

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Automatique  
Spécialité : Automatique

Présenté par : HADJIAT Abderrahim  
BEMMERZOUK Lynda

Thème

**Optimisation du transfert d'énergie à  
partir d'un panneau solaire**

Soutenu publiquement, le 02/07/2024 , devant le jury composé de :

Mme A.Ghouali	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
M A.Dali	Docteur	CDER. ALGER	Directeur de mémoire
M B.Charki	Professeur	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M SM.Abdi	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M F.boukli-hacène	MAB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2023 / 2024

# DEDICACE

Je prends la liberté de vous adresser ces quelques lignes pour partager mon ressenti en cette fin de parcours académique. Ces années ont été sans conteste les plus enrichissantes de ma vie, et je suis particulièrement fier de cette dernière année et de ce projet de fin d'études que je dédie aux personnes les plus importantes de mon existence.

Je remercie tout d'abord Dieu, le Tout-Puissant et Miséricordieux, de nous avoir accordé la santé, la force et le courage nécessaires pour mener à bien ce projet de fin d'études.

Je voudrais ensuite exprimer ma profonde gratitude envers mes parents. Leur soutien, leurs encouragements constants et leur amour ont été les moteurs de ma réussite. Leur présence à mes côtés, dans les moments de doute comme dans les instants de joie, a été une source inestimable de motivation et de réconfort.

Je tiens également à remercier ma petite sœur et mon petit frère. Leur complicité, leur joie de vivre me rappellent l'importance de la famille et m'ont aidé à garder le cap dans les moments difficiles. Je leur souhaite un avenir radieux dans leurs études et qu'ils puissent accomplir tous leurs rêves et ambitions.

Je voudrais aussi exprimer ma sincère gratitude à mes grands-parents. Leur sagesse, leurs conseils avisés et leur amour inébranlable ont été une source d'inspiration constante tout au long de mon parcours. Leur présence chaleureuse et leur fierté ont illuminé mon chemin, et je suis profondément reconnaissant pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

Je voudrais également adresser un merci tout particulier à mes amis proches qui se reconnaîtront. Votre amitié et vos encouragements ont été des piliers importants tout au long de ce voyage académique. Vous avez partagé avec moi les hauts et les bas de cette aventure, et je suis profondément reconnaissant pour chaque moment passé ensemble.

Je n'oublie pas non plus de remercier mes collègues de l'ESSAT. Votre collaboration, vos conseils et votre camaraderie ont enrichi mon parcours et ont rendu cette période encore plus significative. J'ai beaucoup appris en travaillant à vos côtés et je suis heureux d'avoir pu partager ces années avec vous.

En toute fin, je remercie mon binôme, **Lynda BEMMERZOUK**, qui m'a fait confiance pour ce projet. Je voudrais te remercier pour ta gentillesse, ton sérieux et ta persévérance tout au long de ce projet.

---

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant, le Miséricordieux, de nous avoir donné la santé, la force et le courage de terminer ce projet de fin d'études.

Nous voilà parvenus à la fin de cinq longues et riches années qui ont sans aucun doute laissé une empreinte indélébile sur ma vie, une période académique marquante, pleine de défis relevés, de succès célébrés et de leçons apprises. C'est avec un cœur rempli de satisfaction et de nostalgie que je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude envers les personnes qui ont été mes piliers, mes guides et mes inspirations tout au long de ce parcours.

Je dédie ce travail à mes parents pour leurs amour et leurs soutien incommensurables. Merci petite maman chérie pour tout les sacrifices que tu as fait pour moi, pour ton encouragement continue. Tes paroles réconfortantes ont toujours su apaiser mon coeur.

À mes très chers grands-parents, qui m'ont donné la meilleure éducation possible, qui m'ont toujours épaulé et soutenu dans mes décisions. Merci, Mima et Abba, de m'avoir accompagné depuis mon jeune âge jusqu'à aujourd'hui. Je vous dois beaucoup, car c'est en grande partie grâce à vous que j'ai pu réaliser mon projet de fin d'études et enfin devenir ingénieur.

À ma très chère tante, qui a été une deuxième maman pour moi, qui m'a soutenu tout au long de ma vie et veillé à ce que je ne manque de rien.

À mes chers oncles Chafik et Nadir, pour tous les sacrifices que vous avez faits pour moi, pour tous les conseils que vous m'avez transmis. Sans vous, je ne serais sans doute pas arrivé là où je suis aujourd'hui.

À ma petite soeur Sirine et mon petit frère Fares adorés, vous avez illuminé ma vie par votre amour, je vous souhaite un avenir tout aussi resplendissant que le mien.

À ma cousine, ma soeur, ma jumelle Lamia et à mon ingénieux cousin Rafik dont le soutien indéfectible et la présence réconfortante m'ont été d'une grande aide.

À mes petits cousins Manel , Ali, Wissem, Djalil et enfin mon petit boutchou Arselane qui apportent énergie et joie de vivre à ma vie et qui attendent avec impatience la fin de mon travail.

À Maïssa, ma meilleure amie et confidente, qui a toujours été là pour m'écouter lorsque ça n'allait pas bien, prête à me soutenir et à me remonter le moral.

À Azedine ,une personne qui a toujours cru en moi et m'a poussé à dépassé mes limites même si parfois tes mots étaient rudes mais cela a porté ses fruits et je t'en suis reconnaissante.

À mes amis (Khaima club) Mohieddine, Nadir, Wadie, Nassim, Rym et Yasmine , avec qui j'ai vécu des moments de complicité, de bonheur et de rires mémorables.

À mes amis Manel, Nihel, Asmaa, Mehdi, Rifel, Wassen, Bouchraa et Meriem dont la présence , l'amitié et le soutien restent indéfectibles

À tous mes camarades d'automatique et collègues de Fablab ,ensemble, nous avons surmonté les défis et célébré nos réussites, créant des souvenirs qui resteront gravés dans ma mémoire. Merci pour votre camaraderie et votre esprit d'équipe qui ont rendu cette aventure académique enrichissante et inoubliable.

