idéale [3].

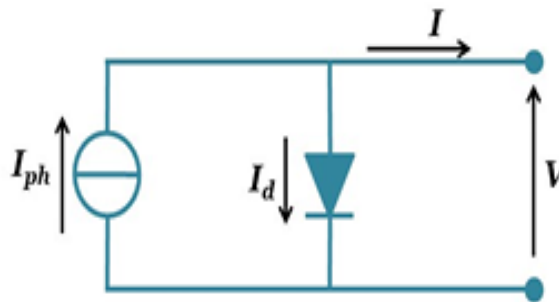


Figure 1.3. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale.

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I(V) = I_{ph}(\phi) - I_d(V) \quad (1.1)$$

I_d : courant de la diode

$I(V)$: courant disponible

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

V : tension aux bornes de la jonction

$I_{ph}(\phi)$: courant produit par la photopile, ce courant est proportionnel au flux lumineux (ϕ).

$$I_d(V) = I_s \left(\exp \frac{V}{\alpha V_T} - 1 \right) \quad (1.2)$$

$V_T = \frac{KT}{q}$; $V_T = 26 \text{ mV}$ à $T = 300 \text{ K}$ pour le silicium.

α : facteur technologique dépendant du type de diode et de la manière dont elle est fabriquée ;
 $1 < \alpha < 2$ pour les diodes

I_s : courant de saturation inverse de la diode

K : constant de Boltzmann ($1.38 * 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$)

T : température en kelvin

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

Cas d'une cellule réelle

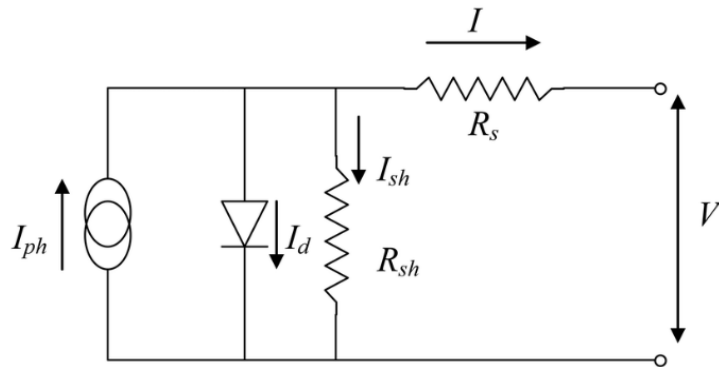


Figure 1.4. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Une photopile comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance en dérivation ou shunt (R_{sh}).

$$I = I_{ph} - I_s \exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{\alpha k T} \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la photopile :

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles ;
- la résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée [4].

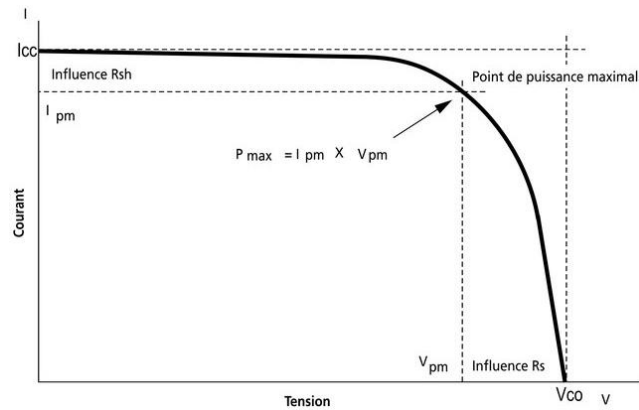


Figure 1.5. Influence des résistances série et shunt sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [4].

1.2.4 Association des cellules

Association en série

Le branchement en série des cellules photovoltaïques s'effectue en connectant la borne positive d'une cellule à la borne négative de la suivante, créant ainsi un circuit en chaîne. Cette configuration présente les caractéristiques suivantes :

Avantages

- Addition des tensions individuelles ($V_{tot} = V_1 + V_2 + \dots + V_n$)
- Génération d'une tension globale élevée
- Maintien d'un courant constant dans tout le circuit
- Adapté aux applications nécessitant des tensions importantes :
 - Alimentation de dispositifs haute tension
 - Charge de batteries
 - Injection dans le réseau électrique

Limitations

- Sensibilité aux déséquilibres de performance

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

- Le courant global est limité par la cellule la moins performante (effet "goulot d'étranglement")
- Une seule cellule défectueuse ou ombragée peut significativement réduire les performances de l'ensemble du circuit [5]

Considérations techniques

Ce montage nécessite une homogénéité des caractéristiques électriques des cellules et une protection contre les ombres partielles pour optimiser les performances. Des diodes bypass sont souvent intégrées pour limiter l'impact des cellules défaillantes.

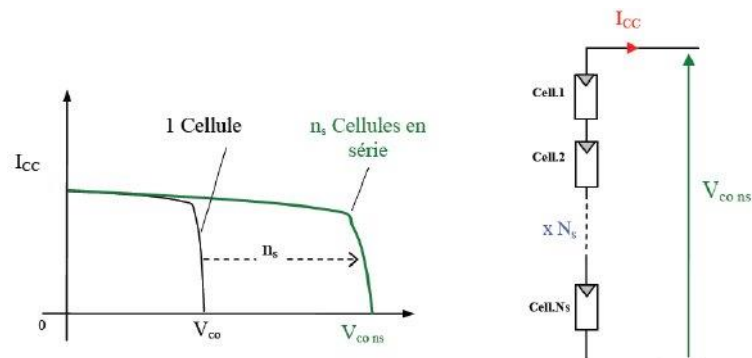


Figure 1.6. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série [6].

Association parallèle

Le branchement en parallèle consiste à interconnecter :

- Toutes les bornes positives entre elles
- Toutes les bornes négatives entre elles

Caractéristiques principales

Augmentation du courant total ($I_{\text{tot}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$)

Maintien de la tension constante (égale à la tension d'une cellule) à des besoins en courant élevé

Avantages

- Meilleure tolérance aux variations de performance entre cellules
- Une cellule défaillante n'affecte pas significativement l'ensemble du système
- Solution idéale pour les applications nécessitant :
 - Des courants importants

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

- Une meilleure résistance aux ombres partielles
- Une redondance améliorée

Applications typiques

- Systèmes autonomes nécessitant des courants élevés
- Installations où l'homogénéité d'éclairement n'est pas garantie
- Configurations nécessitant une meilleure fiabilité globale [5]

Remarque : Cette configuration est souvent combinée avec des montages en série (hybride série-parallèle) pour optimiser à la fois tension et courant.

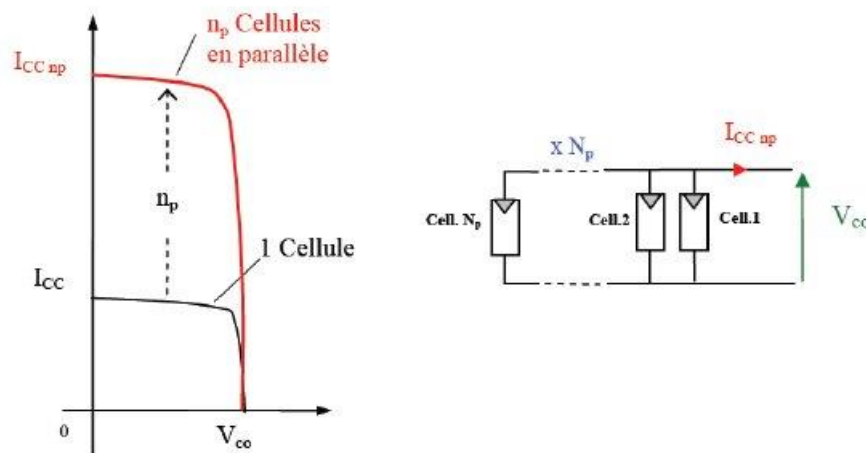


Figure 1.7. Caractéristique résultant d'un regroupement de N_p cellules parallèle [6].

Association hybride (série parallèle)

Pour atteindre les niveaux de tension et de courant optimaux, les systèmes photovoltaïques combinent souvent des configurations en série et en parallèle. Cette approche hybride permet une meilleure efficacité de la récupération d'énergie et une fiabilité accrue [5].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

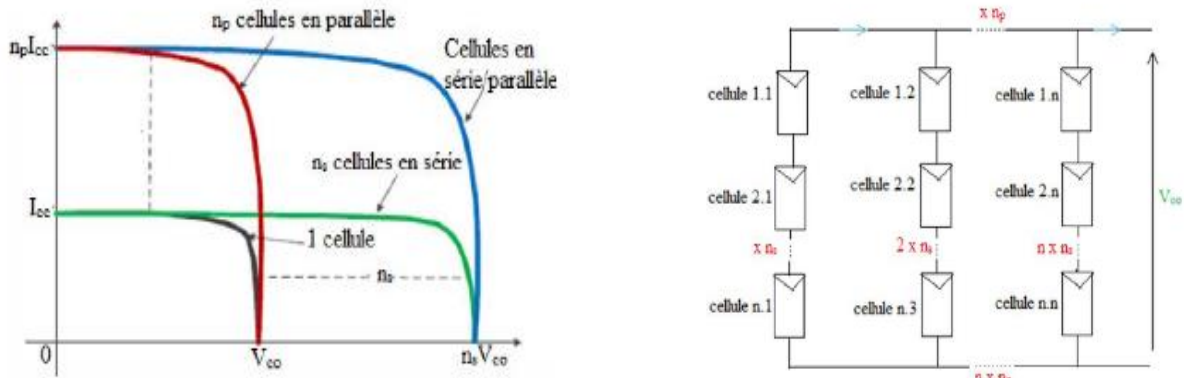


Figure 1.8. Caractéristiques résultant d'un regroupement de N_s et N_p cellules série-parallèle [6].

1.2.5 Paramètres et caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques

Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

Le courant de court-circuit (I_{cc}) d'une cellule photovoltaïque correspond au courant maximal généré lorsque les bornes de la cellule sont reliées entre elles. L'ensemble des électrons produits par l'effet photoélectrique circule librement sans rencontrer de résistance externe. Ce courant dépend directement de l'intensité du rayonnement solaire reçu par la cellule ainsi que de sa capacité à transformer cette énergie lumineuse en électricité [7].

La tension à circuit ouvert (V_{oc}) :

La tension à circuit ouvert (V_{oc}) d'une cellule photovoltaïque correspond à la tension maximale mesurée lorsque le circuit est ouvert, c'est-à-dire en l'absence de circulation de courant. Cette grandeur est essentielle pour évaluer le potentiel de production énergétique de la cellule. Elle varie en fonction de la technologie utilisée ainsi que des conditions environnementales, notamment l'intensité lumineuse et la température. Une forte irradiation solaire ou une température modérée tend à augmenter cette tension [7].

La puissance maximale (P_{max}) :

La puissance maximale (P_{max}) d'un panneau photovoltaïque correspond à la quantité d'énergie électrique maximale qu'il peut fournir dans des conditions optimales, généralement au Point de Puissance Maximale (PPM) de la courbe I-V. Elle résulte du produit de la tension et du courant à ce point, souvent optimisé par un algorithme MPPT. La P_{max} dépend principalement de l'irradiance solaire, de la température et de la conception du système [7].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Le facteur de forme (ff) :

Le facteur de forme (ff) est un indicateur essentiel pour juger de la performance d'une cellule solaire à partir de sa courbe courant-tension (I-V). Il correspond au rapport entre la puissance maximale fournie (P_{max}) et le produit de la tension et du courant aux points de fonctionnement maximaux. Un facteur de forme élevé indique un meilleur rendement énergétique de la cellule, car il reflète une exploitation plus efficace de la puissance disponible [7].

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (1.4)$$

P_{max} : puissance maximale

V_{oc} : tension en circuit ouvert

I_{cc} : courant de court-circuit.

Le Rendement :

Le rendement d'un générateur photovoltaïque correspond au rapport entre la puissance électrique qu'il produit et la puissance lumineuse qu'il reçoit [7].

$$\eta = \frac{P_{max}}{S \cdot E} \quad (1.5)$$

S : est la surface du photo-générateur [m^2]

E : est l'éclairement [W/m^2]

P_{max} : est la puissance électrique du photo-générateur [W]

1.2.6 Caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques

Influence de l'éclairement

L'intensité de l'éclairement solaire est un facteur déterminant pour les performances des cellules photovoltaïques, car elle influence directement la production de courant et de tension. Le coefficient de température du courant de court-circuit (I_{cc}) mesure cette sensibilité : un ensoleillement plus fort génère un courant de court-circuit plus élevé, ce qui contribue à accroître la puissance électrique fournie. De même, les caractéristiques courant-tension des cellules solaires sont intrinsèquement liées au rayonnement solaire ; une irradiation accrue se traduit par une puissance de sortie supérieure pour une tension donnée. Enfin, l'augmentation de l'éclairement provoque une légère hausse de la tension en circuit ouvert, facilitant la mobilité des électrons et stimulant ainsi la production de puissance globale.

Influence de température

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

L'effet de la température sur les performances d'une cellule solaire peut être exprimé à l'aide du coefficient de température. Ce coefficient représente le pourcentage de variation de la puissance de sortie pour chaque degré Celsius de variation de la température. En général, ce coefficient est négatif pour la tension, ce qui signifie qu'une augmentation de la température provoque une diminution de la tension en circuit ouvert (V_{oc}). De même, la température réduit le point de puissance maximale. En revanche, le coefficient de température est généralement positif pour le courant, ce qui veut dire qu'une hausse de la température entraîne une légère augmentation du courant de court-circuit (I_{cc}).

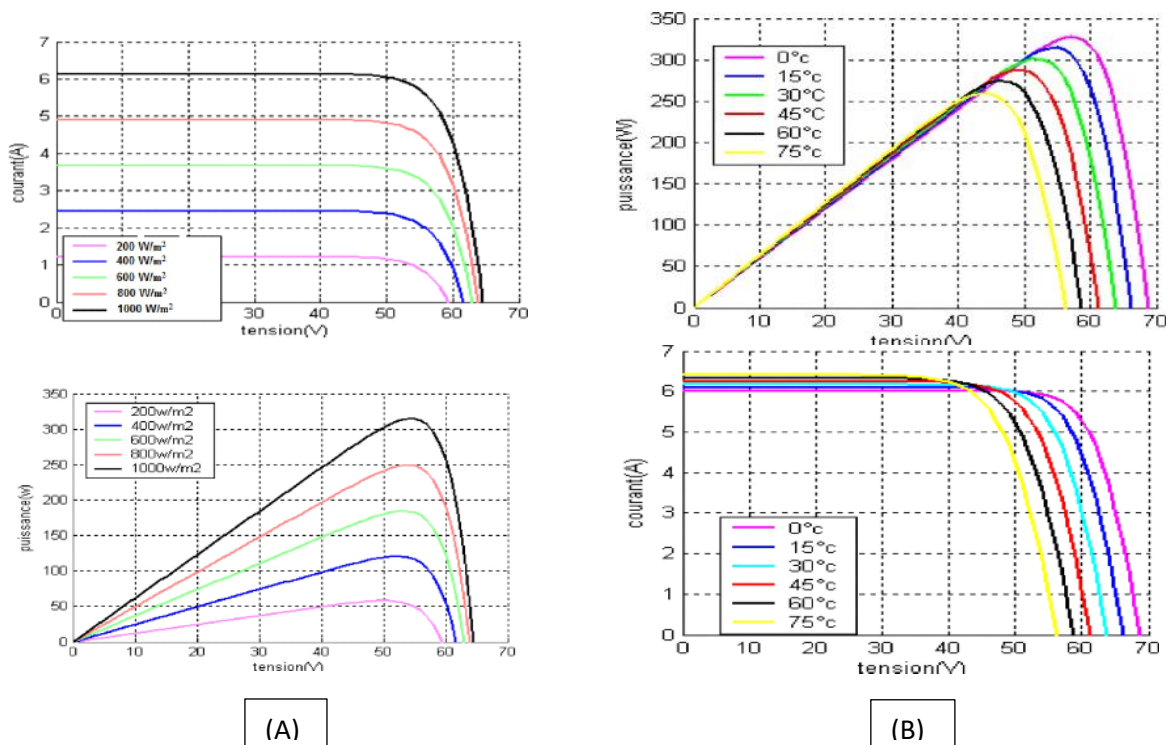


Figure 1.9. Influence de l'éclairement (A) et de la température (B) sur $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

1.3 Les convertisseurs DC-DC

De nombreuses applications industrielles requièrent la conversion d'une tension issue d'une source continue vers une autre tension continue. Ce rôle est assuré par le convertisseur DC-DC. Ce type de conversion est rendu possible grâce à l'utilisation de composants de puissance fonctionnant en mode commuté. On parle alors de conversion DC-DC par découpage, bien que le terme de conversion DC-DC soit couramment utilisé.

Aujourd'hui, les convertisseurs DC-DC à découpage sont omniprésents dans les appareils électroniques (téléphones, ordinateurs portables, etc.) ainsi que dans les systèmes industriels. Lorsqu'ils sont associés à une commande adaptée, ils permettent de générer une tension de sortie

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

tout en assurant sa stabilité malgré les variations de charge ou de tension d'alimentation. Cette flexibilité fait du convertisseur DC-DC un excellent candidat pour l'émulation de sources continues, comme les sources photovoltaïques, dont la tension de sortie dépend du courant fourni.

Pour cela, l'algorithme de commande doit tenir compte du comportement dynamique du convertisseur. Ce chapitre se concentre donc sur l'étude des trois principales topologies de convertisseurs DC-DC, en vue d'analyser leurs performances [8].

1.3.1 Types de convertisseur DC-DC

- Le Buck, qui permet de réduire la tension d'entrée ;
- Le Boost, conçu pour augmenter la tension d'entrée ;
- Le Buck-Boost, capable aussi bien de diminuer que d'augmenter la tension selon les besoins.

Hacheur série (Buck)

Le convertisseur Buck est un type de convertisseur DC-DC qui permet de réduire une tension continue d'entrée pour obtenir une tension de sortie continue plus faible, tout en assurant une régulation efficace de cette dernière.

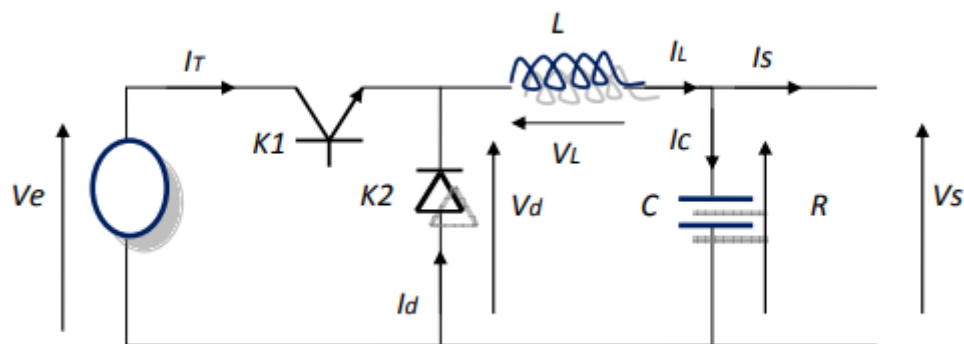


Figure 1.10. Schéma d'un hacheur série (Buck).

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du circuit hacheur Buck peut être analysé selon deux phases en fonction de l'état des interrupteurs K_1 et K_2 : l'état passant et l'état bloqué.

Dans l'état passant ($0 < t < \alpha T$) :

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

L'interrupteur (IGBT) est fermé. La source d'entrée alimente directement la charge R à travers l'inductance L , qui emmagasine de l'énergie sous forme magnétique. Durant cette phase, la diode est bloquée en raison de la polarité inverse à ses bornes.

Dans l'état bloqué ($\alpha T < t < T$) :

L'IGBT s'ouvre et la diode devient conductrice, permettant la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie stockée dans L est alors transférée vers la charge et le condensateur. Le courant dans l'inductance décroît progressivement jusqu'au début du cycle suivant.

En régime permanent (mode de conduction continue), la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est directement proportionnelle au rapport cyclique α , selon la relation :

$$V_o = \alpha \times V_i \quad (1.6)$$

Cette expression montre que la tension de sortie diminue lorsque α diminue. Étant donné que α est compris entre 0 et 1, la tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'entrée, d'où le nom de convertisseur abaisseur (ou dévolteur) [9].

Hacheur parallèle (Boost)

Le convertisseur Boost est un type de convertisseur DC-DC qui permet d'augmenter une tension continue d'entrée afin d'obtenir une tension de sortie continue plus élevée, tout en assurant une régulation efficace de cette dernière.

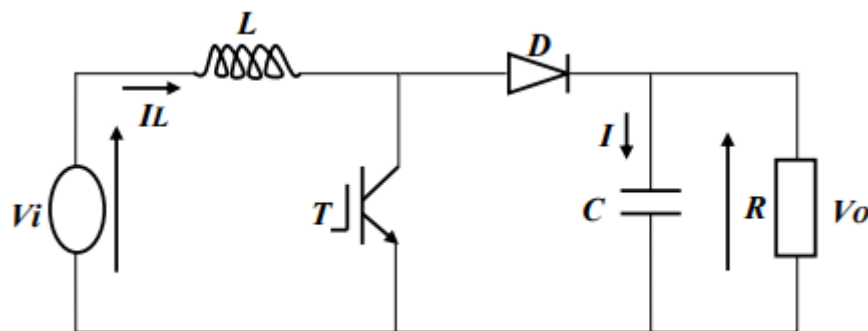


Figure 1.11. Schéma d'un hacheur parallèle (Boost).

Principe de fonctionnement du convertisseur Boost

Dans l'état passant ($0 < t < \alpha T$) :

L'interrupteur (IGBT) est fermé. Le courant fourni par la source traverse l'inductance L , entraînant une accumulation d'énergie sous forme magnétique. Durant cette phase, la diode D est bloquée, ce qui

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

empêche le courant d'alimenter directement la charge. Toute l'énergie est donc stockée dans l'inductance.

Dans l'état bloqué ($\alpha T < t < T$) :

L'IGBT s'ouvre et l'inductance, cherchant à maintenir le courant, libère l'énergie stockée. Celle-ci se dirige alors vers la charge à travers la diode D et le condensateur C. La tension de sortie devient alors supérieure à la tension d'entrée, grâce à l'ajout de la force électromotrice de l'inductance à celle de la source (effet survolteur).

En régime permanent, la variation du courant dans l'inductance sur une période complète est nulle, ce qui implique que l'énergie emmagasinée au début et à la fin du cycle est identique. La tension de sortie est liée au rapport cyclique α selon la relation :

$$V_o = \frac{V_i}{1-\alpha} \quad (1.7)$$

Cette expression montre que la tension de sortie augmente avec α et peut théoriquement devenir très élevée lorsque α s'approche de 1, ce qui justifie l'appellation « survolteur » [9].

Hacheur BUCK-BOOST

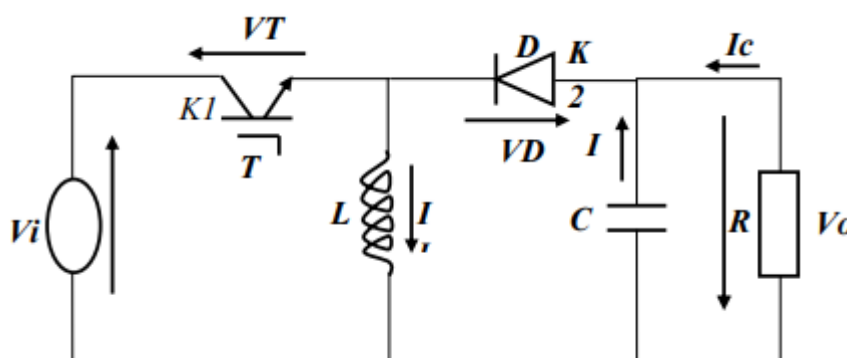


Figure 1.12. Schéma d'un hacheur série-parallèle (Buck- Boost).

Principe de fonctionnement

Dans l'état passant ($0 < t < \alpha T$) :

L'interrupteur K_1 est fermé. L'inductance L est alors connectée en série avec la source de tension d'entrée V_i . Pendant cette phase, L stocke de l'énergie sous forme de champ magnétique, et le courant en son sein augmente progressivement. La diode K_2 est bloquée, la charge est donc isolée du circuit.

Dans l'état bloqué ($\alpha T < t < T$) :

L'interrupteur K_1 s'ouvre et la diode K_2 devient conductrice. L'énergie précédemment accumulée dans l'inductance est alors transférée vers la capacité C et la résistance de charge R.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Cela permet de maintenir un courant dans la charge, même si la source d'entrée n'y est plus directement connectée.

En régime permanent, la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle.

La tension de sortie V_o est alors donnée par la relation suivante : [9]

$$V_o = V_i * \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (1.8)$$

1.4 Les émulateurs de panneaux photovoltaïques

1.4.1 Définition

Un émulateur est un système matériel conçu pour reproduire avec précision le comportement d'un dispositif réel en utilisant une technologie différente. À la différence d'une simulation purement logicielle, il offre une reproduction physique des caractéristiques du système ciblé.

Dans le domaine photovoltaïque, cet outil permet de :

- Restituer fidèlement les caractéristiques électriques (courant, tension, puissance) d'un panneau solaire réel
- Intégrer les paramètres environnementaux variables :
 - Conditions d'ensoleillement
 - Effets d'ombrage (partiel ou dynamique)
 - Variations de température

Avantages principaux :

- Environnement de test contrôlé et reproductible
- Indépendance vis-à-vis des conditions météorologiques
- Réduction des coûts (élimination du besoin de panneaux réels)
- Possibilité de tester des scénarios extrêmes ou particuliers

Cette technologie trouve des applications dans :

- La recherche et développement
- Le test de convertisseurs photovoltaïques
- L'enseignement et la formation
- L'optimisation des systèmes solaires [10]

Précision : Les émulateurs photovoltaïques modernes intègrent des algorithmes avancés pour reproduire avec exactitude les caractéristiques I-V non linéaires des panneaux solaires dans diverses conditions de fonctionnement.

1.4.2 Concept et réalisation

L'émulation précise d'un générateur photovoltaïque s'articule autour de deux piliers fondamentaux :

1. La caractérisation précise des courbes courant-tension (I-V)
2. La restitution fidèle de ces caractéristiques par des systèmes de puissance adaptés

1. Acquisition des caractéristiques I-V

Les profils électriques des panneaux solaires peuvent être déterminés par :

- Modélisation théorique à partir des paramètres de cellule PV
 - Mesures expérimentales sous diverses conditions environnementales
- (Cette phase cruciale de modélisation sera développée dans un chapitre dédié)

2. Méthodes de reproduction des caractéristiques

Concernant la reproduction des caractéristiques, la littérature technique propose plusieurs méthodes depuis les années 1980 :

- Sources de tension à résistance interne variable (loi exponentielle)
- Systèmes d'amplification à partir d'une cellule de référence
- Circuits équivalents combinant sources de courant, diodes et résistances

Limitations des premières solutions :

- Prise en compte insuffisante des paramètres environnementaux (irradiation, température)
- Complexité croissante avec la puissance
- Difficulté à reproduire les comportements dynamiques

Solutions modernes :

Les émulateurs contemporains exploitent des convertisseurs électroniques de puissance :

- Régulation dynamique de la tension et du courant de sortie
- Adaptation en temps réel de l'impédance de sortie
- Reproduction fidèle des caractéristiques non linéaires des PV
- Capacité à simuler différents scénarios de fonctionnement [10]

Cette évolution vers des systèmes actifs et programmables a permis de surmonter les limitations des approches traditionnelles, tout en offrant une plus grande flexibilité opérationnelle.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

1.4.3 Émulateur photovoltaïque analogique à régulation logarithmique

Le synoptique de figure 1.13 représente un émulateur photovoltaïque conçu à partir de composants analogiques. Le courant de référence I_{ph}^* est généré par un potentiomètre et comparé au courant de sortie I_{PV} mesuré par un capteur de courant. La différence E_{in} est traitée par un amplificateur logarithmique composé d'amplis op et de transistors, ce qui produit une tension de sortie E_{out} . Cette tension est utilisée pour générer une tension de référence V_{ref} qui pilote un régulateur de tension linéaire (LM338). Celui-ci ajuste la tension de sortie V_{pv} afin de reproduire fidèlement le comportement non linéaire d'un panneau solaire. Des circuits de protection (clamper) sont ajoutés pour stabiliser les tensions en sortie. Le système permet d'émuler des caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ proches de celles d'un vrai module PV, avec une charge résistive ou des batteries, sans utiliser de panneaux réels.

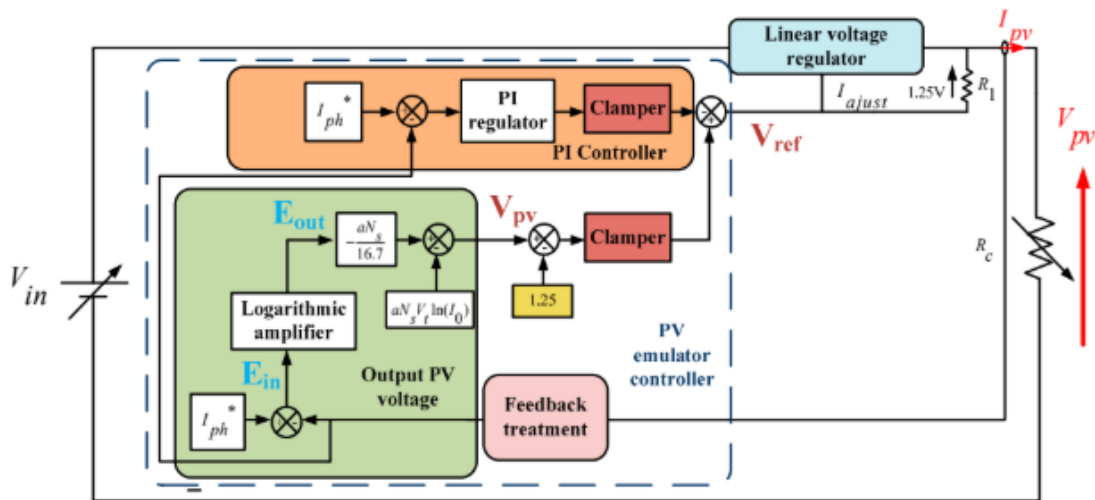


Figure 1.13. Schéma synoptique d'un émulateur photovoltaïque analogique à base de régulation linéaire [11].

Réalisation pratique du circuit de l'émulateur photovoltaïque analogique

La Figure 1.14 présente la réalisation pratique du circuit de puissance de l'émulateur photovoltaïque analogique proposé par Moussa et al. [11].

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

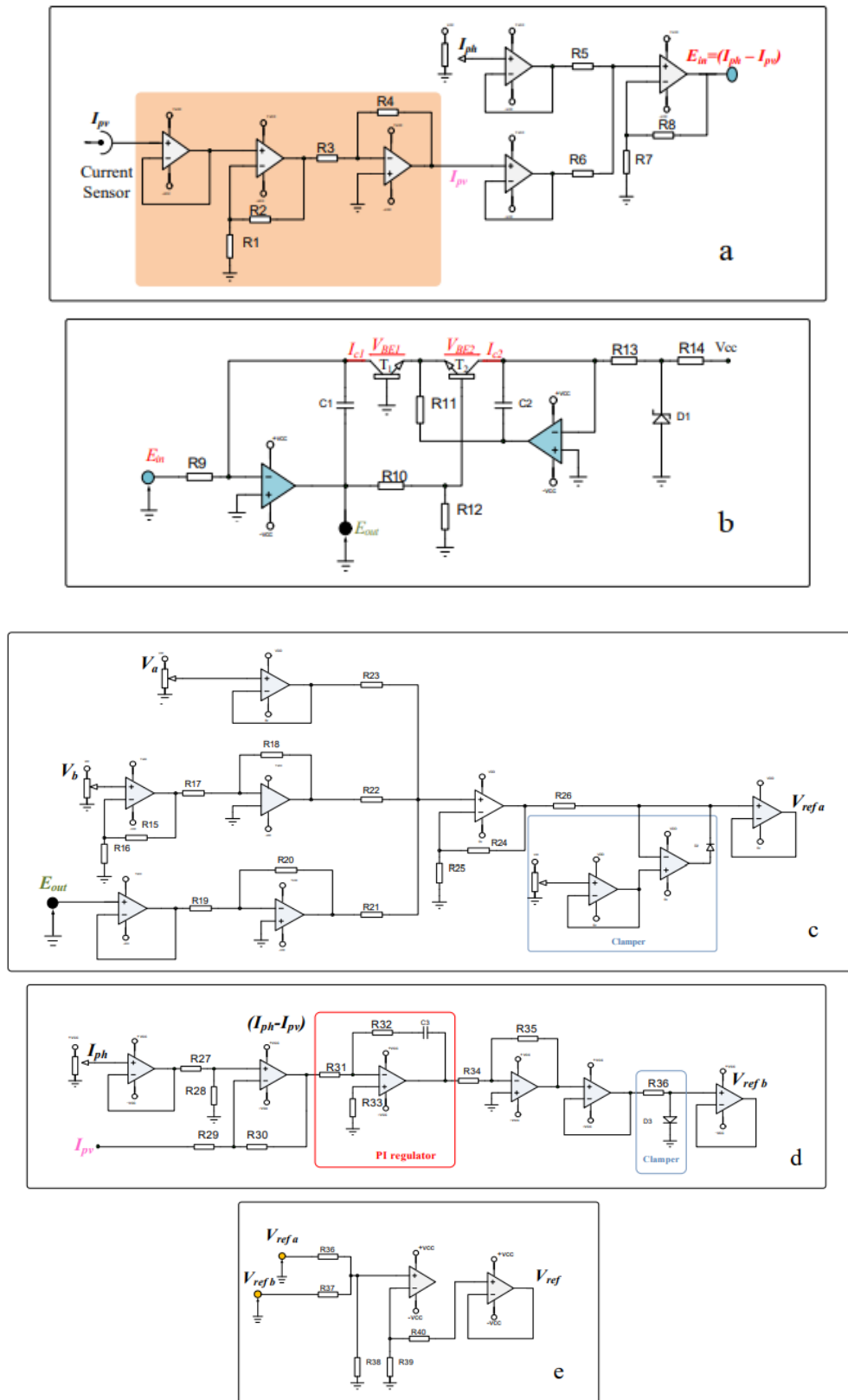


Figure 1.14. Schéma électrique des composants analogiques du contrôleur de l'émulateur photovoltaïque
 Légende : (a) Circuit de traitement. (b) Circuit amplificateur logarithmique. (c) Tension caractéristique PV. (d) Circuit du régulateur PI. (e) Circuit comparateur.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Ce circuit repose sur l'utilisation de plusieurs régulateurs linéaires **LM338** montés en parallèle, ce qui permet d'augmenter la capacité en courant de sortie et de simuler un comportement réaliste de générateur photovoltaïque. Chaque régulateur est associé à des composants passifs (résistances, condensateurs, diodes de protection) pour assurer une stabilité thermique et électrique, tout en équilibrant les charges entre les voies. L'ensemble est alimenté par une source DC fixe, et la tension de référence V_{ref} , calculée par le circuit analogique de commande (amplificateur logarithmique et comparateurs), permet de piloter dynamiquement la tension de sortie V_{pv} . Cette sortie est ensuite appliquée à une charge résistive ou à une batterie, selon le cas d'utilisation. Ce montage permet une émulation fidèle et modulable d'un module solaire, sans recours à un panneau physique.

1.4.4 Émulateur photovoltaïque numérique à base de FPGA et convertisseur Buck

Le synoptique de la figure 1.15 représente le fonctionnement d'un système d'émulation de panneau photovoltaïque (PV) basé sur un modèle numérique. Ce modèle calcule le courant de référence I_{pvref} en fonction de la tension V_{pv} , de l'irradiance G_i , et de la température T_i . Ce courant de référence est ensuite comparé au courant réel I_{pv} mesuré à la sortie du convertisseur. L'erreur ε entre ces deux courants est traitée par un régulateur PI, qui génère un signal de commande α destiné au convertisseur DC/DC (de type buck). Ce convertisseur ajuste alors sa sortie pour alimenter une charge résistive. La tension et le courant réels sont renvoyés en boucle vers le modèle pour une régulation continue, assurant ainsi que le système reproduit fidèlement le comportement d'un panneau solaire réel en temps réel [12].

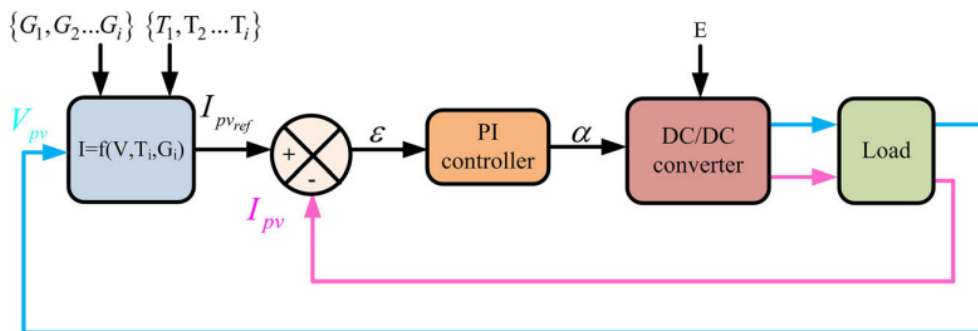


Figure 1.15. Schéma bloc d'un émulateur photovoltaïque numérique basé sur un contrôleur FPGA et un convertisseur Buck [12].

1.4.5 Émulateurs photovoltaïques disponibles sur le marché

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Il existe des émulateurs photovoltaïques disponibles sur le marché, conçus principalement pour des applications pédagogiques, industrielles ou de test en laboratoire. Ils permettent de simuler le comportement électrique de panneaux solaires sans avoir recours à des modules physiques, tout en offrant la possibilité de tester des régulateurs, convertisseurs ou algorithmes MPPT dans des conditions contrôlées.

Ecosense Solar PV Emulator System (SPVE):

L'émulateur SPVE (Solar PV Emulator System) est un système de laboratoire conçu pour reproduire fidèlement les caractéristiques électriques d'un panneau solaire. Il dispose de deux canaux indépendants, chacun capable de délivrer jusqu'à 1 kW, avec une plage de tension allant de 0 à 50 V et un courant jusqu'à 20 A. Ce système permet à l'utilisateur d'entrer des paramètres comme le V_{oc} , I_{sc} , coefficient de température, irradiance, surface, etc., pour générer des courbes I-V personnalisées. Il est principalement destiné à une utilisation en intérieur, et s'avère particulièrement adapté à l'évaluation des performances d'algorithmes MPPT, à l'étude des effets d'ombrage partiel ou à la simulation de différentes conditions météorologiques [13].

Lucas-Nuelle Panneau Solaire Émulé – 1,5 kW, 500 V :

Ce simulateur de panneau solaire développé par Lucas-Nuelle permet de reproduire un module PV d'une puissance de 1,5 kW avec une tension pouvant atteindre 500 V. Il s'intègre dans des bancs didactiques et permet de tester le comportement de régulateurs MPPT, d'onduleurs solaires, et de micro-réseaux dans des conditions reproductibles. Le système permet aussi d'introduire des scénarios de variation d'ensoleillement ou de température pour l'enseignement ou la recherche [14].

Keysight MP4300A Series – Modular Solar Array Simulator:

La série MP4300A de Keysight est un émulateur solaire modulaire de très haute précision, destiné à des applications industrielles et aérospace. Elle propose jusqu'à 6 modules dans un châssis 2U, chaque module pouvant fournir jusqu'à 1 kW (jusqu'à 160 V / 10 A selon le modèle). Elle fonctionne en trois modes : SAS (simulation d'un panneau PV via V_{oc} , I_{sc} , V_{mp} , I_{mp}), mode Table (courbes I-V définies point par point), et mode Fixe (source de tension/courant classique). L'émulateur est doté d'une interface tactile, de connexions USB-C, LAN et GPIB, et peut simuler des changements rapides de conditions comme l'ombre ou l'éclipse. Ce système est conçu pour des bancs de test satellites, onduleurs, ou convertisseurs solaires haute précision [15].

1.6 Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'introduire les principes de base des systèmes photovoltaïques, en s'appuyant sur une analyse détaillée du fonctionnement des cellules solaires, de leurs technologies, et de leur modélisation électrique. Dans la continuité de cette étude, nous avons également présenté les convertisseurs DC-DC et leur rôle dans l'adaptation de la puissance, avant d'aborder les émulateurs photovoltaïques, qui constituent une alternative efficace aux générateurs solaires physiques.

L'étude des différentes approches d'émulation analogiques, numériques ou commerciales a mis en évidence leur capacité à reproduire avec précision le comportement électrique d'un panneau photovoltaïque, dans un environnement maîtrisé et reproductible. Ce cadre ouvre la voie à des expérimentations plus souples et ciblées, tout en offrant une grande flexibilité pour le test et la validation de dispositifs électroniques associés.

Ainsi, les notions développées dans ce chapitre serviront de référence pour la suite de ce travail, qui portera sur la conception et la mise en œuvre d'un émulateur photovoltaïque adapté à notre architecture.

CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons la mise en place et la simulation des différents blocs nécessaires à la réalisation d'un émulateur de panneau photovoltaïque. L'objectif est de construire un système capable de reproduire fidèlement le comportement électrique d'un générateur solaire réel à travers une modélisation logicielle précise. Pour cela, divers aspects seront explorés, depuis la modélisation mathématique du panneau jusqu'à l'intégration du convertisseur DC-DC de type Buck et de sa commande.