À tous les membres de l'association des petits anges aux quel je fait partie et principalement mon enseignante Naima qui m'a appris à me donner au fond de moi même. À mon binôme **Abderrahim HADJIAT** avec qui j'ai partagé cette aventure remplie de surmenage, de stress et de réussite. Je voudrais te remercier pour ton travail, ton soutien et ta bonne humeur.

# REMERCIEMENTS

*Nous souhaitons tout d'abord exprimer notre profonde reconnaissance envers notre encadrant, **M. Ali DALI**, pour avoir accepté de superviser notre projet de recherche. Sa disponibilité, son expertise et sa confiance en notre travail ont été des éléments essentiels au cours de notre projet de fin d'étude.*

*Nous remercions également notre co-encadrant **M. CHERKI Brahim** pour toutes les orientations et les conseils qu'il nous a prodigué tout au long de ce travail. Sa direction éclairée nous a permis d'aborder notre recherche avec assurance et détermination, et nous lui en sommes sincèrement reconnaissants.*

*À l'issue de ce projet de fin d'études, nous remercions **Mme. GUERRI Ouahiba**, chef de division éolienne au sein du Centre de Recherche des Énergies Renouvelables (CDER Ben Aknoun), pour nous avoir ouvert les portes du centre, nous permettant ainsi de réaliser notre stage de fin d'études.*

*Nous aimerions adresser nos sincères remerciements aux chercheurs du CDER pour leur chaleureux accueil et leur bienveillance. Un remerciement spécial à **M. BOU-DIA Sidi Mohamed**, pour sa bonne humeur et sa joie de vivre tout au long des stages. Nous remercions aussi **M. Kherbachi Abdelhamid**, **M. Lakhdari Halim** et **M. Meziane Fares** pour leur soutien et leurs précieux conseils durant cette période.*

*Nous remercions **M. ADJIM Ramz-Eddine Abderrezak** responsable du fablab pour ses conseils et son aide.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers **Mme GHOUALI Amel** pour avoir accepté de présider l'honorable jury de notre soutenance. De même, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à **M. ABDI Sidi-Mohammed** et à **M. BOUKLI HACENE Fazil Lotfi** pour avoir accepté d'évaluer notre travail en tant qu'examineurs.*

*Nous tenons enfin à rendre hommage à **M. ROUISSAT Boucherit**, directeur de l'ESSAT, à **M.MEGNAFI Hichem**, chef de département du second cycle, à **M.ARICHI Fayssal** chef de la filière automatique ainsi qu'à **M. KHEFIF Sidi-Mohammed** pour nous avoir accordé l'accès au FabLab.*

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Abréviations</b>	<b>xi</b>
<b>Nomenclatures</b>	<b>xii</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Système photovoltaïque</b>	<b>3</b>
Introduction . . . . .	3
1.1 L'énergie et le rayonnement solaire . . . . .	4
1.2 Historique . . . . .	5
1.3 Cellules photovoltaïques . . . . .	6
1.4 Principe de conversion . . . . .	6
1.5 Les différents types de cellules . . . . .	7
1.5.1 Les cellules monocristallines . . . . .	8
1.5.2 Les cellules polycristallines . . . . .	8
1.5.3 Les cellules amorphes . . . . .	8
1.6 Les caractéristiques d'une cellule PV . . . . .	9
1.6.1 La tension à vide $V_{oc}$ . . . . .	9
1.6.2 Le courant de court-circuit $I_{cc}$ . . . . .	9
1.6.3 Le point de puissance maximal MPP . . . . .	9
1.6.4 Le Facteur de forme FF . . . . .	10
1.6.5 Le rendement de conversion . . . . .	10
1.7 Modélisation de la cellule PV : . . . . .	10
1.7.1 Modèle à 4 paramètres . . . . .	10
1.7.2 Modèle simplifié . . . . .	11
1.8 Association des cellules PV . . . . .	13
1.8.1 Association en série . . . . .	13
1.8.2 Association en parralèle . . . . .	14
1.9 Le générateur photovoltaïque . . . . .	15
1.10 Effet de l'irradiation solaire . . . . .	15
1.11 Effet de la température . . . . .	16

---

1.12	Système de Protection . . . . .	17
1.12.1	Diode by-pass . . . . .	17
1.12.2	Diode anti-retour . . . . .	17
1.13	Simulation d'un générateur photovoltaïque . . . . .	18
1.14	Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque . . . . .	20
	Conclusion . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Convertisseur MPPT</b>	<b>22</b>
	Introduction . . . . .	22
2.1	Principe de la recherche du MPPT . . . . .	23
2.2	Convertisseur DC/DC . . . . .	23
2.2.1	Convertisseur buck . . . . .	24
2.2.2	Convertisseur boost . . . . .	25
2.2.3	Convertisseur buck-boost . . . . .	25
2.3	Etude du Fonctionnement du Convertisseur Statique dévolteur (conver- tisseur buck) . . . . .	26
2.3.1	Les modes de conduction . . . . .	27
2.4	Linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement . . . . .	28
2.4.1	Calcul des points de fonctionnements . . . . .	28
2.4.2	Représentation d'état du convertisseur . . . . .	28
2.5	Estimation de $V_{mpp}$ et $I_{mpp}$ . . . . .	30
	Conclusion . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Synthèse de lois de commande</b>	<b>32</b>
	Introduction . . . . .	32
3.1	Simulation de la commande PI sur simulink . . . . .	34
3.1.1	Résultats de simulation et interprétation . . . . .	37
3.2	Synthèse de la commande optimale . . . . .	38
3.2.1	Système à commutations . . . . .	38
3.2.2	Stabilité des système à commutations . . . . .	38
3.3	Définition d'une LMI . . . . .	39
3.4	Lemme de Schur . . . . .	39
3.5	Synthèse de la commande LQR en utilisant les LMI . . . . .	39
3.6	Fonction de commutation . . . . .	42
3.7	Simulation de la commande optimale sur simulink . . . . .	42
3.8	Comparaison entre les deux commandes . . . . .	45
3.8.1	Intérprétation des résultats . . . . .	46
3.8.2	Erreur quadratique moyenne . . . . .	46
	Conclusion . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Conception et implémentation de la commande MPPT</b>	<b>48</b>
	Introduction . . . . .	48
4.1	Méthodologie . . . . .	49
4.1.1	Unité de commande . . . . .	49