La simulation de l'émulateur, développée sous l'environnement MATLAB/Simulink, permet de représenter le fonctionnement d'un panneau solaire à l'aide d'une source de tension continue couplée à un convertisseur commandé. À chaque instant, les mesures de tension et de courant en sortie sont injectées dans une fonction MATLAB afin d'être comparées aux valeurs théoriques issues du modèle PV. Cette comparaison permet d'ajuster dynamiquement le rapport cyclique du signal PWM pour que la sortie suive fidèlement la courbe caractéristique I-V du panneau simulé.

Chaque étape de cette modélisation joue un rôle déterminant dans la précision et la performance de l'émulateur. Les méthodes adoptées, les résultats de simulation et les choix techniques seront détaillés dans les sections qui suivent.

2.2 Schéma Synoptique

La conception de l'émulateur de panneau solaire repose sur un convertisseur DC-DC commandé par un microcontrôleur ESP32, permettant de reproduire fidèlement la courbe caractéristique d'un panneau photovoltaïque réel. L'alimentation fournit une tension continue au convertisseur, qui ajuste sa sortie selon le rapport cyclique (D) d'un signal PWM généré par l'ESP32. Ce dernier utilise un circuit d'adaptation pour mesurer en temps réel la tension (V_{ch}) et le courant (I_{ch}) appliqués à la charge. Ces grandeurs sont ensuite traitées pour estimer la résistance de la charge, permettant à l'ESP32 de recalculer la tension idéale correspondant à cette résistance selon le modèle mathématique du panneau solaire. Une interface d'adaptation est utilisée pour adapter le signal PWM aux caractéristiques du convertisseur. Ainsi, l'émulateur adapte dynamiquement sa sortie en fonction de la charge, suivant avec précision la courbe I-V du panneau solaire cible.

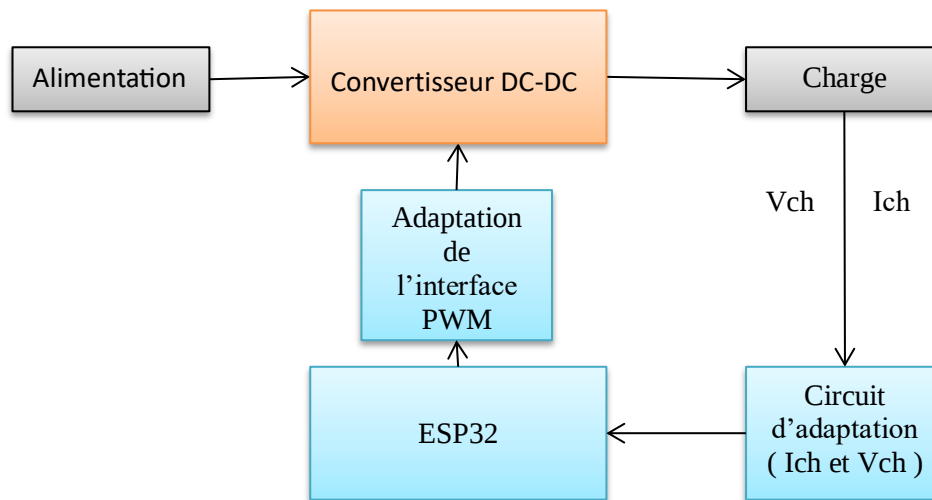


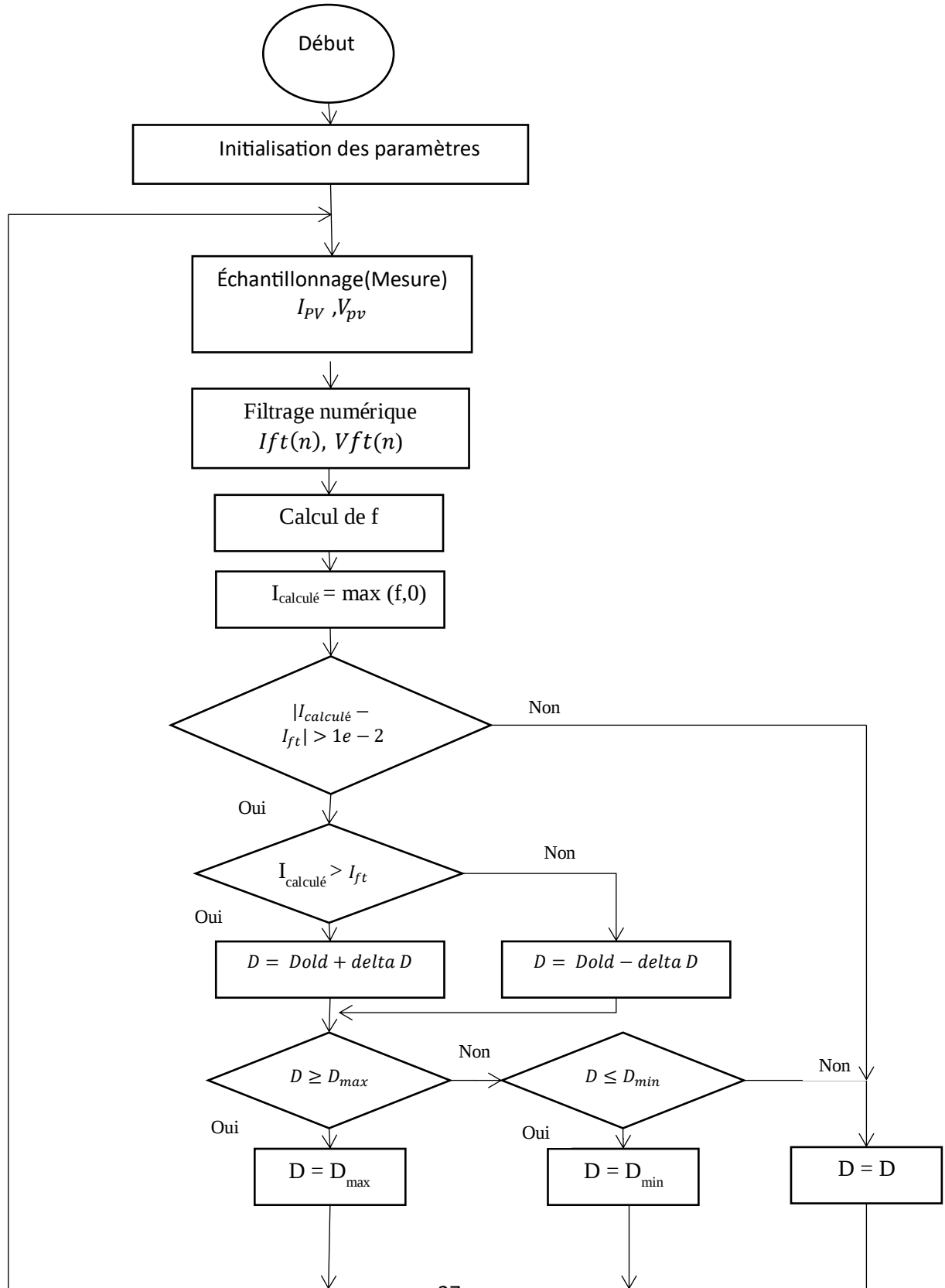
Figure 2.1. Synoptique de l'Émulateur de Panneau Photovoltaïque.

2.3 Synthèse d'un émulateur

Dans ce projet, l'ESP32 joue un rôle central dans la commande d'un convertisseur Buck afin de reproduire le comportement d'un véritable panneau solaire. Le processus commence par l'envoi d'un signal PWM initial de l'ESP32 vers le convertisseur, ce qui permet d'appliquer une tension arbitraire à la charge. Un circuit externe de mesure de tension et de courant relève ensuite les grandeurs électriques aux bornes de la charge, à savoir la tension V_{ch} et le courant I_{ch} , puis transmet ces valeurs à l'ESP32. Ce dernier calcule alors la résistance équivalente de la charge $R_{ch} = \frac{V_{ch}}{I_{ch}}$. À partir de cette valeur, l'ESP32 estime la tension que fournirait un véritable panneau solaire dans les mêmes conditions, en utilisant un modèle mathématique à une diode. Il suppose dans un premier temps que le courant I_{pv} est égal au courant photo-généré I_{ph} , puis applique la méthode de Newton-Raphson pour résoudre l'équation du modèle PV et déterminer la vraie valeur de I_{pv} . La tension cible est ensuite recalculée selon $V_{pv} = I_{pv} * R_{ch}$, ce qui correspond à la tension que le panneau réel aurait générée. L'ESP32 convertit alors cette tension en un nouveau rapport cyclique PWM qu'il renvoie au convertisseur pour ajuster sa sortie. Ce processus est répété en boucle afin d'assurer un suivi dynamique et fidèle de la courbe I-V du panneau solaire réel.

2.4. Implémentation de l'algorithme Newton-Raphson sur Matlab Simulink

2.4.1 Synthèse d'un algorithme de Newton-Raphson avec filtrage FIR



CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION

Figure 2.2. D'un algorithme de Newton-Raphson avec filtrage FIR.

2.4.2 Schéma du système sur Matlab-Simulink

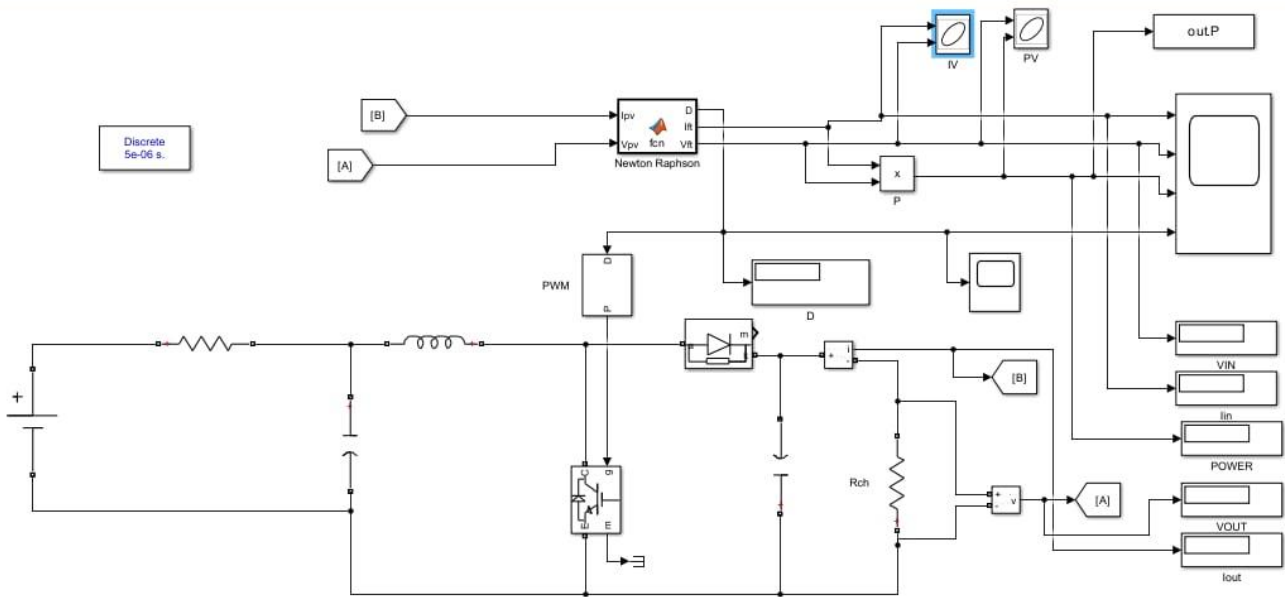


Figure 2.3. Schéma de la commande Newton Raphson sur Matlab Simulink.

Résultats et Interprétation :

Newton-Raphson /Ift :

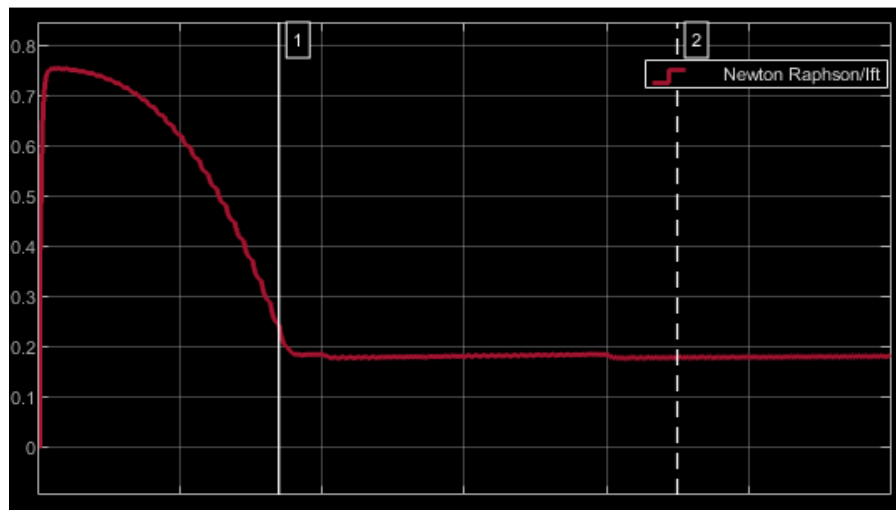


Figure 2.4. la variation de courant filtrée (A) en fonction du temps (s).

- Observation :

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

Le courant démarre à environ 0.75 A, puis chute rapidement jusqu'à une valeur stable d'environ 0.19A. Cette chute reflète l'ajustement dynamique du système au démarrage, lorsque le PWM n'est pas encore calibré.

- Conclusion : le courant s'aligne progressivement sur la valeur simulée du modèle PV.

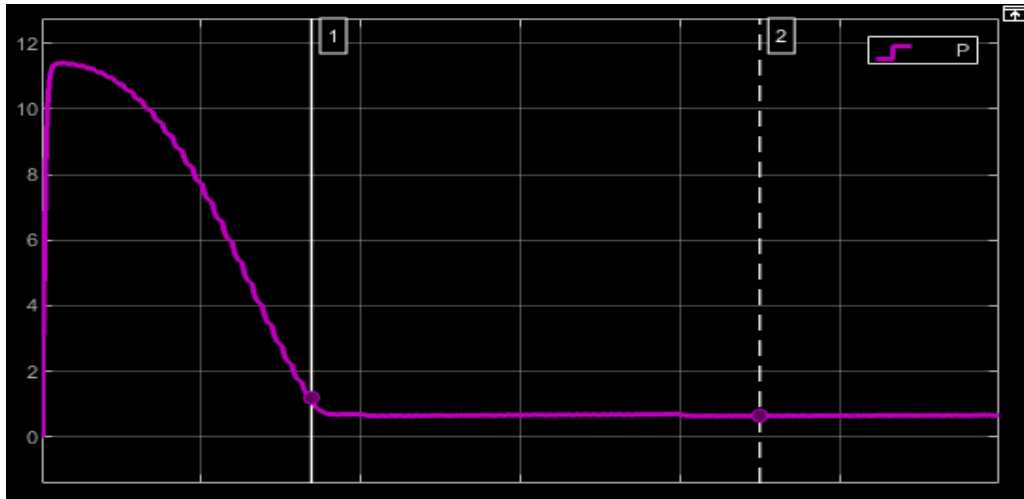


Figure 2.5. La variation de la puissance filtrée (W) en fonction du temps (s).

- Observation :

La puissance démarre à environ 11 W, chute brusquement, puis se stabilise autour de 0.3 W. Elle suit logiquement la variation du courant et de la tension : quand le système s'ajuste, la puissance délivrée par le convertisseur chute puis devient stable.

- Conclusion : la régulation permet de converger vers une puissance simulée cohérente avec une sortie PV stabilisée.

Newton Raphson /vft :

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

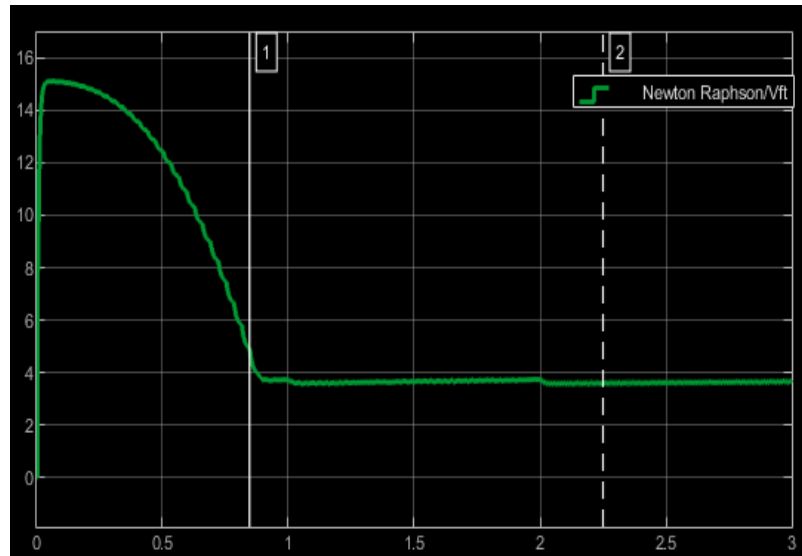


Figure 2.6. La variation de la tension filtrée (V) en fonction du temps (s).

○ Observation :

La tension débute vers 14 V, puis descend progressivement jusqu'à environ 2.5 V, où elle se stabilise. Ce comportement montre que le convertisseur, initialement non réglé, délivre une tension élevée avant que le système ne corrige par ajustement du rapport cyclique.

- Conclusion : le système contrôle efficacement la tension de sortie simulée pour correspondre à un point de fonctionnement réaliste.

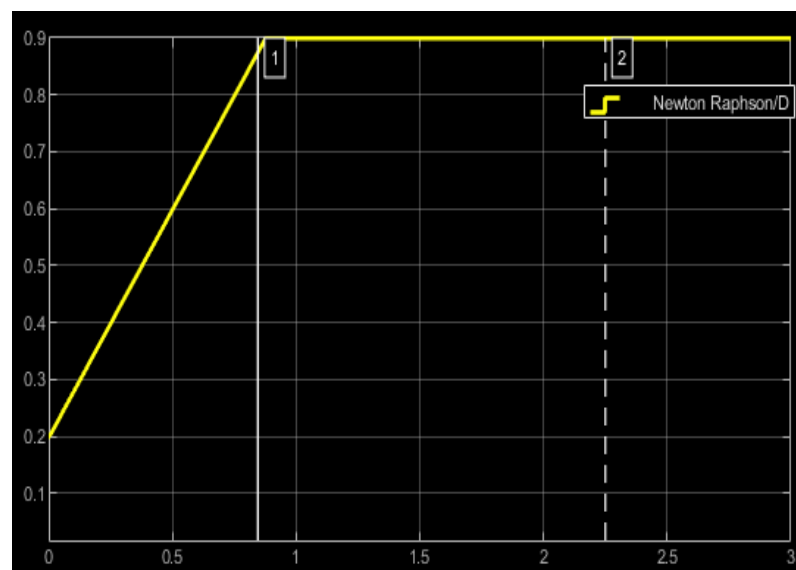


Figure 2.7. La variation de rapport cyclique en fonction du temps (s).

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

- Observation :

Le rapport cyclique commence à 0.2, puis augmente régulièrement jusqu'à 0.9, où il se stabilise. Cette évolution indique que l'algorithme cherche à compenser la chute de tension/courant en ouvrant davantage le convertisseur (plus de temps ON).

- Conclusion : le contrôle PWM s'adapte dynamiquement pour générer la sortie correspondant à un comportement PV.

2.4.3 Le Convertisseur abaisseur (Buck)

Un convertisseur DC-DC de type Buck a été utilisé afin d'ajuster dynamiquement la tension de sortie de l'émulateur de panneau solaire en fonction de la charge. Ce convertisseur permet de réduire la tension générée par le modèle PV tout en maintenant le courant nécessaire à la simulation du comportement réel d'un panneau solaire. Le contrôle de la tension de sortie est réalisé à travers la modulation du rapport cyclique (PWM), ce qui permet de faire varier le point de fonctionnement et de suivre précisément la courbe caractéristique du panneau. Grâce à ce dispositif, il est possible de reproduire le comportement dynamique d'un panneau photovoltaïque dans diverses conditions d'ensoleillement et de température.

Tableau 2.1. Les valeurs des composants du convertisseur Buck.

Composants	Vs	L	C	R	T	D
Valeurs	48v	97.5μH	100μF	10 Ohm	$\frac{1}{40000}S$	0.375

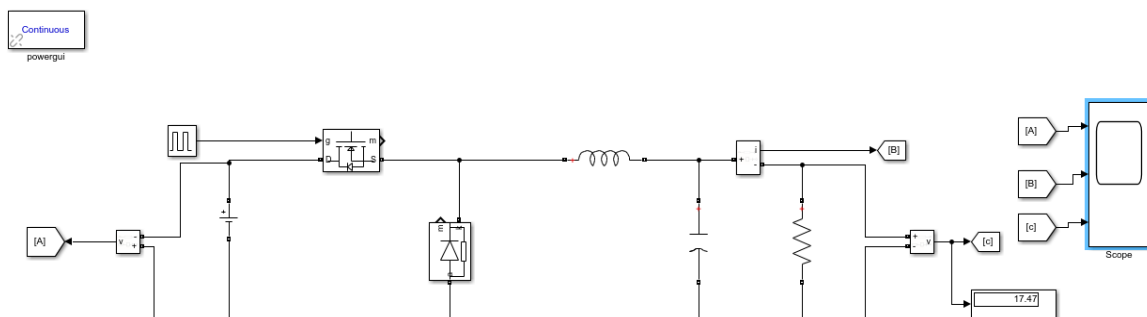


Figure 2.8. Modèle Buck sur Simulink.

2.4.4 Convertisseur élévateur (Boost)

Le convertisseur DC/DC permet de transférer efficacement l'énergie produite par le panneau solaire vers la charge, en assurant une transmission à puissance maximale. Cet ajustement s'effectue grâce à la modulation de la largeur d'impulsion (PWM), appliquée à un interrupteur électronique, généralement un MOSFET ou un IGBT. La recherche du point de puissance maximale est assurée par un algorithme MPPT qui ajuste dynamiquement le rapport cyclique du convertisseur. Le schéma correspondant est implémenté sous Matlab/Simulink. Les valeurs des composants électroniques utilisés (diode, IGBT, condensateur, charge) sont précisées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2.2. Les valeurs des composants du convertisseur Boost.

Composants	C_in (F)	L(H)	C_out (F)	R_charge(ohm)
Valeur	100e-6	5e-3	6e-4	20

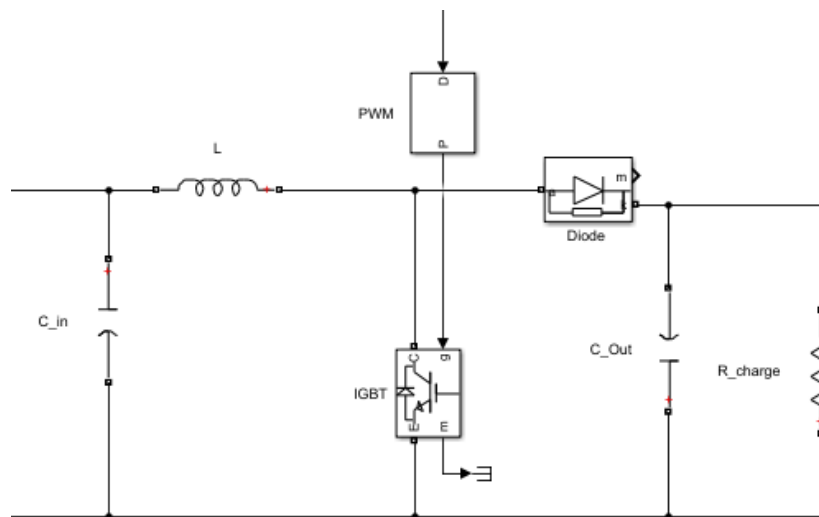


Figure 2.9. Modèle Boost sur Simulink.

2.4.5 Contrôleur PWM

Tableau 2.3. Les paramètres de régulateur de charge PWM

Paramètres	Valeurs
Switching frequency (Hz)	5000
Sample time	5e-6

2.5 Modélisation numérique du panneau solaire avec Newton-Raphson sous MATLAB

Afin de tracer la courbe caractéristique I-V et P-V du panneau solaire, un script MATLAB basé sur la méthode de Newton-Raphson a été développé. Ce script permet de résoudre de manière itérative l'équation implicite du courant de sortie du panneau, issue du modèle à une diode. Les constantes physiques (charge de l'électron, constante de Boltzmann) ainsi que les paramètres du panneau (tension à vide, courant de court-circuit, résistances série et shunt) sont d'abord définis. La tension thermique est ensuite calculée, puis utilisée pour estimer le courant de saturation I_{sc} . Pour chaque valeur de tension dans l'intervalle $[0, V_{oc}]$, l'algorithme applique la méthode de Newton-Raphson afin de trouver le courant correspondant. Cette méthode consiste à approcher la solution d'une équation non linéaire par itérations successives, jusqu'à convergence. Enfin, le programme trace la courbe I-V et P-V obtenue, illustrant le comportement réel du panneau. Cette approche permet d'avoir une bonne précision dans la modélisation du panneau et d'observer les effets des paramètres internes sur la forme de la courbe.

$$I = I_{ph} - I_s \exp^{q\left(\frac{V+R_s*I}{n*K*T}\right)} - 1 - \frac{V+R_s*I}{R_{sh}} \quad (1)$$

I : Courant de sortie du panneau photovoltaïque

V : Tension de sortie du panneau

I_{ph} : Courant de génération photoélectrique

I_s : Courant de saturation de la diode

R_s : Résistance série interne du panneau

Rsh : Résistance parallèle (shunt) du panneau

n : Facteur d'idéalité de la diode

k : Constante de Boltzmann

T : Température en Kelvin

q : Charge élémentaire de l'électron

La méthode de **Newton-Raphson** est une technique numérique itérative utilisée pour résoudre des **équations non linéaires** de la forme : $f(I) = 0$

Elle permet de trouver la solution I (courant) qui annule une fonction donnée. Le principe repose sur une *suite d'approximations successives* :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{f(I_n)}{f'(I_n)} \quad (2)$$

- I_n Est l'estimation actuelle du courant,
- $f(I_n)$ Est la valeur de la fonction à cette estimation,
- $f'(I_n)$ Est la dérivée de $f(I_n)$ par rapport à I

Ce processus est répété jusqu'à ce que la différence entre deux itérations consécutives soit suffisamment petite

par exemple : $|f(I_n) - I_n| < 10^{-2}$

2.6 Etude comparative des panneaux solaires par la méthode Newton-Raphson

2.6.1 Modélisation du panneau solaire Dow Chemical (13 W)

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

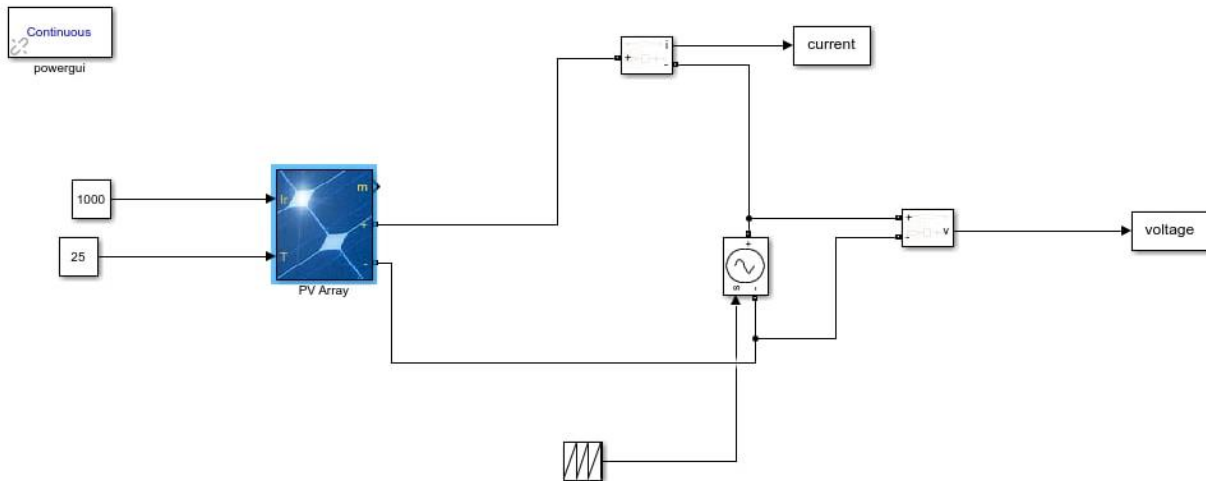


Figure 2.10. Modèle panneau photovoltaïque sur Simulink.

Tableau 2.4. Caractéristiques électriques du module PV.

Module:	Dow Chemical DPS-13-1000
Puissance maximale (W)	13,2
Nombre de cellules par module	5
Tension en circuit ouvert Voc (V)	3,2
Courant de court-circuit Isc (A)	6,3
Tension au point de puissance maximale Vmp (V)	2,4
Courant au point de puissance maximale Imp (A)	5,5
Coefficient de température de Voc (%/°C)	-0,35959
Courant généré par la lumière IL (A)	6,3953

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

Courant de saturation de la diode Isc (A)	$1,8719 \times 10^{-10}$
Facteur d'idéalité de la diode	1,0314
Résistance de shunt Rsh (ohms)	5,1195
Conditions de test	Ensemble @ 1000 W/m ²
Température des cellules T_cell (°C)	[45, 25]

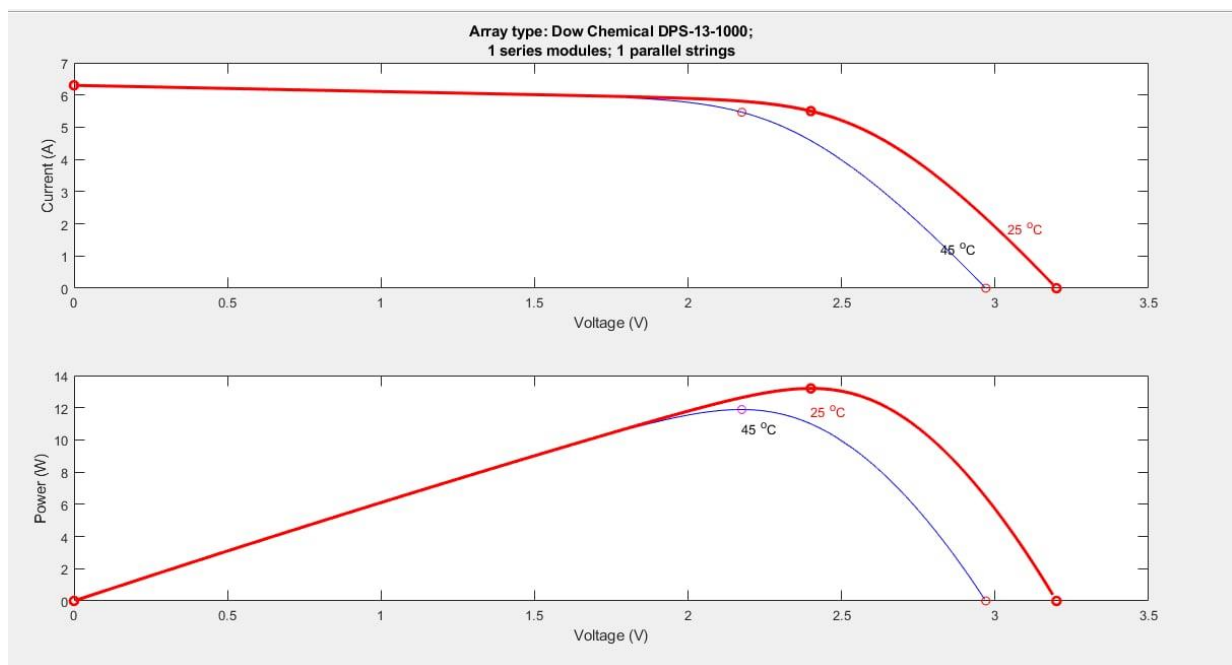


Figure 2.11. Caractéristiques I-V et P-V du module PV utilisé.

CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION

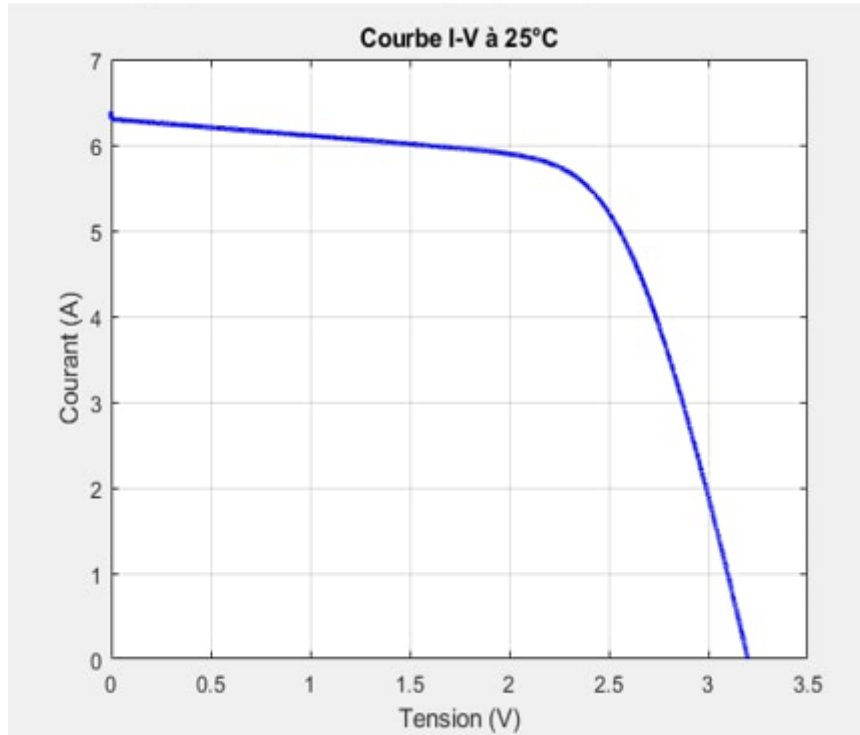


Figure 2.12. Caractéristique I-V du module PV utilisé.

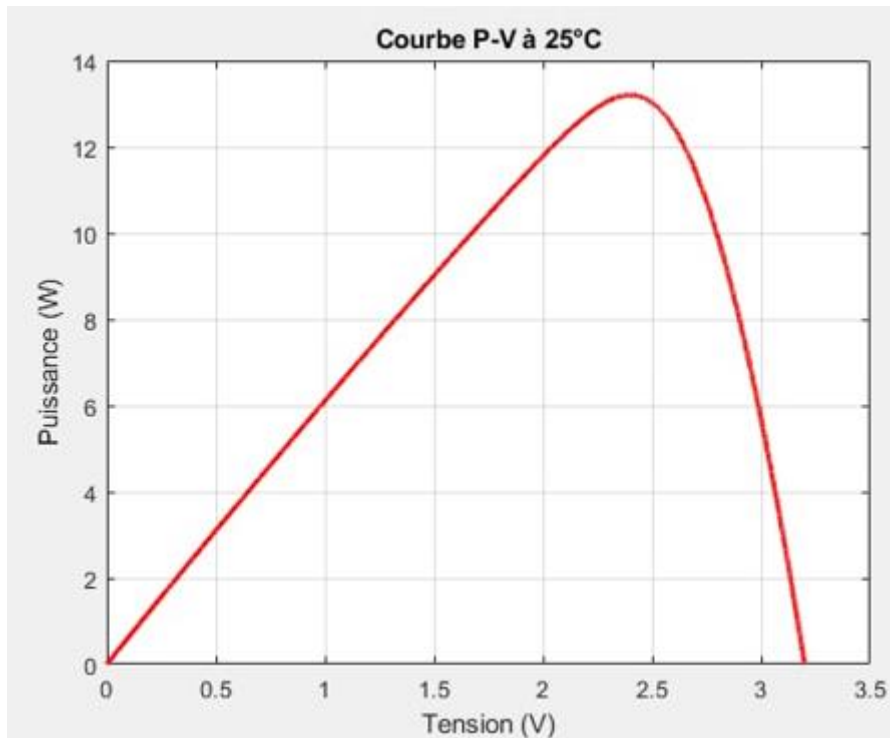


Figure 2.13. Caractéristique P-V du module PV utilisé.

2.6.2 Modélisation du panneau solaire SunPower (76.275 W)

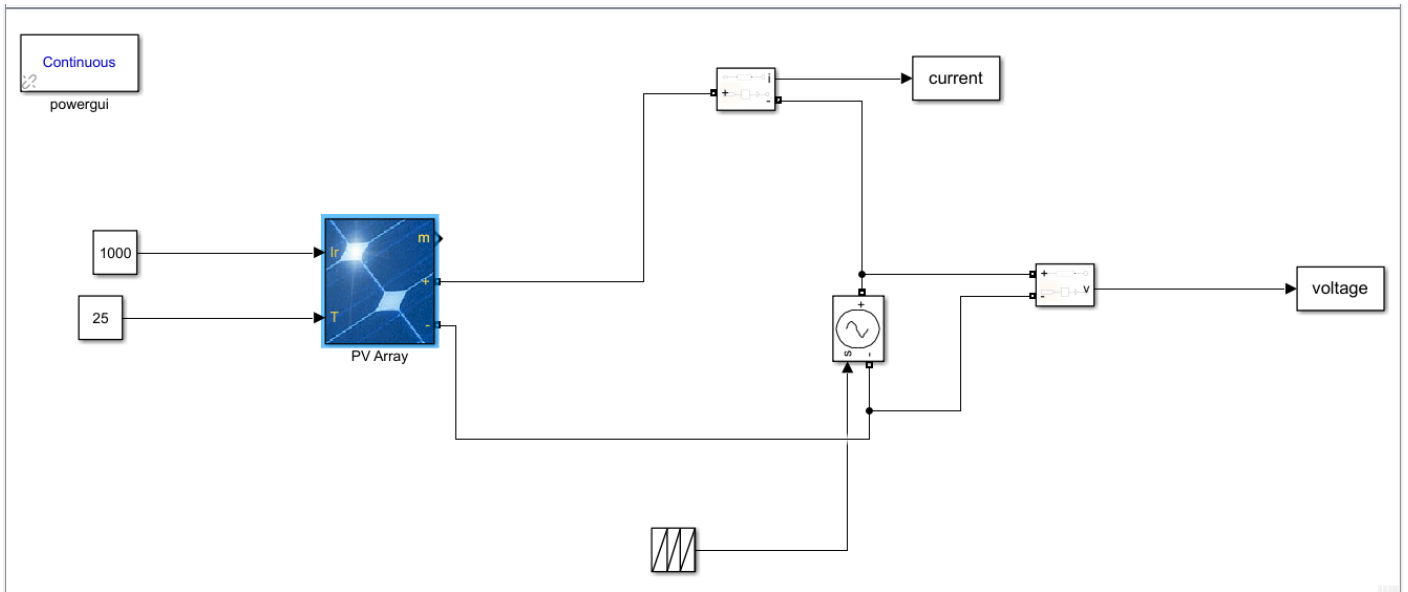


Figure 2.14. Modèle panneau photovoltaïque sur Simulink.

Tableau 2.5. Caractéristiques électriques du module

Nom du module	SunPower SPR-76R-BLK-U
Puissance maximale (Pmax)	76.275 W
Tension à vide (Voc)	16.2 V
Tension au point de puissance max (Vmp)	13.5 V
Courant de court-circuit (Isc)	6.02 A
Courant au point de puissance max (Imp)	5.65 A
Nombre de cellules par module	24
Coefficient de température de Voc	-0.37901 %/°C
Coefficient de température de Isc	0.030997 %/°C
Courant généré par la lumière IL	6.0236 A
Courant de saturation de la diode Isc	3.7057e-10 A
Facteur d'idéalité de la diode	1.1181
Résistance de shunt Rsh(ohm)	190.3046 Ω
Résistance série Rs(ohm)	0.11329 Ω

CHAPITRE 2 : SYNTHESE ET SIMULATION

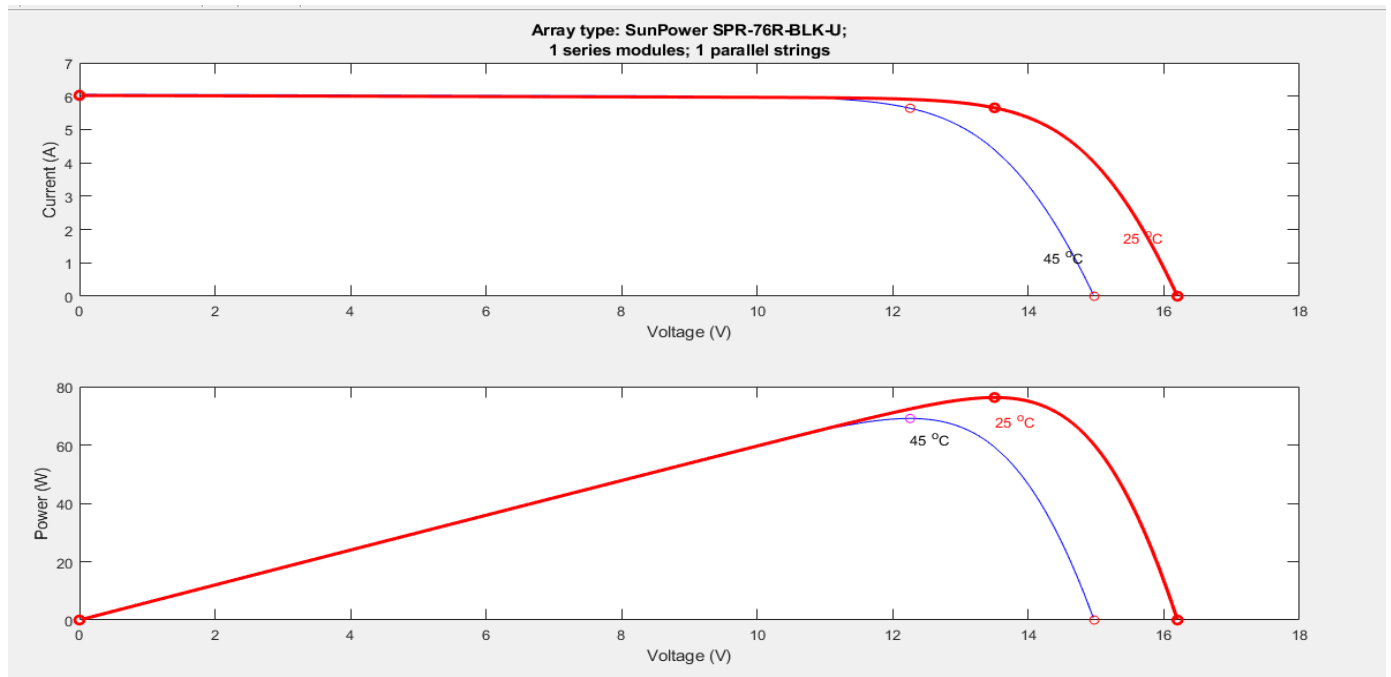


Figure 2.15. Caractéristiques I-V et P-V du module PV utilisé.