---

---

4.1.2	Unité de mesure . . . . .	50
4.2	Réalisation du hacheur . . . . .	51
4.2.1	Dimensionnement du hacheur buck . . . . .	51
4.2.2	Transistor MOSFET . . . . .	52
4.2.3	Transistor bipolaire . . . . .	52
4.2.4	Driver HCPL . . . . .	53
4.2.5	Circuit Snubber . . . . .	53
4.2.6	Présentation du prototype . . . . .	54
4.3	Implémentation de la commande optimale . . . . .	56
4.4	Résultats pratiques . . . . .	58
4.5	Interprétation des résultats . . . . .	60
	Conclusion . . . . .	60
	<b>Conclusion générale</b>	<b>61</b>
	<b>A Programme MATLAB</b>	<b>62</b>

# TABLE DES FIGURES

1.1	Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil . . .	4
1.2	Installation de la première cellule solaire . . . . .	5
1.3	Cellule photovoltaïque . . . . .	6
1.4	Semi-conducteur de type N . . . . .	6
1.5	Semi-conducteur de type P . . . . .	6
1.6	Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule solaire . . . . .	7
1.7	Caractéristiques I-V et P-V . . . . .	9
1.8	Le circuit équivalent du modèle à une diode d'une cellule PV. . . . .	11
1.9	Le circuit simplifié du modèle à une diode d'une cellule PV. . . . .	12
1.10	Groupement en série de cellules PV . . . . .	13
1.11	Caractéristique I-V d'un groupement en série . . . . .	13
1.12	Groupement en parallèle de cellules PV . . . . .	14
1.13	Caractéristique I-V d'un groupement en parallèle . . . . .	14
1.14	Cellule, module, panneau ,système photovoltaïque . . . . .	15
1.15	Caractéristique I-V pour différents niveaux de rayonnement . . . . .	16
1.16	Caractéristique I-V pour différentes valeurs de températures . . . . .	16
1.17	Utilisation de la diode by-pass. . . . .	17
1.18	Schéma d'un système de sécurité pour PV . . . . .	18
1.19	Bloc simulink d'un GPV . . . . .	18
1.20	: Système permettant d'obtenir les caractéristiques du GPV . . . . .	19
1.21	Caractéristique P-V . . . . .	20
1.22	Caractéristique I-V . . . . .	20
2.1	Schéma du principe de la commande MPPT . . . . .	23
2.2	Convertisseur DC/DC . . . . .	23
2.3	Schéma électrique du convertisseur buck . . . . .	24
2.4	Schéma électrique du convertisseur boost . . . . .	25
2.5	Schéma électrique du convertisseur buck-boost . . . . .	25
2.6	Schéma électrique du convertisseur buck . . . . .	26
2.7	Schéma d'un signal PWM . . . . .	26
2.8	Schéma électrique équivalent de 0 à DT . . . . .	27
2.9	Schéma électrique équivalent de DT à T . . . . .	27

---

3.1	Schéma bloc système avec correcteur . . . . .	33
3.2	Commande PI d'un hacheur Buck . . . . .	34
3.3	Circuit simulink du hacheur buck . . . . .	35
3.4	Schéma Simulink du hacheur avec le correcteur PI . . . . .	35
3.5	Scénario de la température . . . . .	36
3.6	Scénario de l'irradiation . . . . .	36
3.7	Représentation de la tension d'entrée en fonction du temps après régulation PI . . . . .	37
3.8	Représentation du rapport cyclique en fonction du temps . . . . .	37
3.9	Schéma bloc de la commande . . . . .	42
3.10	Schéma Simulink de la commande . . . . .	43
3.11	Schéma Simulink du hacheur avec la commande . . . . .	43
3.12	Représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps	44
3.13	Représentation du rapport cyclique par rapport au temps . . . . .	44
3.14	Représentation de la commutation par rapport au temps . . . . .	45
3.15	Représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps	45
3.16	Zoom sur la représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps . . . . .	46
4.1	Schéma bloc de la méthodologie de la commande . . . . .	49
4.2	Carte STM32 . . . . .	50
4.3	Carte cjmcu-232H . . . . .	50
4.4	Circuits des capteurs . . . . .	50
4.5	Capteur LV 25-P . . . . .	51
4.6	Capteur LTS 55-P . . . . .	51
4.7	MOSFET 4905 . . . . .	52
4.8	transistor . . . . .	53
4.9	HCPL 31-20 . . . . .	53
4.10	Circuit proteus du hacheur buck . . . . .	54
4.11	Circuit PCB du hacheur buck . . . . .	55
4.12	Prototype final du hacheur buck . . . . .	56
4.13	Illustration de la manipulation . . . . .	56
4.14	Schéma Simulink de la commande . . . . .	57
4.15	Schéma Simulink pour l'acquisition des données . . . . .	57
4.16	Représentation de la température par rapport au temps . . . . .	58
4.17	Représentation de l'irradiation par rapport au temps . . . . .	58
4.18	Représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps	59
4.19	Représentation du rapport cyclique en fonction du temps . . . . .	59

# LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparaison entre les cellules PV . . . . .	8
1.2	Paramètres en STC du PV . . . . .	19
2.1	Tableau des points de fonctionnements . . . . .	30
2.2	Paramètres pour l'approximation . . . . .	30
3.1	Tableau des gains de la commande optimale . . . . .	42
4.1	Cahier de charge pour le dimensionnement du hacheur . . . . .	51
4.2	Paramètres pour le circuit snubber . . . . .	53