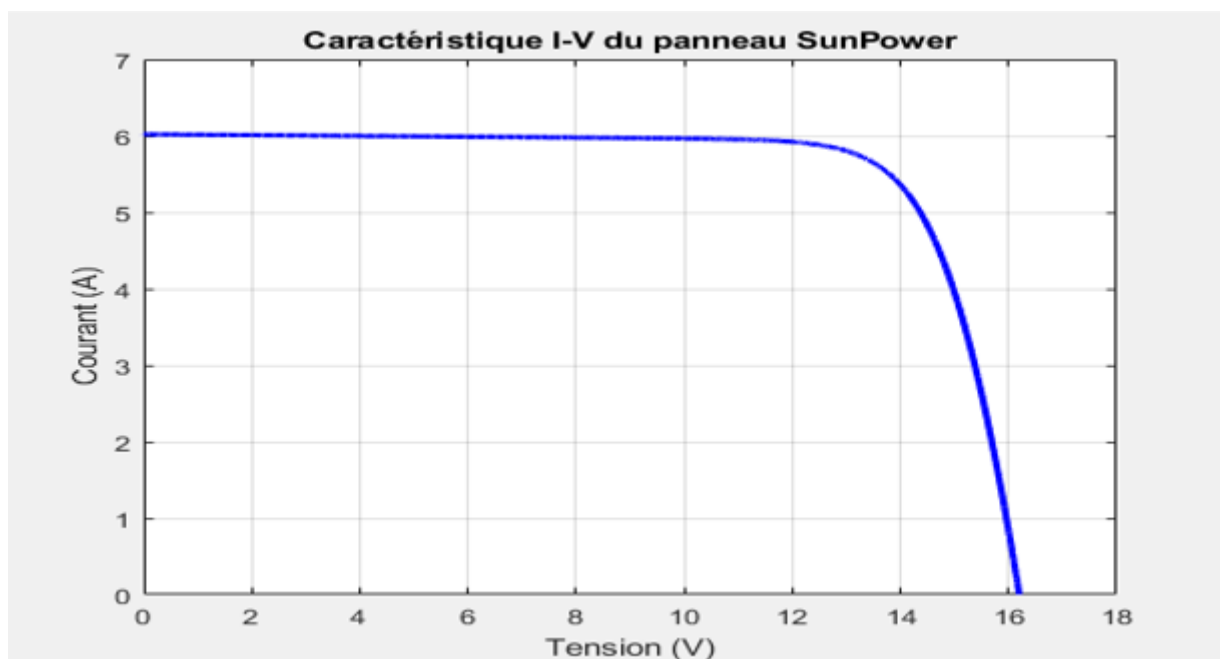


Figure 2.16. Caractéristique I-V du module PV utilisé.

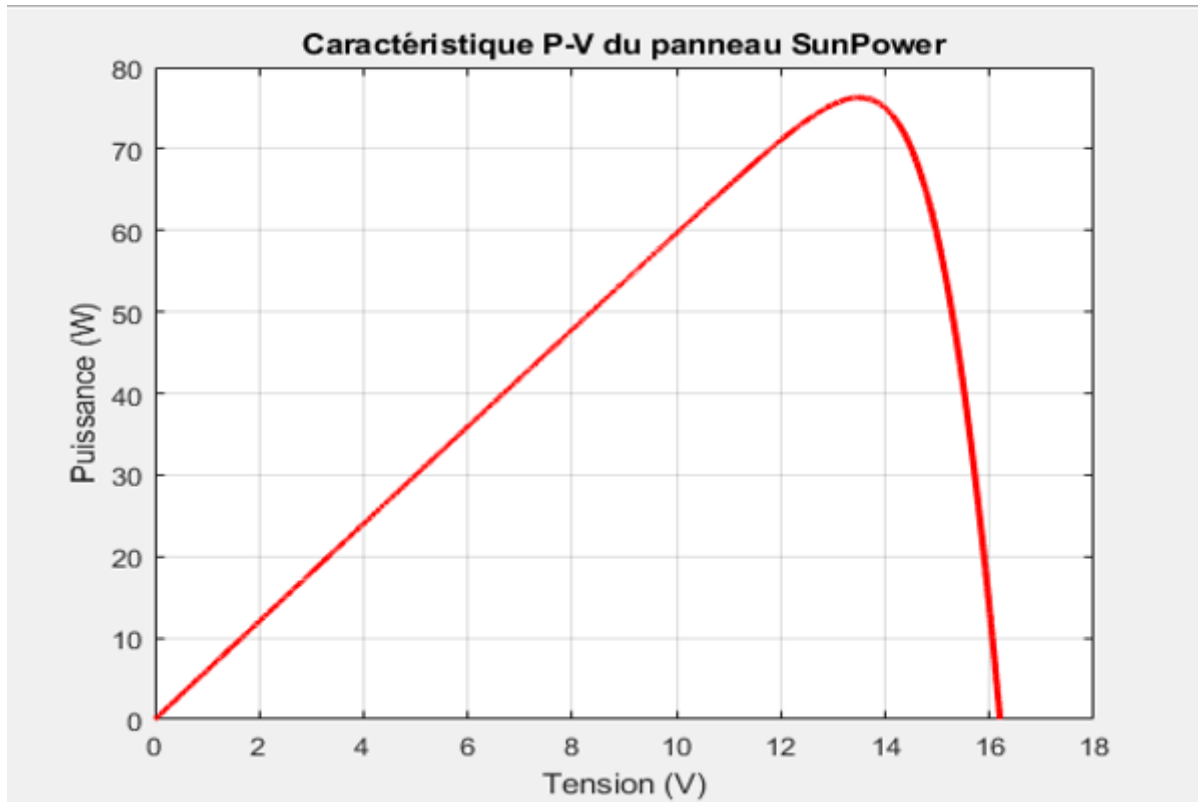


Figure 2.17. Caractéristique P-V du module PV utilisé.

2.6.3 Synthèse d'une commande par la méthode de Newton-Raphson pour le panneau solaire Dow Chemical DPS-13-1000

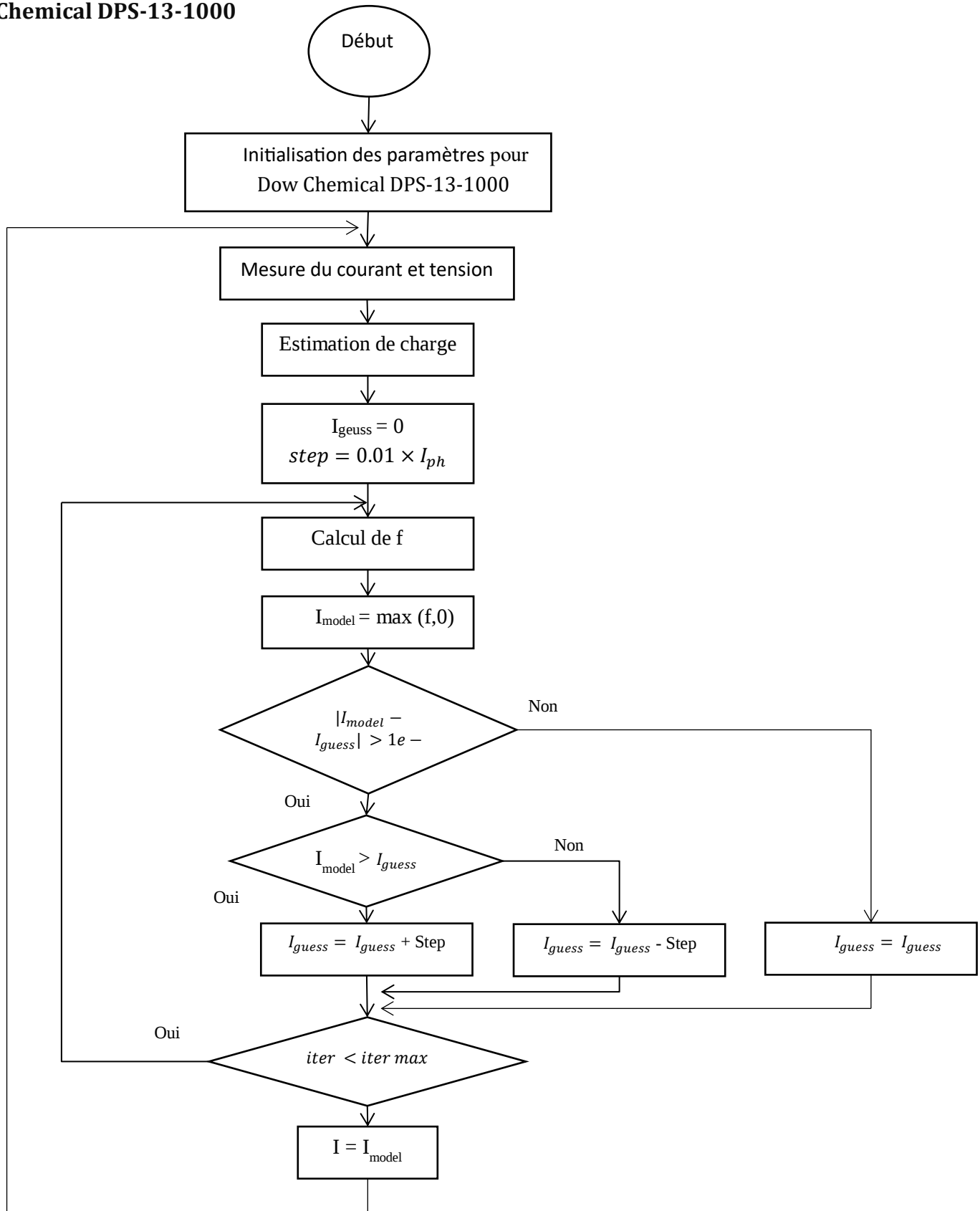


Figure 2.18. Schéma de la commande basée sur l'algorithme de Newton-Raphson.

Interprétation des courbes I-V et P-V du panneau Dow Chemical DPS-13-1000 :

Les deux courbes obtenues à partir du code MATLAB montrent le comportement électrique typique d'un panneau solaire.

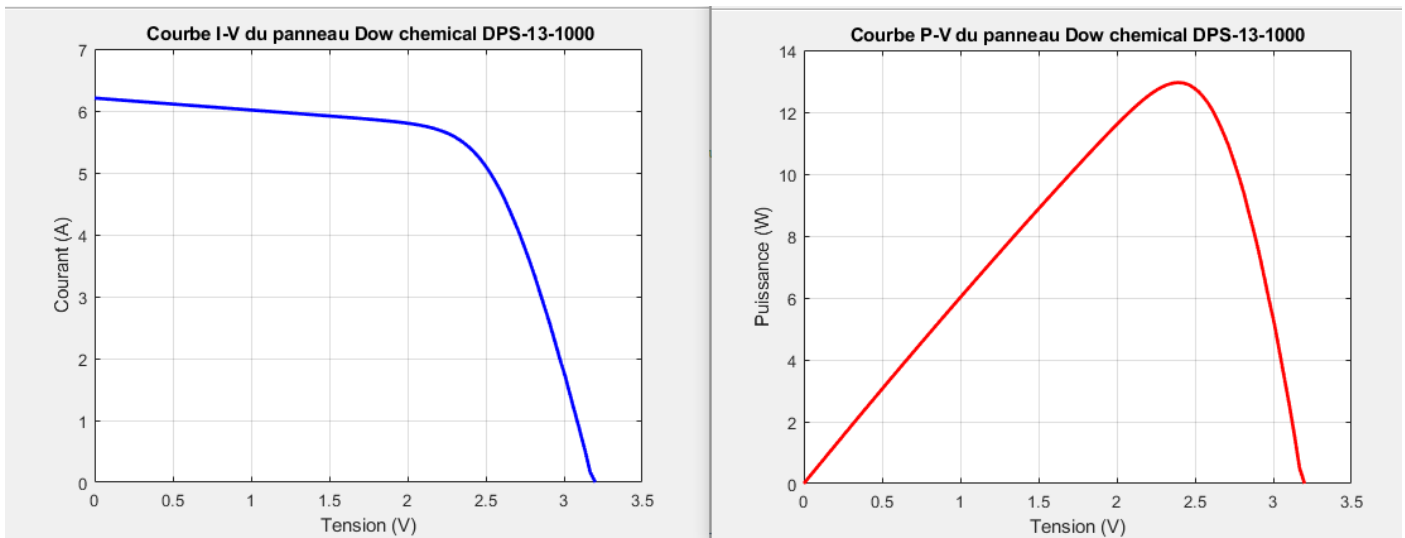


Figure 2.19. Courbes(I-V) (P-V) obtenue à partir du code MATLAB.

➤ Courbe I-V (Courant en fonction de la tension)

Sur cette courbe, on remarque que le courant reste presque constant autour de **6 A** quand la tension est faible. Cela correspond à la zone où le panneau peut fournir beaucoup de courant, même si la tension n'est pas encore élevée. Ensuite, à partir d'environ **2.5 à 3 V**, le courant chute rapidement jusqu'à zéro. Ce point correspond à la **tension de circuit ouvert ($V_{oc} \approx 3.2 \text{ V}$)**, c'est-à-dire quand le panneau n'alimente plus aucune charge.

Ce comportement est bien connu sur les panneaux solaires : le courant reste stable au début, puis chute brusquement une fois que la tension est trop élevée.

➤ Courbe P-V (Puissance en fonction de la tension)

La courbe de puissance augmente au début, car plus la tension monte, plus la puissance ($P = V \times I$) augmente. Elle atteint ensuite un **maximum autour de 2.4 V**, ce qui correspond au **point de puissance maximale (MPP)**. C'est à ce point que le panneau fournit le plus d'énergie, avec environ

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

13 W, ce qui est conforme aux données constructeur ($P = 2.4 \text{ V} \times 5.5 \text{ A}$). Après ce point, la puissance chute car même si la tension continue d'augmenter, le courant diminue fortement.

2.6.4 Synthèse d'une commande par la méthode de Newton-Raphson pour le panneau solaire SunPower-76R-BLK-U

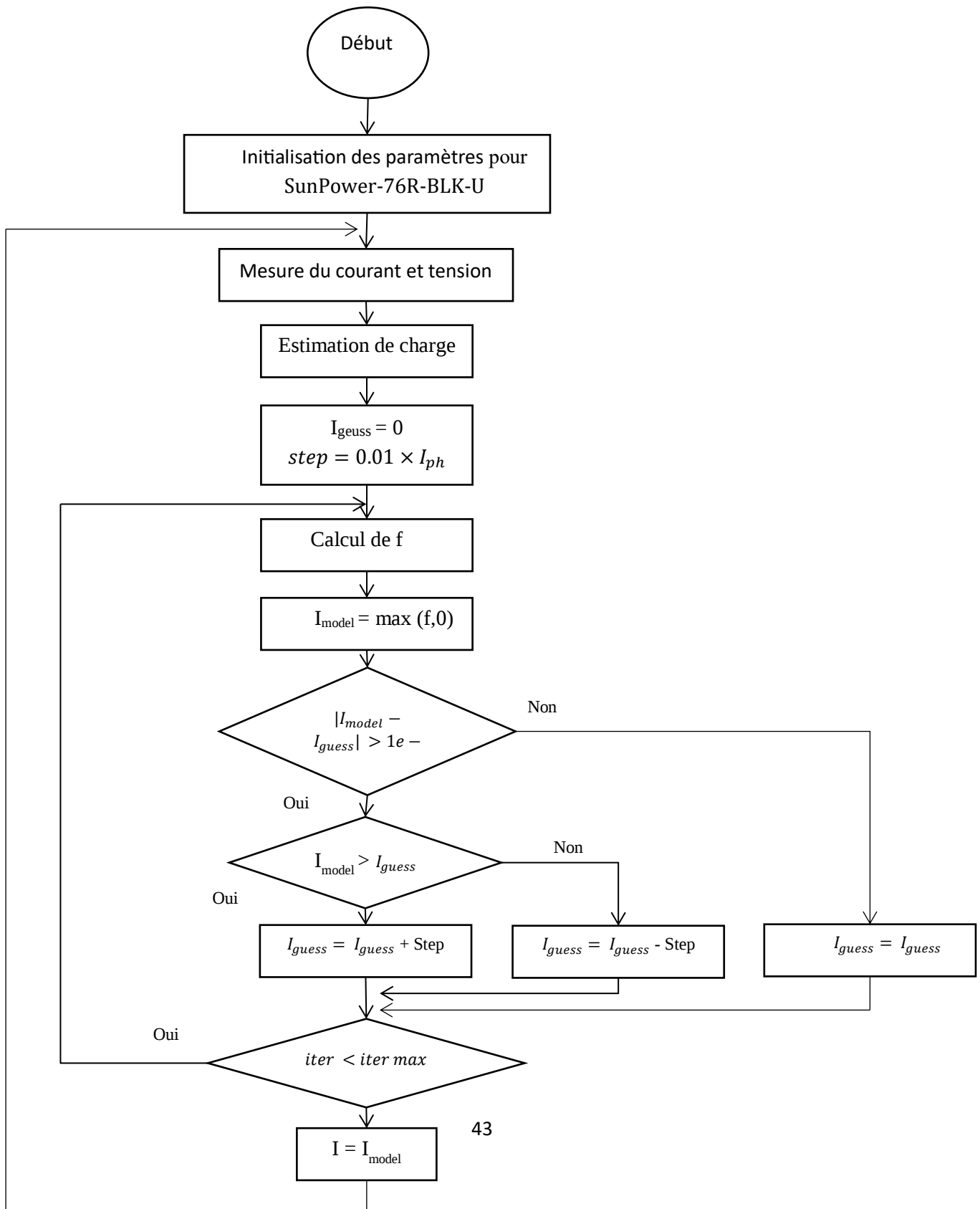


Figure 2.20. Schéma de la commande basée sur l'algorithme de Newton-Raphson.

Interprétation des courbes I-V et P-V du panneau SunPower-76R-BLK-U:

Les deux courbes obtenues à partir du code MATLAB montrent le comportement électrique typique d'un panneau solaire.

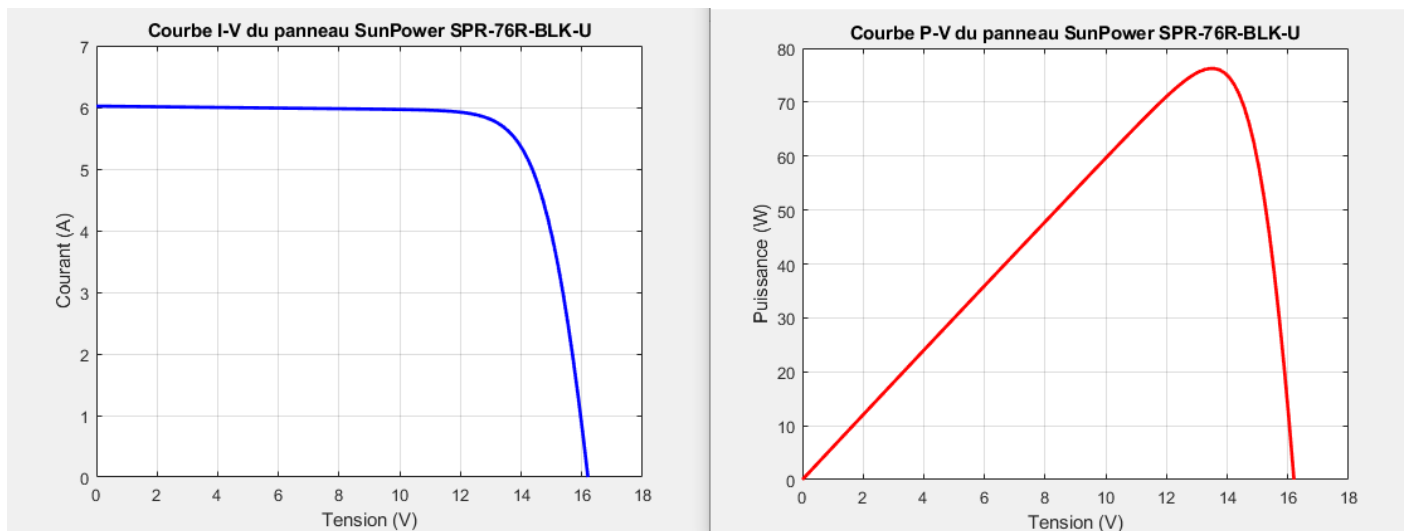


Figure 2.21. Courbes(I-V) (P-V) obtenue à partir du code MATLAB.