# ABRÉVIATIONS

**AM** Air Mass.

**CAO** Conception assistée par ordinateur.

**DC** Continue/Continue.

**GPV** Générateur photovoltaïque.

**LMI** Inégalités Matricielles Linéaires.

**LQR** Regulateur Lineaire Quadratique.

**MOSFET** Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor.

**MPPT** Maximum Power Point Tracking.

**MPP** Maximum Power Point.

**NOCT** Nominal Operating Cell Temperature.

**PCB** Printed Circuit Board.

**PF** Point de fonctionnement.

**PI** Proportionnel Intégral.

**PV** Panneau photovoltaïque.

**PWM** Pulse Width Modulation (Modulation à Largeur d'Impulsion).

**SC** Sous contrainte.

**STC** Conditions de test standard.

# NOMENCLATURES

$\alpha_{cc}$	Coefficient de température du courant de court-circuit
$\Delta i_L$	Ondulation du courant de l'inductance
$\Delta V_C$	Ondulation de la tension de la capacité
$\Delta V_{PV}$	Ondulation de la tension d'entrée
$\eta$	Rendement de conversion
$C$	Capacité
$D$	Rapport cyclique
$e$	Erreur
$e_m$	Erreur quadratique moyenne
$f_s$	Fréquence de commutation
$FF$	Facteur de forme
$G$	Irradiation
$G_{STC}$	Irradiation STC
$I_{cc}$	Courant de court-circuit
$I_{cell}$	Courant délivré par la cellule
$I_D$	Courant à travers la diode
$I_L$	Courant de l'inductance
$I_{mpp}$	Courant au point de puissance maximale
$I_{ph}$	Photo-courant
$I_{PV}$	Courant du panneau photovoltaïque
$I_s$	Courant de saturation

$K$	Gain retour d'état
$k$	Constante de Boltzmann
$K_i$	Gain intégrale
$K_p$	Gain proportionnel
$k_T$	Coefficient de la température du courant de court circuit
$L$	Inductance
$n$	Facteur d'idéalité de la jonction
$P_{in}$	Puissance d'entrée
$P_{max}$	Puissance maximale
$P_{mpp}$	Puissance au point de puissance maximale
$R$	Résistance
$R_p$	Résistance parallèle
$R_s$	Résistance série
$R_L$	Résistance de l'inductance
$T$	Température
$T_e$	Temps d'échantillonnages
$t_f$	Temps de recouvrement de la diode
$T_m$	Température de fonctionnement de la cellule
$T_s$	Période de commutation
$T_{cell}$	Température de la cellule
$T_{NOCT}$	Température de fonctionnement nominale
$T_{off}$	Temps à l'état bloqué
$T_{on}$	Temps à l'état passant
$T_{STC}$	Température STC
$U$	Erreur de la commande
$u$	Commande
$V_g$	Energie du band gap
$V_{cell}$	Tension aux bornes de la cellule
$V_{mpp}$	Tension au point de puissance maximale
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert
$V_{out}$	Tension de sortie
$V_{PV}$	Tension du panneau photovoltaïque
$V_{th}$	Tension thermique
$q$	Charge électrique élémentaire

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Au cœur de l'évolution technologique et industrielle, notre planète fait face à un défi majeur : l'augmentation alarmante des émissions de gaz à effet de serre. Cette croissance des émissions a engendré des conséquences néfastes, plongeant notre environnement dans un bouleversement climatique et entraînant une recrudescence des catastrophes naturelles. L'urgence de réagir à cette crise climatique qui ne cesse de s'aggraver est plus pressante que jamais, et cela passe notamment par le développement et l'intégration des énergies renouvelables dans nos systèmes énergétiques. Parmi les différentes formes d'énergies renouvelables, on trouve l'énergie solaire qui se distingue par sa disponibilité et son abondance offrant un potentiel immense pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux de manière durable.

L'Algérie, avec son climat désertique et son ensoleillement généreux, se trouve dans une position privilégiée pour tirer parti de cette source d'énergie propre et renouvelable, possédant l'un des plus grands potentiels solaires au monde, avec plus de 3000 heures de soleil par an et des niveaux d'irradiation solaire parmi les plus élevés de la planète. L'Algérie a lancé plusieurs initiatives dont le Programme National des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique (PNEEER). Ce programme ambitieux vise à développer une capacité de production d'électricité à partir de sources renouvelables, en particulier l'énergie solaire, avec l'objectif de produire 22 000 mégawatts d'électricité d'ici 2030.

Notre objectif de thèse est de contribuer à l'avancement des connaissances dans le domaine des systèmes photovoltaïques en nous concentrant sur l'optimisation de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Pour ce faire, ce manuscrit présentera quatre chapitres, suivis d'une conclusion générale.

---

Le premier chapitre retracera l'évolution historique des cellules photovoltaïques, éléments essentiels dans la conversion de l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Une analyse détaillée du principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi que de leurs différentes typologies sera proposée. La modélisation mathématique des cellules sera fondée sur le modèle électrique équivalent, illustrant leur nature non linéaire. Par ailleurs, la sécurité des installations solaires, notamment lors de l'association des cellules pour former un générateur photovoltaïque, sera également abordée.

Le deuxième chapitre abordera la partie la plus cruciale et délicate de ce travail, en mettant en évidence l'importance du convertisseur DC-DC pour l'optimisation de l'énergie fournie par le panneau photovoltaïque. L'étude se concentrera sur le fonctionnement du convertisseur de puissance de type Buck, aboutissant à une représentation d'état d'un système incertain.

Le principe de la recherche du Point de Puissance Maximale (MPP) sera abordé dans le troisième chapitre et jouera un rôle essentiel dans la synthèse d'une commande classique PI ainsi que d'une commande par retour d'état d'un convertisseur MPPT. L'utilisation d'outils mathématiques tels que les LMI (Inégalités Matricielles Linéaires) sera sollicitée pour garantir la robustesse et la stabilité du système.

Le quatrième et dernier chapitre sera consacré à la conception pratique et à l'implémentation de la commande MPPT dans les systèmes photovoltaïques. Une méthodologie de réalisation du convertisseur MPPT sera suivie, tout en expliquant le dimensionnement, le choix des composants électroniques, ainsi que l'utilisation des capteurs de tension et de courant indispensables à la précision de la commande MPPT par retour d'état.

Le manuscrit se clôturera par une conclusion générale mettant en évidence les résultats obtenus et ouvrira des perspectives pour les enjeux futurs à explorer.

# CHAPITRE

## 1

# SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

## **Introduction**

Les systèmes photovoltaïques occupent une place centrale dans la transition énergétique mondiale vers des sources d'énergie renouvelables et propres.

Ce chapitre vise à offrir une compréhension approfondie des systèmes photovoltaïques en explorant leurs principes fondamentaux et leur évolution historique. Nous débuterons en détaillant les concepts d'indice de masse d'air (Air Mass, AM) et de constante solaire, fondamentaux pour évaluer le spectre solaire.

Ensuite, nous aborderons les principes de conversion de la lumière en électricité par l'effet photovoltaïque. Les différents types de cellules photovoltaïques seront présentés, notamment les cellules monocristallines, polycristallines et amorphes, en détaillant leurs caractéristiques, leurs rendements de production et leurs applications variées.

Nous discuterons également des modèles utilisés pour illustrer le comportement électrique des cellules PV, tels que le modèle à une diode, ainsi que l'association des cellules pour former des générateurs photovoltaïques et les considérations liées à l'efficacité et à la sécurité des installations solaires.

Enfin, nous mettrons en évidence les avantages environnementaux des systèmes photovoltaïques, ainsi que les défis techniques et économiques à relever pour leur adoption à grande échelle.

## 1.1 L'énergie et le rayonnement solaire

Le Soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation énergétique. Il est composé d'hydrogène (75%), d'hélium (23%) et d'autres éléments (2%) en masse. Les atomes d'hydrogène fusionnent pour former de l'hélium, libérant ainsi une immense quantité d'énergie selon la célèbre équation d'Einstein,  $E = mc^2$ . [6]

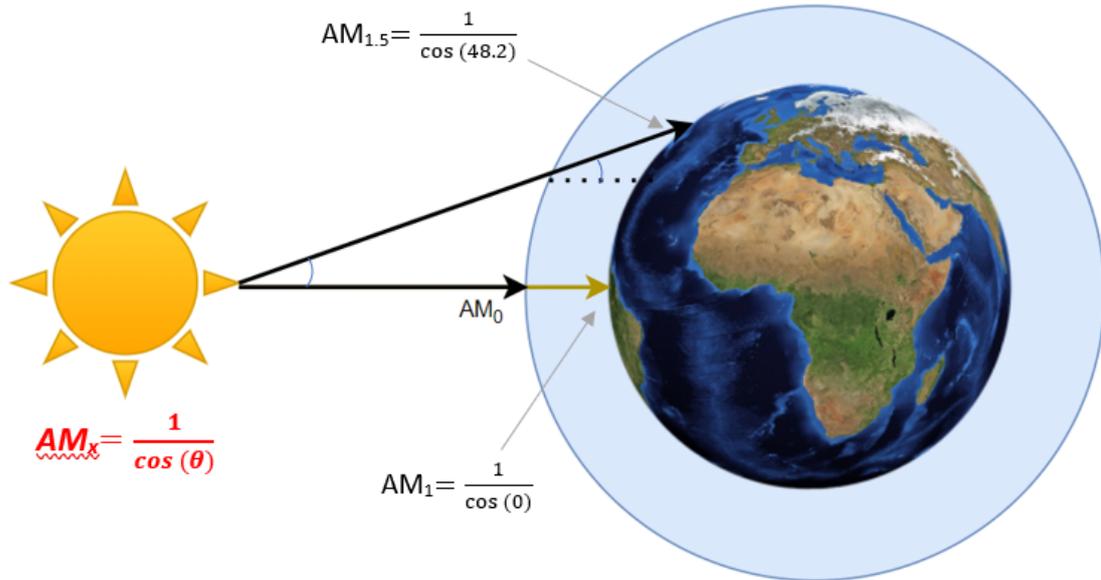


FIGURE 1.1 – Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil.

L'indice Air Mass (AM) est une mesure clé pour évaluer le spectre solaire et l'énergie émise par le soleil. Il est défini comme le rapport entre la distance parcourue par la lumière solaire à travers l'atmosphère et l'épaisseur de celle-ci. (figure 1.1)[14].

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur la distance soleil-terre est d'environ **1350 W/m<sup>2</sup>** dans l'espace. Hors de l'atmosphère terrestre, cette valeur est connue sous le nom de constante solaire et correspond à l'indice Air Mass 0 (**AM0**).

Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans l'atmosphère de la Terre, il subit des altérations telles que l'absorption et la diffusion par les gaz, l'eau et les poussières, réduisant son énergie directe à environ **1000 W/m<sup>2</sup>** dans des conditions standard appelées (**AM1**) qui représente la longueur du trajet parcouru par la lumière lorsque le soleil est au zénith [12].

Pour mieux tenir compte des variations dues à l'épaisseur de l'atmosphère traversée par la lumière solaire en fonction de l'angle d'incidence, l'indice Air Mass 1.5 (**AM1.5**) est utilisé. Cet indice décrit le spectre de la lumière solaire dans des conditions standard, lorsque le soleil est à un angle de 48.2° par rapport au zénith [12].

## 1.2 Historique

Les systèmes photovoltaïques ont une histoire riche qui débute avec la découverte de l'effet photovoltaïque par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839. Ce dernier a réalisé des expériences en plaçant deux électrodes métalliques dans un liquide conducteur et en exposant l'ensemble au rayonnement solaire. Il mesura une faible tension.[6]



FIGURE 1.2 – Installation de la première cellule solaire

Par la suite, de nombreux scientifiques ont apporté leur contribution au développement des cellules photovoltaïques. Voici ci-dessous un aperçu chronologique de cette évolution :

**1883** : L'américain Charles Fritts construit la première cellule solaire fonctionnelle en utilisant du sélénium recouvert d'une fine couche d'or (figure 1.2).

**1921** : Einstein publie ses travaux sur l'effet photoélectrique ce pour quoi il obtient un prix Nobel

**1954** : Darryl Chapin et Carl Fuller ,chercheurs aux laboratoires Bell annoncent la production de cellules solaires au silicium avec un rendement de 6%.