➤ Courbe I-V (Courant en fonction de la tension) :

La courbe I-V (courant en fonction de la tension) du panneau montre un comportement typique d'un panneau solaire réel : pour des tensions faibles (de 0 à environ 13 V), le courant reste quasiment constant autour de 6 A, ce qui indique que le panneau se comporte comme une source de courant. À partir d'une certaine tension, proche de 13.5 V (la tension de puissance maximale, V_{mp}), le courant commence à chuter brutalement. Lorsqu'on atteint la tension de circuit ouvert ($V_{oc} \approx 16.2$ V), le courant devient quasiment nul. Ce comportement reflète le fait qu'un panneau photovoltaïque peut délivrer un courant constant tant que la tension reste dans une plage modérée, mais devient incapable de fournir du courant lorsque la tension est trop élevée, en raison de la conduction de la diode interne du modèle.

➤ Courbe P-V (Puissance en fonction de la tension) :

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

La courbe P-V (puissance en fonction de la tension) montre une montée progressive de la puissance jusqu'à un maximum d'environ 76 W, atteint autour de 13.5 V. Au-delà de cette tension, bien que la tension continue d'augmenter, la puissance chute rapidement. Cette chute est directement liée à la diminution rapide du courant : comme la puissance est le produit de la tension et du courant ($P = V \times I$), une baisse importante du courant entraîne une baisse globale de la puissance. Ce point de puissance maximale correspond au meilleur point de fonctionnement du panneau, connu sous le nom de MPP (Maximum Power Point), et constitue la référence clé que doit suivre l'émulateur pour reproduire fidèlement le comportement du panneau réel.

Code MATLAB Dow Chemical 13 w :

```
clc;
clear;
% Constantes
q = 1.602e-19; % Charge électron (C)
k = 1.381e-23; % Constante de Boltzmann (J/K)
T = 298; % Température en Kelvin (25°C)
n = 1.0316; % Facteur d'idéalité
Ns = 5; % Nombre de cellules en série
% Paramètres du panneau Dow chemical DPS-13-1000
Isc = 6.3; % Courant de court-circuit (A)
Voc = 3.2; % Tension de circuit ouvert (V)
Vmp = 2.4; % Tension à Pmax (V)
Imp = 5.5; % Courant à Pmax (A)
Rs = 0.077469; % Résistance série (Ohm)
Rsh = 5.1199; % Résistance shunt (Ohm)
Iph = Isc; % Hypothèse : Iph ? Isc
% Calcul du courant de saturation I0
Vt = n * Ns * k * T / q; % Tension thermique
I0 = Isc / (exp(Voc / Vt) - 1);
% Plage de tensions à balayer
V = linspace(0, Voc, 100);
I = zeros(size(V));
% Nouvelle méthode : recherche par pas
for idx = 1:length(V)
    Vd = V(idx);
    Rload = Vd / (Isc + 1e-6); % estimation charge (si Iout ? Isc)
    Igues = 0;
    step = 0.01*Iph;

    for iter = 1:1000
        f = Iph - I0 * (exp((Vd + Igues * Rs) / Vt) - 1) ...
            - (Vd + Igues * Rs)/Rsh;

        I_model = max(f, 0);

        % Condition d'arrêt : I_model ? Igues
        if abs(I_model - Igues) < 1e-2
```

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

```
break;
end

% Ajuster Iguess vers I_model
if I_model > Iguess
    Iguess = Iguess + step;
else
    Iguess = Iguess - step;
end
end

I(idx) = I_model; % On enregistre le courant estimé
end

% Tracé de la courbe I-V
figure;
plot(V, I, 'b', 'LineWidth', 2);
xlabel('Tension (V)');
ylabel('Courant (A)');
title(' Courbe I-V du panneau Dow chemical DPS-13-1000');
grid on;

% Tracé de la courbe P-V
P = V .* I;
figure;
plot(V, P, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Tension (V)');
ylabel('Puissance (W)');
title(' Courbe P-V du panneau Dow chemical DPS-13-1000');
grid on;
```

Code MATLAB Sunpower :

```
clc;
clear all;
% Constantes
q = 1.602e-19;% Charge électron (C)
k = 1.381e-23;% Constante de Boltzmann (J/K)
T = 298;% Température en Kelvin (25°C)
n = 1.1181;% Facteur d'idéalité
Ns = 24;% Nombre de cellules en série

% Paramètres du panneau SunPower SPR-76R-BLK-U
Isc = 6.02;      % Courant de court-circuit (A)
Voc = 16.2;      % Tension de circuit ouvert (V)
Vmp = 13.5;      % Tension à Pmax (V)
Imp = 5.65;      % Courant à Pmax (A)
Rs = 0.11329;    % Résistance série (Ohm)
Rsh = 190.3046;  % Résistance shunt (Ohm)
Iph = 6.0236;    % Courant généré par la lumière ? IL

% Calcul du courant de saturation I0
Vt = n * Ns * k * T / q; % Tension thermique
I0 = 3.7057e-10; % Courant de saturation donné
```

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

```
% Plage de tensions à balayer
V = linspace(0, Voc, 100);
I = zeros(size(V));
% Méthode : recherche par pas
for idx = 1:length(V)
    Vd = V(idx);
    Rload = Vd / (Isc + 1e-6); % estimation charge (si Iout ? Isc)
    Iguess = 0;
    step = 0.01*Iph;

    for iter = 1:1000
        f = Iph - I0 * (exp((Vd + Iguess * Rs) / Vt) - 1) ...
            - (Vd + Iguess * Rs)/Rsh;

        I_model = max(f, 0);

        % Condition d'arrêt : I_model ? Iguess
        if abs(I_model - Iguess) < 1e-2
            break;
        end
        % Ajuster Iguess vers I_model
        if I_model > Iguess
            Iguess = Iguess + step;
        else
            Iguess = Iguess - step;
        end
    end
    I(idx) = I_model; % On enregistre le courant estimé
end
% Tracé de la courbe I-V
figure;
plot(V, I, 'b', 'LineWidth', 2)
xlabel('Tension (V)');
ylabel('Courant (A)');
title('Courbe I-V du panneau SunPower SPR-76R-BLK-U');
grid on;
% Tracé de la courbe P-V
P = V .* I;
figure;
plot(V, P, 'r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Tension (V)');
ylabel('Puissance (W)');
title('Courbe P-V du panneau SunPower SPR-76R-BLK-U');
grid on;
```

Code Function MATLAB :

```
function [D, Ift, Vft] = fcn(Ipv, Vpv)
    Dinit = 0.2;
    Dmax = 0.9;
    Dmin = 0.01;
    DeltaD = 20e-6;
```

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

```
N = 16; % Longueur du filtre FIR
H = [ -0.0039 -0.0001 0.0104 0.0324 0.0652 0.1034 0.1375 0.1577 ...
      0.1577 0.1375 0.1034 0.0652 0.0324 0.0104 -0.0001 -0.0039 ];
```

```
Mv = zeros(1, N); % Multiplications pour Vpv
Mi = zeros(1, N); % Multiplications pour Ipv
Vft=0;
Ift=0;
```

```
persistent Vold Iold Dold Dv Di;
if isempty(Vold)
    Vold = 0;
    Iold = 0;
    Dold = Dinit;
    Dv = zeros(1, N-1);
    Di = zeros(1, N-1);
end
```

```
% Numérisation
```

```
svp = sign(Vpv);
sip = sign(Ipv);
avp = abs(Vpv);
aip = abs(Ipv);
V1 = avp * (2^6);
I1 = aip * (2^9);
V2 = svp * (2^-6) * floor(V1);
I2 = sip * (2^-9) * floor(I1);
Vpv = V2;
Ipv = I2;
```

```
% ***** Filtrage FIR de Vpv *****
```

```
for i = N-2:-1:1
    Dv(i+1) = Dv(i);
    Mv(i+2) = Dv(i+1) * H(i+2);
end
Dv(1) = Vold;
Mv(2) = Dv(1) * H(2);
Mv(1) = Vpv * H(1);
Vft = sum(Mv);
```

```
% ***** Filtrage FIR de Ipv *****
```

```
for i = N-2:-1:1
    Di(i+1) = Di(i);
    Mi(i+2) = Di(i+1) * H(i+2);
end
Di(1) = Iold;
Mi(2) = Di(1) * H(2);
Mi(1) = Ipv * H(1);
Ift = sum(Mi);
```

```
% ***** Calcul de I_calculée via le modèle PV *****
```

```
% -> À adapter selon ton modèle et les valeurs des paramètres
```

```
% Exemple paramétrique typique (à personnaliser) :
```

```
Iph = 6.02; % courant photo-généré
I0 = 1e-10; % courant de saturation inverse
Rs = 0.25; % résistance série
Rsh = 100; % résistance shunt
```

CHAPITRE 2 : SYNTHÈSE ET SIMULATION

```
Vt = 0.026; % tension thermique (kT/q)

f = Iph - I0 * (exp((Vft + Ift * Rs) / Vt) - 1) - (Vft + Ift * Rs)/Rsh;
I_calculée = max(f, 0); % pour éviter les valeurs négatives

% ***** Ajustement du rapport cyclique D *****
if abs(I_calculée - Ift) < 1e-2

end
if I_calculée > Ift
    D = Dold - DeltaD;
else
    D = Dold + DeltaD;
end

% Limiter D entre Dmin et Dmax
if D >= Dmax
    D = Dmax;
elseif D <= Dmin
    D = Dmin;
end

% *****
Dold = D;
Vold = Vpv;
Iold = Ipv;
End
```

2.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble des étapes nécessaires à la conception et à la simulation d'un émulateur de panneau solaire. Nous avons tout d'abord introduit l'architecture globale du système, illustrée par un schéma synoptique, puis détaillé sa mise en œuvre sur MATLAB/Simulink.

La modélisation numérique du panneau solaire a été réalisée à l'aide de la méthode de Newton-Raphson, permettant une estimation précise du courant en fonction de la tension. Deux panneaux solaires ont été étudiés : le Dow Chemical (13 W) et le SunPower (76.275 W), ce qui a permis d'observer leurs comportements respectifs et de valider la robustesse de la méthode utilisée.

Enfin, les convertisseurs abaisseur (Buck) et élévateur (Boost) ont été intégrés au système, accompagnés d'un contrôleur PWM pour ajuster dynamiquement la tension de sortie. Cette approche offre une base fiable pour reproduire le comportement électrique d'un panneau solaire réel à travers un émulateur piloté par logiciel.

**CHAPITRE 3 : REALISATION DE
L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE**

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la mise en œuvre matérielle et logicielle du système d'émulation photovoltaïque. Il décrit les différentes étapes de la réalisation du montage, les circuits développés, ainsi que les composants électroniques utilisés. On y présente notamment l'implémentation du contrôle PWM par l'ESP32, les convertisseurs DC-DC, les circuits d'adaptation et de mesure de tension et de courant, ainsi que les charges appliquées au système. Cette section détaille également l'intégration des différentes parties du circuit en vue d'une émulation réaliste du comportement d'un panneau solaire.

3.2 Étapes de réalisation et d'implémentation

Cette section présente les différentes étapes de conception, de réalisation et d'implémentation du système. Elle décrit les choix techniques effectués ainsi que les composants matériels utilisés pour garantir le bon fonctionnement et la performance globale du projet. Les éléments principaux intégrés dans le montage sont les suivants :

3.2.1 ESP32-WROOM-32 Development Board – DevKit v1 (38 pins)

- **Description technique de la carte ESP32-WROOM-32 DevKit v1 (38 broches)**

La carte de développement ESP32-WROOM-32 – DevKit v1 (38 pins) est basée sur le module ESP32-WROOM-32 conçu par Espressif Systems. Elle intègre une connectivité Wi-Fi 802.11 b/g/n et Bluetooth 4.2 (classique + BLE) fonctionnant sur la bande 2,4 GHz. Cette carte dispose d'une antenne PCB intégrée, d'un balun RF, d'un amplificateur de puissance (PA), d'un amplificateur à faible bruit (LNA), de filtres RF et d'un système de gestion d'alimentation intégré, permettant une grande compacité et efficacité énergétique sur le circuit imprimé. Conçue selon le procédé TSMC 40 nm low-power technology, elle offre une faible consommation énergétique tout en maintenant de hautes performances radiofréquence (RF), ce qui la rend adaptée aux applications embarquées, IoT, automates, systèmes de capteurs, et autres projets connectés. L'ESP32 dispose de 16 canaux PWM indépendants, configurables individuellement pour générer des signaux PWM avec des fréquences, rapports cycliques (duty cycle), et broches de sortie spécifiques. Tous les GPIOs (General Purpose Input/Output) configurés en sortie peuvent émettre un signal PWM, à l'exception des GPIOs 34 à 39, qui sont en lecture seule (entrée uniquement).

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Les caractéristiques techniques de la carte sont les suivantes : alimentation de 5VDC via USB, tension d'entrée de 7 à 12V (broche VIN), tension de sortie régulée de 3,3V, courant requis minimum de 250 mA, mémoire RAM de 520 Ko, mémoire flash SPI externe de 4 Mo, 20 broches numériques utilisables et 6 broches analogiques configurables en entrées.[16]

Tableau 3.1. Caractéristiques techniques – ESP32-WROOM-32 DevKit v1

Caractéristique	Valeur
Type de carte	ESP32-WROOM-32 – DevKit v1 (38 broches)
Microcontrôleur	Espressif ESP32 (dual-core Xtensa LX6)
Fréquence d'horloge	Jusqu'à 240 MHz
Mémoire RAM	520 Ko SRAM interne
Mémoire Flash	4 Mo SPI externe
Tension d'alimentation	5V via USB ou 7–12V via broche VIN
Tension de sortie	3,3V régulée via AMS1117 ou équivalent
Courant requis	≥ 250 mA
Nombre total de GPIOs	Jusqu'à 34 (20 numériques + 6–18 analogiques)
Canaux PWM	16 indépendants
Interfaces disponibles	UART, SPI, I2C, I2S, CAN, Ethernet (via PHY)
Connectivité sans fil	Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2 + BLE
Température de fonctionnement	-40 °C à +85 °C
Antenne	Antenne PCB intégrée
Interface USB-série	CP2102 ou CH340 (selon modèle)

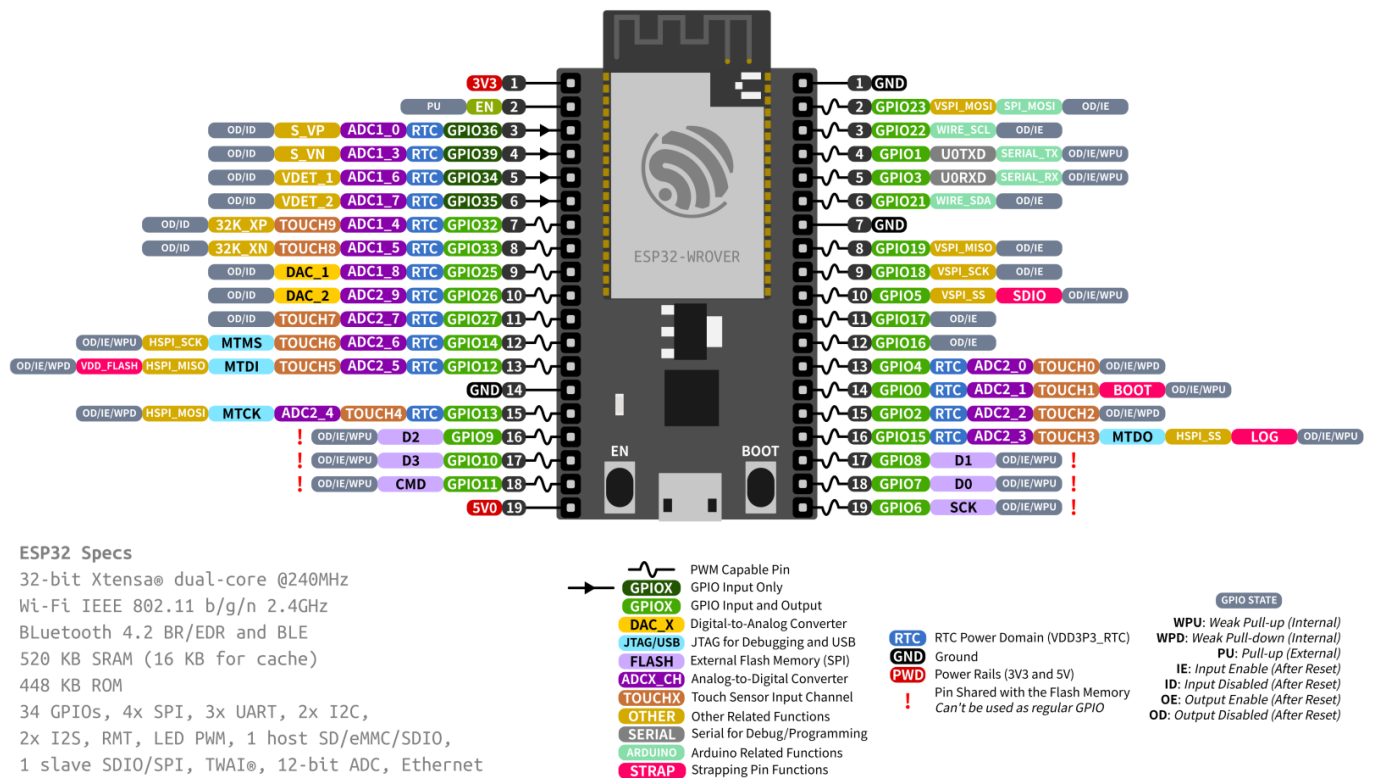


Figure 3.1. Description de la carte ESP32.

3.2.2 Convertisseur DC-DC Buck SZBK07

Le convertisseur abaisseur de tension (Buck) SZBK07 est un module de conversion DC-DC à haut rendement, permettant de réduire une tension continue d'entrée vers une tension de sortie plus faible de manière efficace et stable. Ce convertisseur utilise une topologie à découpage, combinant un MOSFET de puissance, une bobine (self), une diode de roue libre, ainsi que des condensateurs de filtrage pour assurer la stabilité de la tension.

Le fonctionnement repose sur une modulation de largeur d'impulsion (PWM) contrôlée automatiquement par un circuit intégré de régulation. Lorsque le MOSFET est fermé, l'énergie est transmise vers l'inductance et la charge. Une fois le MOSFET ouvert, la diode permet la circulation continue du courant, maintenant ainsi l'alimentation de la charge. Deux potentiomètres permettent le réglage fin de la tension (CV) et du courant (CC),

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

rendant le module adapté aux applications à courant constant comme la charge de batteries ou l'alimentation de LED haute puissance.

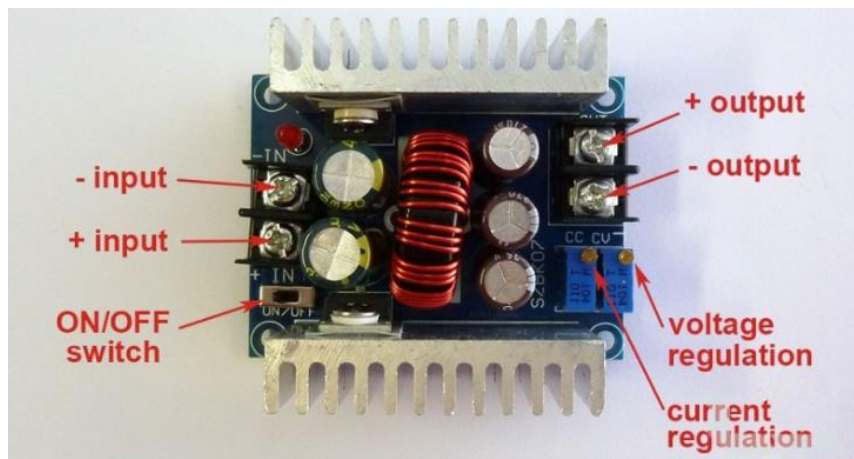


Figure 3.2. Schéma de câblage et d'identification des bornes du module Buck SZBK07.