**1960** : Le photovoltaïque a pris son envol grâce à la recherche spatiale, utilisée pour l'approvisionnement en énergie des satellites.

**1970** : Les crises pétrolières renforcent l'intérêt de la recherche et les crédits accordés à l'énergie photovoltaïque.

**Aujourd'hui** : Les progrès technologiques, y compris l'utilisation de nouveaux matériaux et de techniques de fabrication améliorées, augmentent l'efficacité et réduisent les coûts des cellules solaires.

## 1.3 Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque montrée sur la figure 1.3 (photon : grain de lumière, volt : unité de tension) est un composants optoélectronique à base de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium. Elle transforme directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé " effet photovoltaïque ".[6]



FIGURE 1.3 – Cellule photovoltaïque

## 1.4 Principe de conversion

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur comportant deux couches, l'une présentant un excès d'électrons (dopée de type N) et l'autre un déficit en électrons (dopée de type P) (figure 1.4 et 1.5) [6] [11].

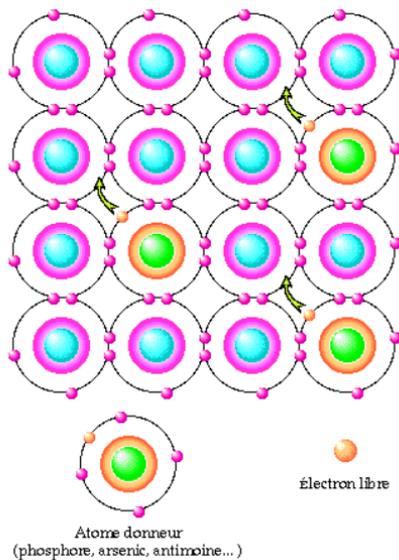


FIGURE 1.4 – Semi-conducteur de type N

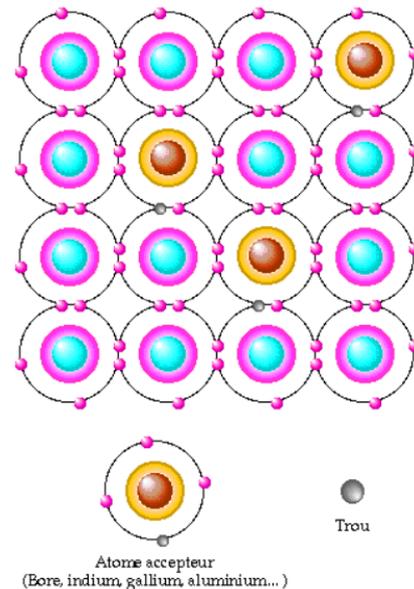


FIGURE 1.5 – Semi-conducteur de type P

On peut résumer le processus de fonctionnement en trois principales étapes (figure 1.6)[5] [11] :

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

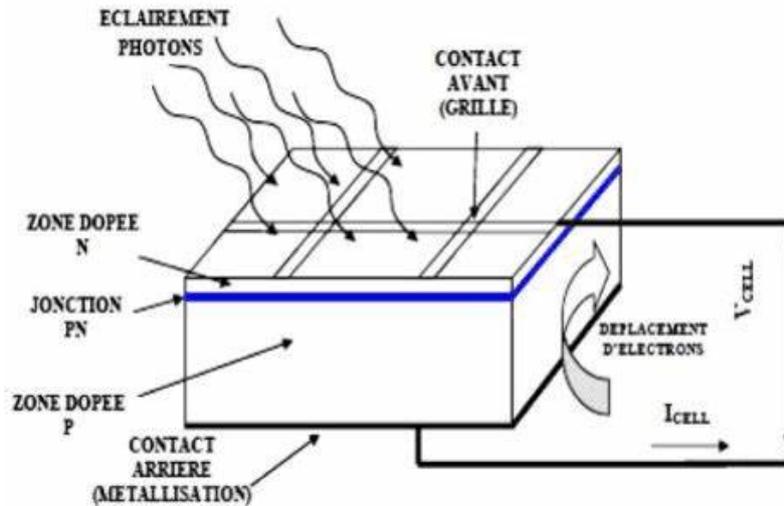


FIGURE 1.6 – Schéma explicatif du fonctionnement d'une cellule solaire

Lorsque la première zone, initialement dopée N, est mise en contact avec la seconde zone, initialement dopée P, il se produit une diffusion des électrons du matériau N vers le matériau P. En conséquence, la zone N acquiert une charge positive et la zone P acquiert une charge négative. Cette répartition des charges crée un champ électrique entre les deux zones, formant ainsi une jonction PN.

Lorsque la jonction PN d'une cellule photovoltaïque est exposée à la lumière, les photons provoquent le déplacement des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, laissant derrière eux des trous capables de se déplacer. Cette transition électronique crée des paires électron-trou.

Lorsqu'une charge est appliquée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone négative (N) se déplacent vers les trous de la zone positive (P) via le circuit externe, établissant ainsi une différence de potentiel qui permet au courant électrique de circuler.

## 1.5 Les différents types de cellules

Il existe plusieurs types de cellules solaires dont chaque type de cellules possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quelque soit leur type, leur rendement reste assez faible, variant de 8% à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. En effet, il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle. Parmi lesquels, on peut citer :

### 1.5.1 Les cellules monocristallines

Les cellules solaires monocristallines sont fabriquées à partir d'un seul cristal de silicium, ce qui leur confère une structure cristalline hautement ordonnée. Cette structure permet d'obtenir un rendement élevé mais avec un coût onéreux. Les cellules monocristallines sont reconnaissables par leur couleur uniforme et leur forme généralement carrée [16].

### 1.5.2 Les cellules polycristallines

Les cellules solaires polycristallines sont fabriquées à partir de lingots de silicium composés de multiples cristaux. Bien qu'elles soient moins chères à produire que les monocristallines, elles ont généralement un rendement légèrement inférieur en raison de la présence de joints de grain entre les cristaux [16].

### 1.5.3 Les cellules amorphes

Les cellules solaires amorphes, également appelées cellules à couche mince, utilisent des matériaux semi-conducteurs non cristallins tels que le silicium amorphe (un ensemble d'atomes désordonnés). Elles sont produites en déposant une fine couche de matériau semi-conducteur sur un substrat qui peut être rigide ou flexible ce qui rend possible la réalisation de cellules sur des surfaces courbes et des modules "pliables" [16].

Ci-dessous un tableau comparatif des différentes cellules solaires [6] :

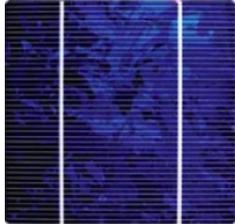
Type de cellules	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Amorphe
Photo des cellules			
Rendement	13% à 17%	11% à 15%	6% à 10%
Coût	Élevé	Moyen	Faible à moyen
Structure	Cristal unique de silicium	Multiples cristaux de silicium	Silicium non cristallin
Applications	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Grands projets solaires</li> <li>— Toits résidentiels et commerciaux</li> <li>— Aérospatiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Projets solaires à grande échelle</li> <li>— éclairage publique</li> <li>— Systèmes de pompage solaire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Appareils électroniques</li> <li>— Montre</li> <li>— Calculatrice</li> </ul>

TABLEAU 1.1 – Comparaison entre les cellules PV

## 1.6 Les caractéristiques d'une cellule PV

Pour un éclairement et une température données, la cellule ou le générateur photovoltaïque se distingue par deux courbes (figure 1.7) : courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V). Ces courbes mettent en évidence plusieurs grandeurs physiques :

### 1.6.1 La tension à vide $V_{oc}$

La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est la tension aux bornes du générateur PV lorsque les bornes du générateur sont non connectées à un circuit externe. Cette tension représente la capacité maximale de tension du générateur dans des conditions spécifiques d'éclairement et de température.

### 1.6.2 Le courant de court-circuit $I_{cc}$

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est le courant électrique maximal qui peut circuler à travers le générateur photovoltaïque lorsque les bornes du circuit sont court circuité ( $R_{charge} = 0$ ).

### 1.6.3 Le point de puissance maximale MPP

Le point de puissance maximale (MPP) est le point de fonctionnement optimal pour lequel le panneau opère à sa puissance maximale ( $P_{mpp}$ ). Ce point est caractérisé par un courant et une tension au point de puissance maximale ( $I_{mpp}, V_{mpp}$ ) comme montré ci-dessous.

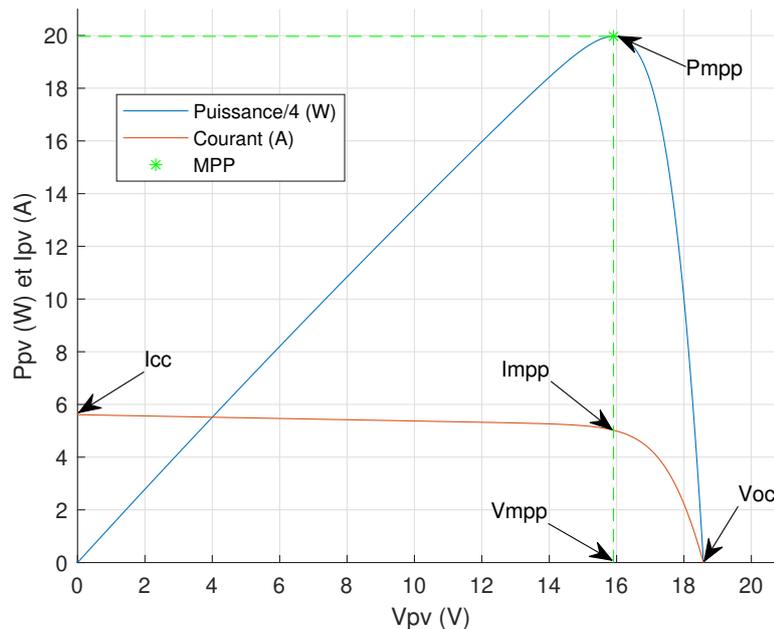


FIGURE 1.7 – Caractéristiques I-V et P-V

### 1.6.4 Le Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de forme (fill factor). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée  $P_{mpp}$  et la puissance formée par le rectangle  $I_{cc} * V_{oc}$ . Plus sa valeur est élevée, plus la puissance exploitable est grande. [11]

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{cc} * V_{oc}} \quad \text{avec } 0 < FF < 1 \quad (1.1)$$

### 1.6.5 Le rendement de conversion

Il exprime la capacité de la cellule à convertir efficacement les photons de la lumière incidente en courant électrique. Il est calculé par le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule  $P_{mpp}$  et la puissance d'entrée de la cellule  $P_{in}$  (puissance d'éclairement solaire incident). [11]

$$\eta = \frac{P_{mpp}}{P_{in}} = \frac{I_{cc} * V_{oc} * FF}{P_{in}} \quad (1.2)$$

## 1.7 Modélisation de la cellule PV :

Les modèles électriques équivalents, tels que les circuits à une ou deux diodes, sont couramment utilisés pour caractériser le comportement des cellules photovoltaïques en raison de leur forte non-linéarité, principalement attribuée aux jonctions semi-conductrices. Ces modèles, décrits dans la littérature, varient selon le nombre de paramètres nécessaires pour décrire avec précision la relation entre la tension et le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque. [9]

### 1.7.1 Modèle à 4 paramètres

Une cellule PV peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustré sur la figure 1.8. Ce circuit est constitué d'un générateur de courant continu  $I_{ph}$  qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et de deux résistances  $R_p$  et  $R_s$  caractérisant respectivement les courants de fuite de la jonction et les diverses résistances des contacts de connexion [6].