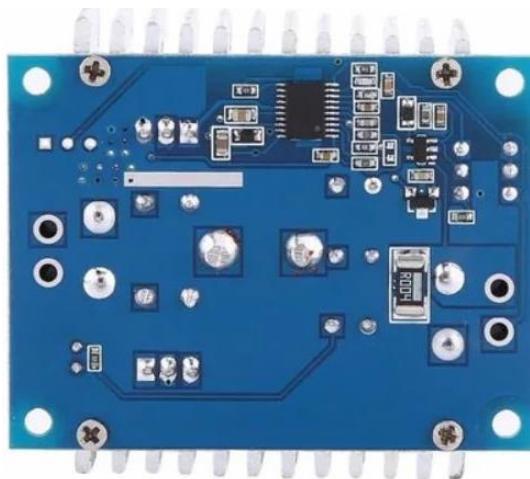


Figure 3.3. Vue arrière du module convertisseur abaisseur DC-DC (Buck) SZBK07.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Tableau 3.2. Caractéristiques techniques du module SZBK07.

Caractéristiques	Valeurs / Descriptions
Plage de tension d'entrée	6V – 40V DC
Plage de tension de sortie	1.2V – 36V DC (réglable)
Courant de sortie max.	Jusqu'à 20 A (refroidissement nécessaire >15 A)
Puissance de sortie max.	Jusqu'à 300 W
Fréquence de commutation	150 kHz – 180 kHz
Efficacité maximale	Jusqu'à 95%
Modes de fonctionnement	CC (Courant constant), CV (Tension constante)
Régulation de sortie	Via deux potentiomètres (CV et CC)
Protection	Surcharge, surchauffe, court-circuit
Température de fonctionnement	-40 °C à +85 °C
Dimensions	Environ 61 mm x 36 mm x 18 mm
Refroidissement	Dissipateurs en aluminium, ventilateur externe recommandé

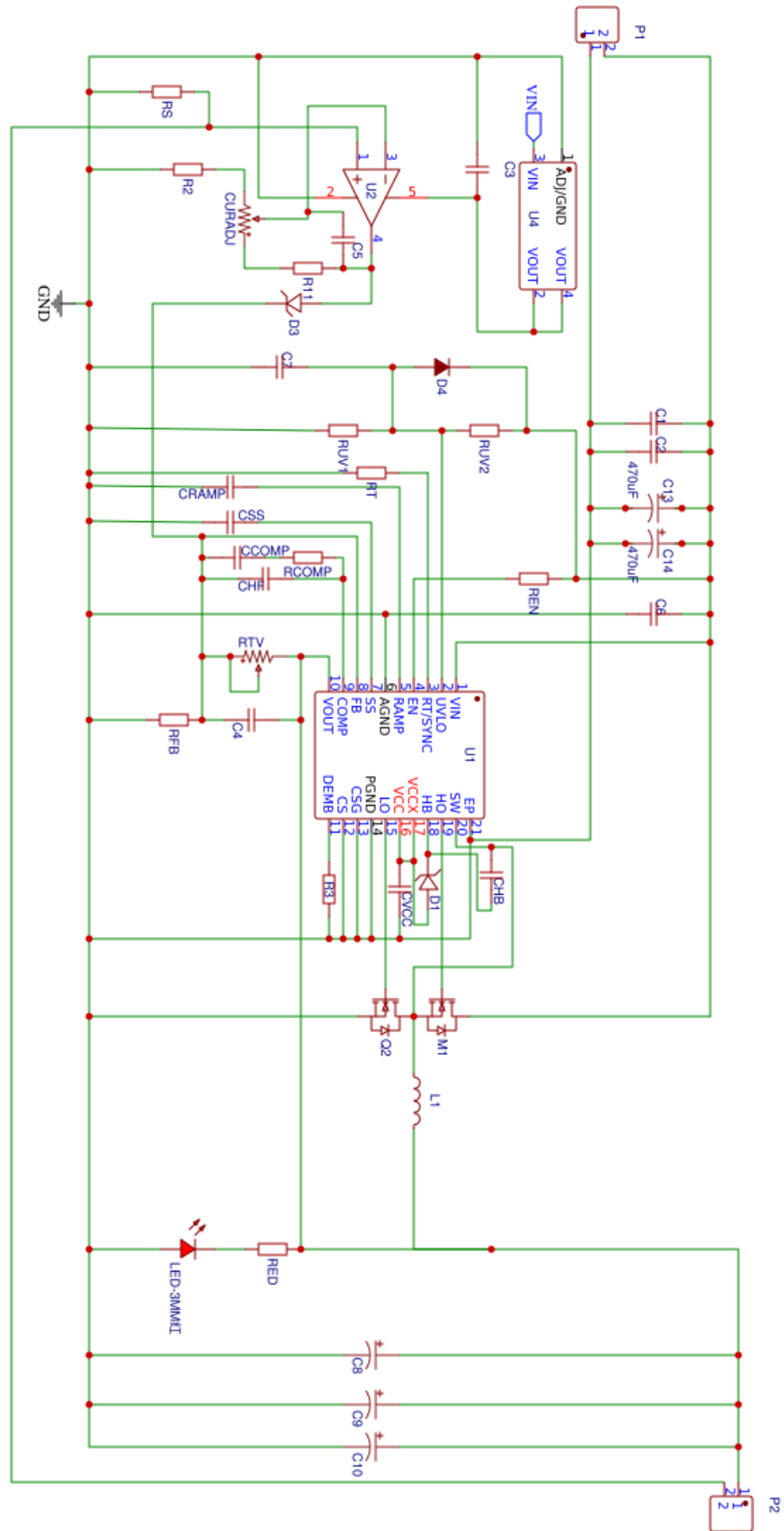


Figure 3.4. Schéma fonctionnel du convertisseur buck SZBK07.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Tableau 3.3. Connexions et fonctions des bornes.

Nom de la borne	Position sur le module	Fonction
+ IN	Entrée gauche (haut du module)	Connexion à la borne positive de la source DC
- IN	Entrée gauche	Connexion à la borne négative de la source DC
+ OUT	Sortie droite	Borne positive de la tension régulée de sortie
- OUT	Sortie droite	Borne négative de la tension de sortie
ON/OFF switch	Bouton poussoir gauche	Active ou désactive manuellement la sortie
CV (Voltage Reg.)	Potentiomètre bleu droit	Permet de régler manuellement la tension de sortie
CC (Current Reg.)	Potentiomètre bleu droit	Permet de régler manuellement le courant de sortie

3.2.3 Transition d'un convertisseur DC-DC à tension fixe vers un convertisseur à tension variable

La conversion d'un régulateur DC-DC à sortie fixe vers un modèle à sortie variable nécessite certaines modifications dans la conception du circuit. Cela permet d'introduire une régulation dynamique de la tension de sortie à l'aide de composants ajustables et de dispositifs de contrôle appropriés.

Un convertisseur DC-DC à sortie fixe délivre une tension constante, quelle que soit la variation de la charge ou de la tension d'entrée. Sa configuration repose généralement sur un réseau de résistances fixes, formant un pont diviseur déterminant précisément la valeur de la tension de sortie.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Dans le cas de notre réalisation, utilisant un régulateur SZBK07, la tension de sortie est déterminée par un rapport de résistances (R_{VT} et R_{FB}) relié à la broche de rétroaction du composant, comme illustré dans la figure suivante :

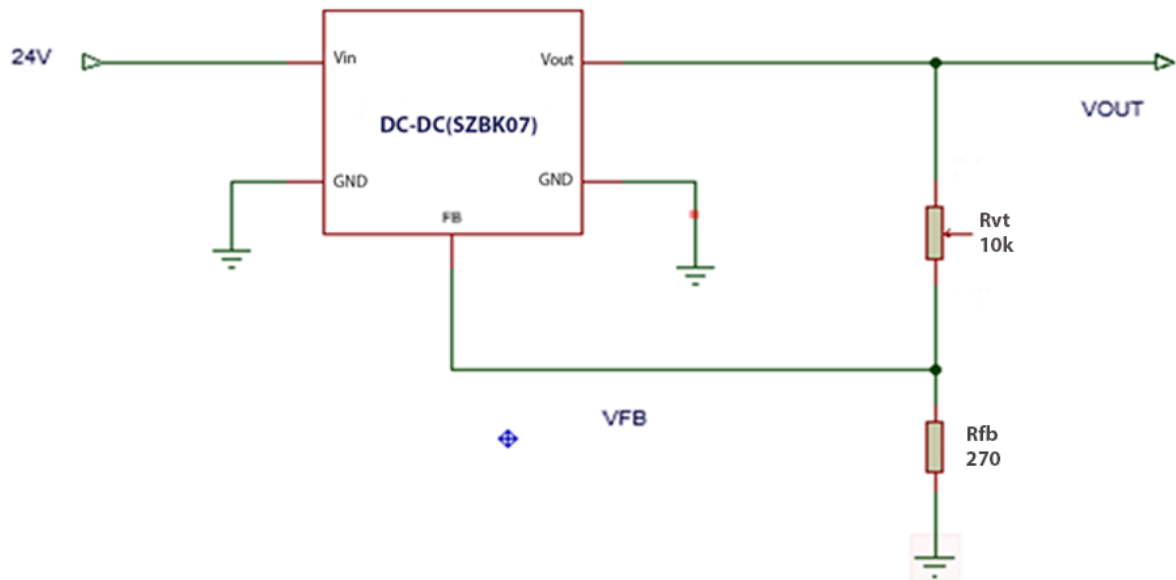


Figure 3.5. Schéma simplifié du convertisseur SZBK07 dans le cas fixe.

Dans ce schéma (convertisseur fixe) on a :

- **DC-DC Converter** : Le module de conversion de tension DC-DC.
- **R_{VT} et R_{FB}** : Deux résistances connectées en diviseur de tension.
- **FB (Feedback)** : La broche de rétroaction qui reçoit une fraction de la tension de sortie V_{out} à travers le diviseur de tension formé par R_1 et R_2 .
- **V_{out}** : La tension de sortie du convertisseur est déterminée par les valeurs des résistances R_1 et R_2 selon la formule :

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_{VT}}{R_{FB}} \right) \quad (1)$$

Où $V_{ref} = 1.25V$ est la tension de référence interne du module DC-DC.

Dans notre réalisation pratique le convertisseur buck SZBK07 fournit une tension constante, ce qui peut limiter son utilisation à des appareils nécessitant cette tension spécifique. Donc, en le rendant variable pour on peut alimenter une variété d'appareils avec des exigences de tension différentes.

Pour rendre le convertisseur variable, nous avons suivi les étapes suivantes :

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

- **Fixation de R_{VT}** : Ajustez la résistance variable R_{VT} à une valeur fixe (3.85k Ω) pour établir une base de tension de sortie initiale.
- **Ajout de R_3** : Introduisez une résistance R_3 (1k Ω) pour former un nouveau diviseur de tension avec R_{VT} et R_{FB} .
- **Signal V-PWM** : Appliquez un signal PWM (venant à partir de circuit d'adaptation) à ce nouveau diviseur pour ajuster dynamiquement la tension de sortie. Le signal PWM modifie la tension de rétroaction (VFB), ce qui permet de varier la tension de sortie V_{out} .

La tension de sortie V_{out} peut être ajustée et calculée en utilisant la formule modifiée :

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_{VT}}{R_{FB}}\right) + (V_{ref} - V_{fb}) \frac{R_{VT}}{R_3} \quad (2)$$

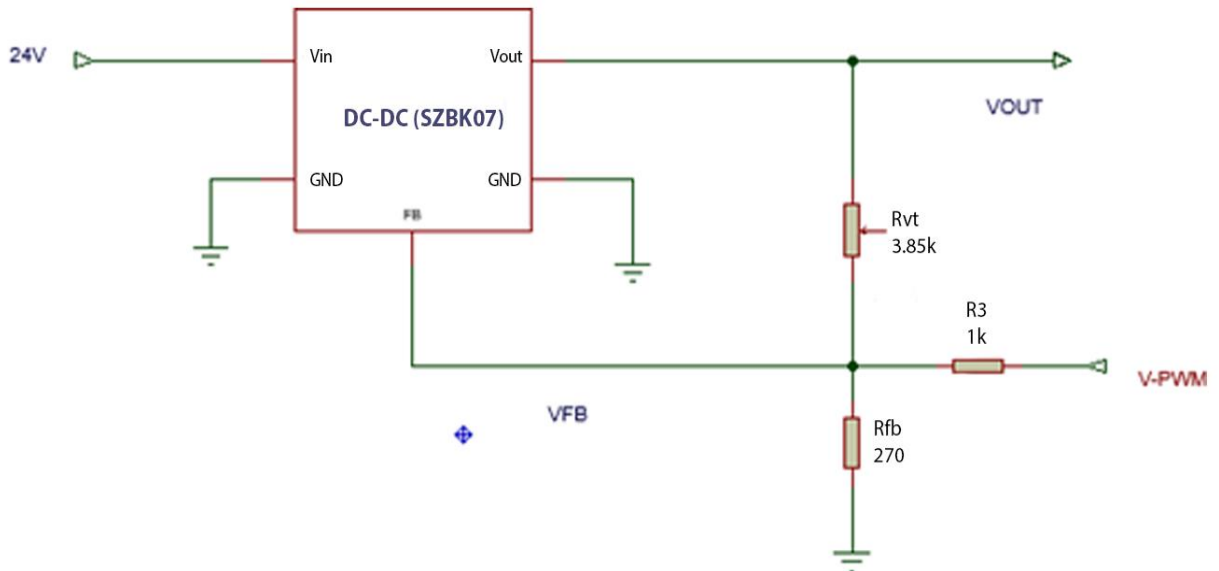


Figure 3.6. Schéma simplifié du convertisseur SZBK07 dans le cas variable.

Le graphique ci-dessous illustre la relation entre la tension de rétroaction (V_{fb}) et la tension de sortie (V_{out}) d'un convertisseur buck de type SZBK07. Les mesures expérimentales sont indiquées par des marqueurs triangulaires bleus, tandis que les valeurs théoriques sont représentées par une courbe rouge.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

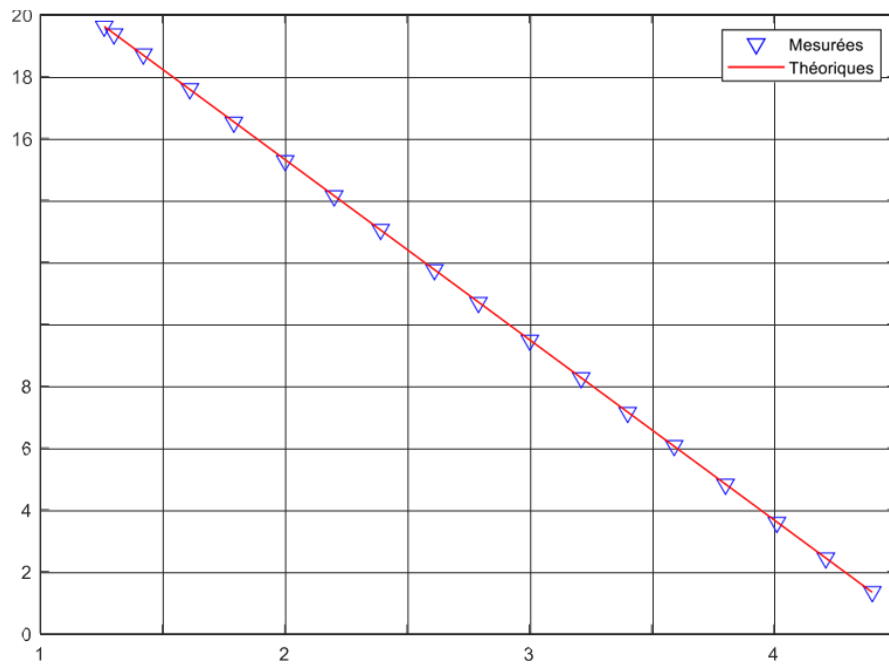


Figure 3.7. Relation entre V_{fb} et V_{out} .

Le graphique met en évidence une bonne concordance entre les valeurs mesurées et les valeurs théoriques. Les points expérimentaux suivent de près la courbe prédite, ce qui témoigne de la justesse du modèle utilisé.

On observe une relation inverse entre la tension de sortie (V_{out}) et la tension de rétroaction (V_{fb}) : à mesure que V_{fb} augmente, V_{out} diminue. Ce comportement est caractéristique de nombreux régulateurs de tension.

Ainsi, le graphe confirme la validité du modèle théorique appliqué pour estimer V_{out} en fonction de V_{fb} . La proximité entre les données expérimentales et les valeurs calculées valide l'exactitude de la formule employée dans le cadre de ce convertisseur DC-DC à sortie variable.

3.2.4 Circuit Adaptation DC-DC Et De Mesure

❖ Adaptation de Convertisseur DC-DC

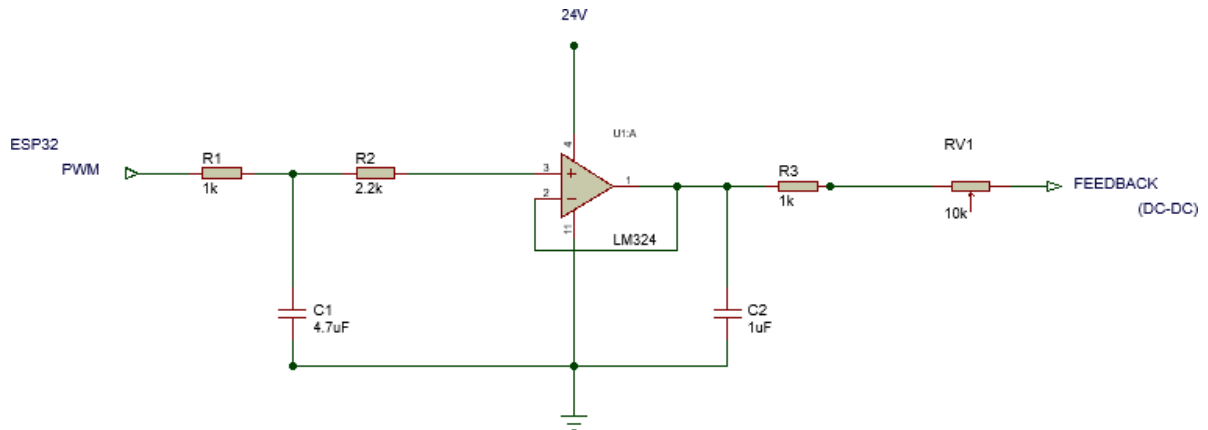


Figure 3.8. Circuit d'adaptation de convertisseur DC-DC.

Ce circuit permet une régulation précise et efficace de la tension de sortie du convertisseur DC-DC, en utilisant un signal PWM comme commande principale et en tirant parti des propriétés combinées de composants passifs et actifs pour garantir la stabilité et la fiabilité du système dans différentes conditions de fonctionnement. Chaque étape joue un rôle essentiel dans le processus global :

- **Génération du signal PWM**

Le microcontrôleur ESP32 génère un signal PWM sous forme d'onde carrée dont le rapport cyclique est variable. Ce signal permet de moduler la puissance transmise au convertisseur DC-DC. Le rapport cyclique détermine la valeur moyenne de la tension appliquée à l'étage suivant.

- **Mise à l'échelle et filtrage du signal PWM**

Le signal PWM est d'abord atténué par un diviseur de tension constitué des résistances R1 (1 k Ω) et R2 (2,2 k Ω), ce qui permet d'adapter le niveau de tension. Ensuite, le condensateur C1 (4,7 μ F) agit comme un filtre passe-bas, supprimant les composantes à haute fréquence pour fournir une tension continue plus stable.

- **Traitement par l'amplificateur opérationnel LM324**

La tension filtrée est appliquée à l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur opérationnel, configuré en suiveur de tension (buffer). Dans cette configuration, l'entrée inverseuse est reliée à la sortie, ce qui permet à la sortie de reproduire fidèlement la tension d'entrée, tout en offrant une faible impédance de sortie et une grande précision.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

La sortie de l'amplificateur opérationnel fournit un signal de commande stable destiné au convertisseur DC-DC.

- **Rétroaction et stabilisation**

Ce signal traverse la résistance R3 (1 k Ω) et le potentiomètre RV1 (10 k Ω) avant d'être appliqué à la broche de rétroaction (FB) du convertisseur. Le condensateur C2 (1 μ F) agit comme un filtre supplémentaire pour lisser le signal et atténuer les éventuelles interférences haute fréquence. La tension sur la broche FB est continuellement surveillée afin de permettre des ajustements dynamiques du signal PWM, en fonction de l'évolution de la tension de sortie.

- **Réglage du contrôle de rétroaction**

Le potentiomètre RV1 permet d'ajuster finement la rétroaction dans la boucle de régulation. En modifiant sa position, il devient possible de contrôler avec précision le niveau de rétroaction appliqué, ce qui contribue à maintenir une tension de sortie stable, même en cas de variations de la charge ou de la tension d'entrée.

- **Fonctionnement du contrôle du convertisseur**

Le convertisseur DC-DC adapte sa tension de sortie en fonction du signal de commande délivré par l'amplificateur opérationnel. Lorsque la tension de sortie s'écarte de la valeur cible, la boucle de rétroaction détecte cette variation et transmet l'information au circuit de commande, qui ajuste alors le rapport cyclique du signal PWM pour rétablir la tension de sortie souhaitée.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

❖ Circuit de Mesure de tension pour la charge (Vch)

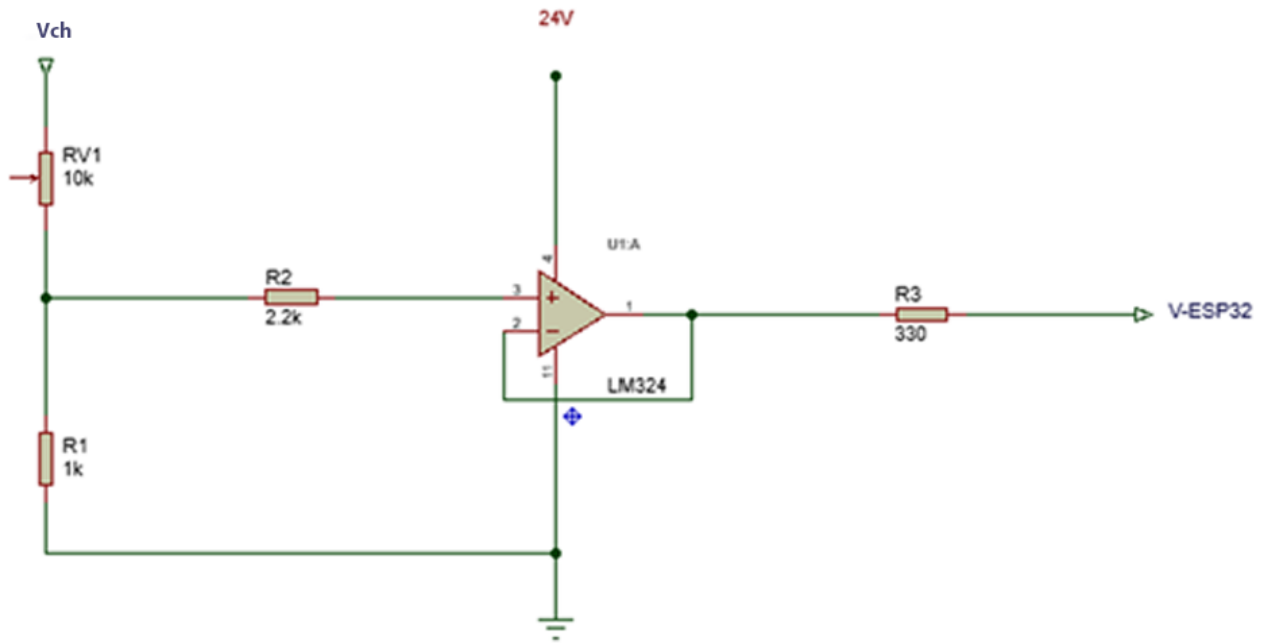


Figure 3.9. Circuit de Mesure de Tension (Vch).

Le circuit de mesure de la tension au borne de la charge (Vch) repose sur plusieurs composants essentiels qui assurent une lecture fiable et adaptée à l'entrée analogique de l'ESP32. Chaque étape du circuit contribue à la précision et à la stabilité du signal mesuré :

Entrée de la tension (Vch)

La tension Vch varie en fonction de la charge. Elle est appliquée à un diviseur de tension composé du potentiomètre RV1 (10 k Ω) et de la résistance R1 (1 k Ω).

Division de la tension

Le réseau RV1–R1 réduit la tension Vch à un niveau compatible avec l'entrée analogique de l'amplificateur opérationnel LM324. Le potentiomètre RV1 permet un réglage précis, assurant une adaptation correcte à la plage de mesure de l'ESP32.

Amplification

La tension divisée est appliquée à l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur LM324, configuré en amplificateur non-inverseur. Le gain est défini par le rapport entre les résistances R2 (2,2 k Ω) et R1, fournissant ainsi une version amplifiée de la tension mesurée.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Calibration fine

La résistance R3 limite le courant vers l'entrée analogique de l'ESP32, protégeant celle-ci contre d'éventuelles surcharges. Le potentiomètre RV1 permet également d'ajuster avec précision la tension d'entrée de l'amplificateur, garantissant que la sortie reste dans la plage optimale de lecture de l'ESP32.

Sortie vers l'ESP32

La tension finale, calibrée et amplifiée, est transmise à l'ESP32 pour un suivi en temps réel. Cela permet au microcontrôleur de surveiller les performances de la charge.

❖ Circuit de Mesure de Courant pour la charge (Ich)

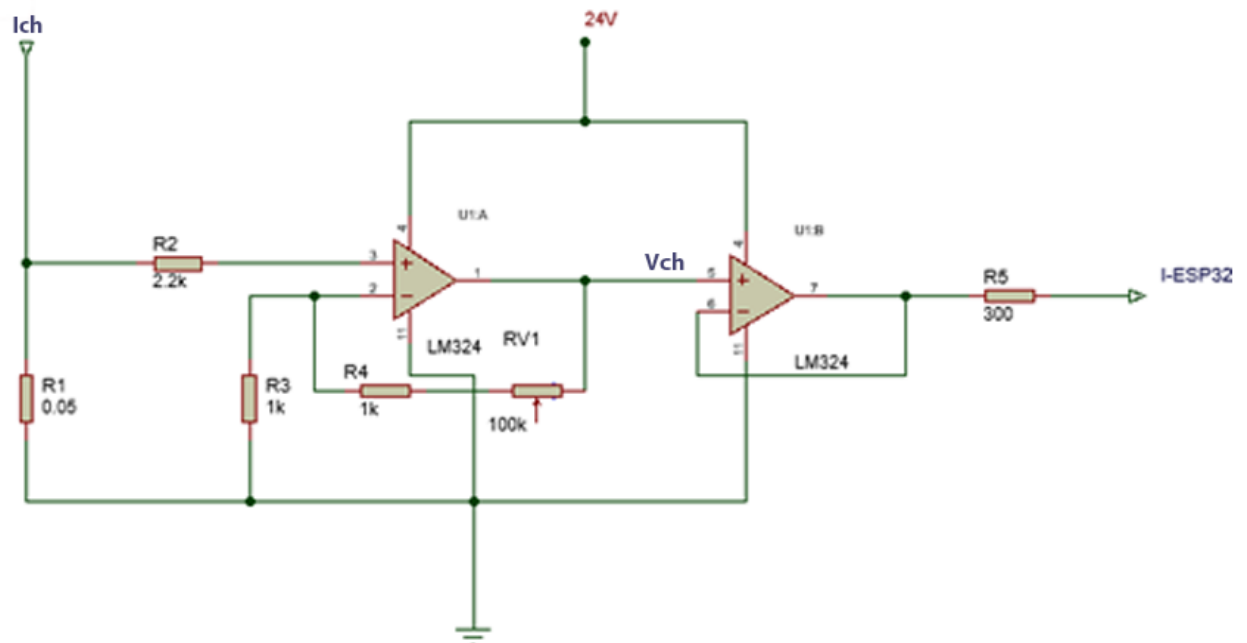


Figure 3.10. Circuit de Mesure de Courant (I_{ch}).

Le circuit de mesure du courant pour la charge (I_{ch}) repose sur plusieurs composants essentiels permettant une conversion précise du courant en une tension exploitable, adaptée à la lecture par l'ESP32. Chaque étape du montage contribue à garantir la fiabilité de la mesure :

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

- **Résistance shunt (R1)**

La résistance R1 ($0,05 \Omega$) est insérée en série avec le circuit de sortie de la charge. Elle permet de convertir le courant circulant en une tension proportionnelle, selon la loi d'Ohm ($V = I \times R$).

- **Première étape d'amplification (U1)**

La faible tension générée aux bornes de la résistance shunt est appliquée à l'entrée non-inverseuse (borne 3) de l'amplificateur opérationnel U1. Celui-ci amplifie la tension en fonction du réseau de rétroaction composé des résistances R2, R3, R4 et du potentiomètre RV2. Ce dernier permet d'ajuster finement le gain de l'amplificateur pour obtenir une tension de sortie compatible avec la plage d'entrée de l'ESP32.

- **Deuxième étape d'amplification (U2)**

La tension amplifiée est ensuite dirigée vers l'entrée non-inverseuse de l'amplificateur opérationnel U2, configuré en suiveur de tension. Cette configuration assure une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible, permettant de transférer la tension de manière précise vers l'entrée analogique de l'ESP32, sans déformation ni perte de signal.

- **Ajustement fin avec RV1**

Le potentiomètre RV1 permet de régler précisément le gain de l'amplificateur U1A, afin d'optimiser la tension de sortie en fonction de la plage de mesure de l'ESP32. Ce réglage assure un calibrage précis du circuit pour garantir des performances de mesure optimales.

- **Protection de l'entrée avec R5**

La résistance R5 (300Ω) est placée entre la sortie de l'amplificateur U2 et l'entrée analogique de l'ESP32. Elle limite le courant entrant, protégeant ainsi le microcontrôleur contre les éventuelles surcharges ou pics de tension.

- **Lecture du courant par l'ESP32**

L'ESP32 reçoit une tension amplifiée et stabilisée en provenance de l'amplificateur U2. Cette tension est proportionnelle au courant au borne de la charge (I_{ch}). Le microcontrôleur exploite cette information pour surveiller en temps réel l'intensité générée et adapter le fonctionnement du système en conséquence.

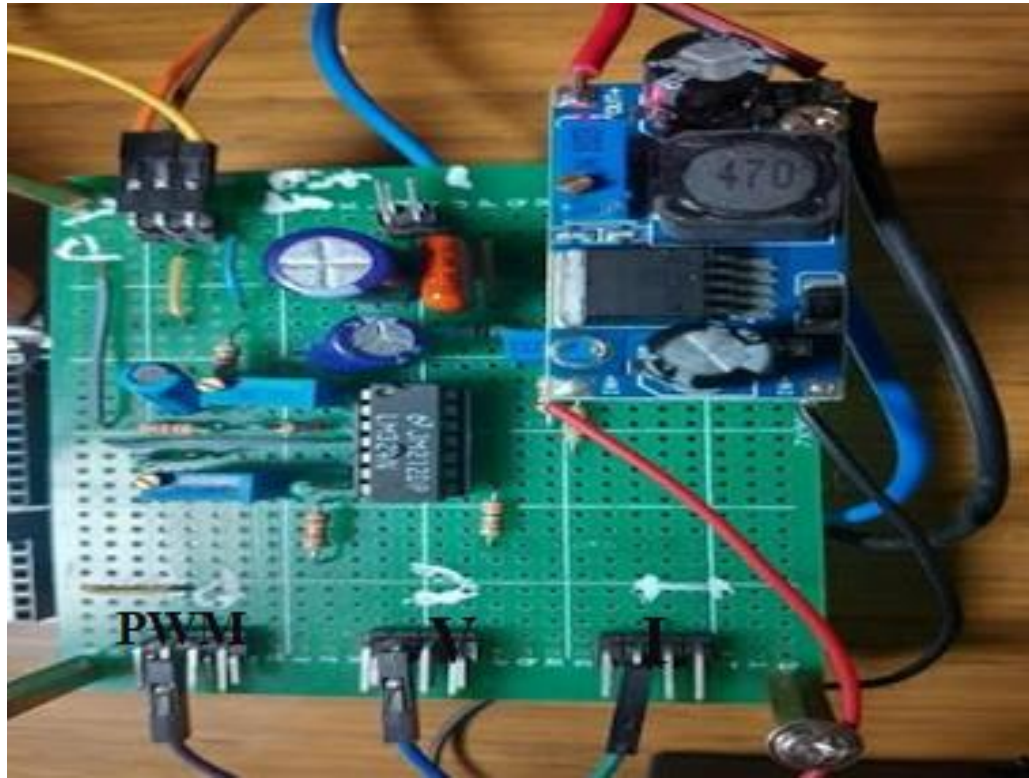


Figure 3.11. Circuit final d'adaptation et de mesure courant et tension avec régulateur de tension.

3.2.5 L'alimentation ATX JJ-PSU450

L'alimentation ATX JJ-PSU450 de marque SmartPower est un bloc d'alimentation destiné aux ordinateurs compatibles ATX12V 2.2. Elle convertit la tension alternative secteur (AC 200V–240V) en plusieurs tensions continues stabilisées (DC), nécessaires au fonctionnement des différents composants d'un ordinateur, tels que la carte mère, le processeur, les disques durs, et les périphériques d'extension. Elle intègre également des protections contre les surtensions, les surintensités, et les courts-circuits.

L'unité comprend un ventilateur pour le refroidissement, ainsi qu'un ensemble de connecteurs standards ATX, SATA et Molex. Les tensions fournies suivent les spécifications ATX : +3.3V, +5V, +12V, -5V, -12V et +5Vsb, avec des intensités maximales variables.

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE



Figure 3.12. L'alimentation ATX JJ-PSU450.

Tableau 3.4. Caractéristiques techniques de l'alimentation JJ-PSU450.

Caractéristiques	Valeurs / Descriptions
Tension d'entrée AC	200V – 240V AC ~ 3A, 50–60Hz
Compatibilité	ATX12V 2.2
Puissance totale	450 Watts
Sorties DC	+3.3V / +5V / +12V / -5V / -12V / +5Vsb
Courant max +3.3V	30 A
Courant max +5V	28 A
Courant max +12V	10 A
Courant max -5V	0.5 A
Courant max -12V	1 A
Courant max +5Vsb	2.5 A
Connecteurs disponibles	ATX 24-pin, SATA, Molex, 4-pin CPU
Refroidissement	Ventilateur à contrôle thermique

CHAPITRE 3 : REALISATION DE L'ÉMULATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

3.2.6 Charge du système

La charge utilisée dans notre montage est une charge purement résistive composée de deux résistances céramiques de puissance de 10 W – 5 Ω chacune. Ces résistances sont connectées en parallèle afin de former une charge équivalente de 2,5 Ω , capable de dissiper jusqu'à 20 W en régime permanent. Ce choix a été motivé par la simplicité du comportement ohmique de ce type de charge, ce qui permet une analyse claire et directe des grandeurs électriques (tension, courant) mesurées en sortie du convertisseur. Cette configuration assure également une bonne stabilité thermique et une compatibilité avec les niveaux de puissance délivrés par le système.

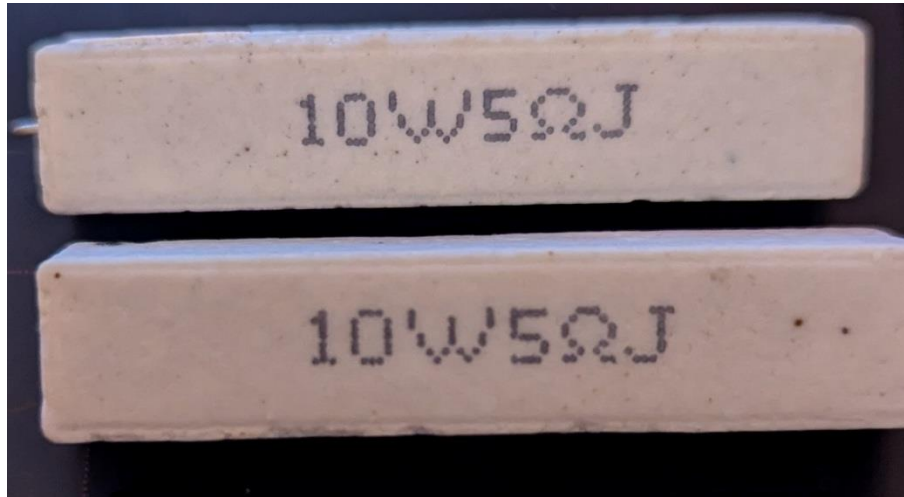


Figure 3.13. Charge résistive du système.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a porté sur la réalisation pratique de notre émulateur de panneau photovoltaïque, mettant en œuvre les choix matériels et logiciels présentés précédemment. À travers l'intégration du microcontrôleur ESP32, du convertisseur DC-DC de type Buck, des circuits de mesure et d'adaptation, nous avons pu concrétiser un système fonctionnel capable de simuler de manière réaliste le comportement électrique d'un panneau solaire.

Les tests réalisés ont démontré la fiabilité du montage et la cohérence des réponses obtenues, aussi bien au niveau des tensions et courants mesurés que de l'évolution dynamique du rapport cyclique PWM. Le système a réagi en temps réel aux variations de charge, validant l'efficacité de l'algorithme de contrôle.

Ainsi, cette phase de réalisation confirme non seulement la validité de notre approche théorique, mais aussi la possibilité de reproduire, avec des moyens accessibles, un générateur photovoltaïque virtuel précis et réactif.

CONCLUSION GENERALE

Face aux défis énergétiques et environnementaux actuels, les énergies renouvelables, et notamment l'énergie solaire photovoltaïque, s'imposent comme des solutions stratégiques incontournables. Néanmoins, la complexité des systèmes photovoltaïques et les contraintes expérimentales liées à leur étude en conditions réelles rendent indispensable le recours à des outils alternatifs de simulation.

Dans ce contexte, notre travail a porté sur la conception et la réalisation d'un émulateur de générateur photovoltaïque capable de reproduire avec fidélité le comportement électrique dynamique d'un panneau solaire réel. En combinant un microcontrôleur ESP32, un convertisseur DC-DC de type Buck et un algorithme numérique basé sur la méthode de Newton-Raphson, nous avons mis en œuvre une solution matérielle et logicielle à la fois simple, flexible et économique.

Les simulations numériques ainsi que les tests expérimentaux ont permis de valider la précision et la réactivité du système. Avec une précision supérieure à 0,1 % sur les grandeurs mesurées, l'émulateur développé démontre non seulement la pertinence du modèle utilisé, mais aussi la faisabilité de solutions accessibles pour la recherche et l'enseignement.

Par sa capacité à fonctionner indépendamment des conditions climatiques, l'émulateur constitue un outil de choix pour le test de stratégies de commande, le développement de régulateurs MPPT, la simulation de scénarios complexes tels que les ombrages partiels, ainsi que pour la formation pédagogique aux systèmes solaires. Il ouvre ainsi la voie à de nombreuses perspectives d'amélioration et d'intégration dans des plateformes intelligentes ou connectées.

En somme, ce projet représente une contribution significative à la modélisation, l'expérimentation et l'innovation dans le domaine des systèmes photovoltaïques, en répondant concrètement aux besoins d'adaptabilité, de précision et de reproductibilité dans un environnement maîtrisé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaïque-comment-ca-marche> (consulté le 05 février 2025).
- [2] Gassoumi, F. et Saadi, A., « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic, » Université Mohamed Khider, Biskra, 2010.
- [3] M. Z. F.Z. Zerhouni, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," Revue des Energies Renouvelables, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.
- [4] "Caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques," [En ligne]. Disponible sur : <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/view.php?id=2448&chapterid=1522>. (Consulté le 09 février 2025).
- [5] ZBOTEK, « Paramètres des cellules solaires et caractéristiques d'une cellule photovoltaïque », ZBOTEK, [En ligne]. Disponible sur : <https://zbotek.com/fr/solar-cell-parameters-and-characteristics-of-a-photovoltaic-cell/>. [Consulté le : 28 février 2025]
- [6] Defallah,D., «TUDE ET CONCEPTION D'UNE CHAÎNE PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉE AU RÉSEAU ET ÉTUDE DE LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE INJECTÉE,» École Nationale Supérieure d'Ingénieurs, Tunis, 2016.
- [7] H. Yatimi, E. Aroudam, et M. Louzazni, « Modeling and Simulation of photovoltaic Module using MATLAB/SIMULINK ». MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, pages 1-5, 2014
- [8] Maria Carmela Di Piazza, Gianpaolo Vitale, "Photovoltaïque source : Modeling and Emulation", Springer-Verlag London 2013.
- [9] Daoudi Ali, « Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque », diplôme d'ingénieur de Constantine, 2010.
- [10] K. Charati and K. Yagouni, "Étude et design d'un émulateur de module PV," Master Thesis, Univ. Ibn Khaldoun, Tiaret, Algeria, 2020. [Online]
- [11] Moussa, I., Khedher, A., & Bouallegue, A. (2019). Design of a Low-Cost PV Emulator Applied for PVECS. Electronics, 8, 232.
- [12] Reference: Moussa, I., & Khedher, A. (2019). Photovoltaic emulator based on PV simulator RT implementation using XSG tools for an FPGA control: Theory and experimentation. International Transactions on Electrical Energy Systems, 12024
- [13].Ecosense. (n.d.). Solar PV Emulator System (SPVE) [Brochure produit]. Ecosense Instruments Pvt. Ltd. Récupéré depuis : <https://www.ecosenseworld.com>
- [14].Lucas-Nuelle. (n.d.). Reproduction de module solaire 1,5 kW, 500 V [Fiche produit]. Récupéré depuis : <https://www.lucas-nuelle.fr/2432/pid/40942/apg/21879/Reproduction-de-module-solaire-1,5-kW,-500-V.htm>
- [15].Keysight Technologies. (2022). MP4300A Series Modular Solar Array Simulator [Fiche technique].

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Récupéré depuis : <https://www.keysight.com/us/en/assets/7018-09552/data-sheets/MP4300A-Modular-Solar-Array-Simulator.pdf>