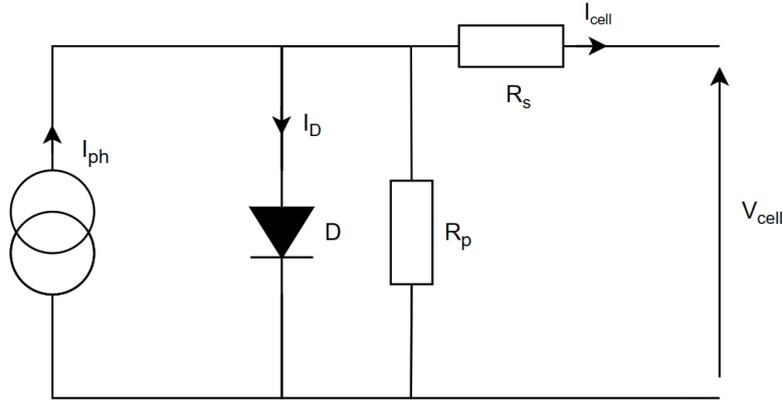


FIGURE 1.8 – Le circuit équivalent du modèle à une diode d'une cellule PV.

avec :

$R_s$  : Résistance série.

$R_p$  : Résistance parallèle.

$I_{ph}$  : Photo-courant.

$I_D$  : Courant à travers la diode.

$I_{cell}$  : Courant délivré par la cellule.

$V_{cell}$  : Tension aux bornes de la cellule.

$V_D$  : Tension aux bornes de la diode.

$n$  : Facteur d'idéalité de la jonction.

$k$  : Constante de Boltzmann.

$T_{cell}$  : Température de la cellule.

$q$  : Charge électrique élémentaire.

On peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \quad (1.3)$$

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (1.4)$$

$$V_D = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad (1.5)$$

d'où

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (1.6)$$

$V_{th} = \frac{nkT_{cell}}{q}$  est appelée tension thermique.

### 1.7.2 Modèle simplifié

Généralement, l'effet de la résistance parallèle est négligé en raison de sa grande valeur, il en découle un circuit électrique équivalent simplifié comme le montre la figure 1.9 ci-dessous.[9]

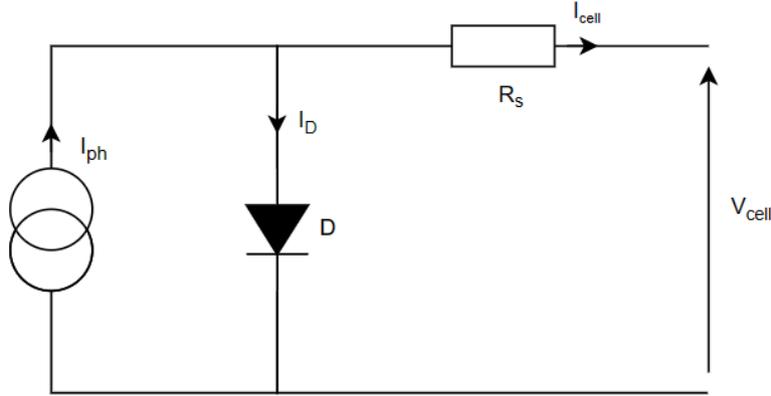


FIGURE 1.9 – Le circuit simplifié du modèle à une diode d'une cellule PV.

Le courant délivré par la cellule est alors donné par l'expression :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left( e^{\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) \quad (1.7)$$

La tension aux bornes de la cellule est donnée par :

$$V_{cell} = -R_s I_{cell} + V_{th} \ln \left( \frac{I_{ph} - I_{cell} + I_s}{I_s} \right) \quad (1.8)$$

le photocourant généré pour n'importe quel valeur d'irradiation  $G$  et de température  $T$  est donné par :

$$I_{ph} = I_{ccSTC} \frac{G}{G_{STC}} (1 + \alpha_{cc}(T - T_{STC})) \quad (1.9)$$

Le coefficient de température du courant de court-circuit  $\alpha_{sc}$  est généralement donné par le fabricant sur le datasheet en pourcentage de changement par degré Celsius et peut être calculé de la manière suivante :

$$\alpha_{cc} = \frac{I_{ccT_2} - I_{ccSTC}}{T_2 - T_{STC}} \quad (1.10)$$

Le courant de saturation  $I_s$  de la diode pour la température  $T_{STC}$ , est donné par :

$$I_{sSTC} = \frac{I_{ccSTC}}{e^{\frac{V_{ocSTC}}{V_{thSTC}} - 1}} \quad (1.11)$$

Le courant de saturation pour une température donnée est calculée par l'équation suivante :

$$I_s = I_{sSTC} \left( \frac{T}{T_{STC}} \right)^{\frac{3}{n}} e^{-\frac{qV_g}{nk} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_{STC}} \right)} \quad (1.12)$$

avec

$V_g$  est appelée énergie du band gap, sa valeur dépend du matériau constituant la cellule (1.2 eV pour le silicium) [10].

## 1.8 Association des cellules PV

Les cellules photovoltaïques individuelles produisent généralement une puissance électrique insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Pour pallier cette limitation, des générateurs photovoltaïques sont construits par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

### 1.8.1 Association en série

Une association de  $N_s$  cellules en série comme montré sur la figure 1.10 permet d'augmenter la tension du système photovoltaïque. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule ( $V_{pv} = N_s V_{cell}$ ) [11].

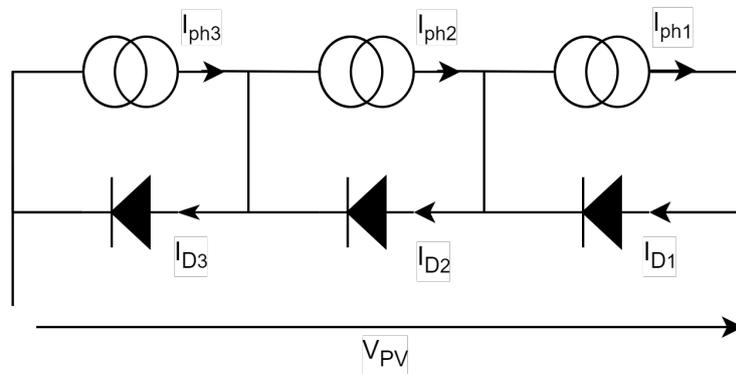


FIGURE 1.10 – Groupement en série de cellules PV

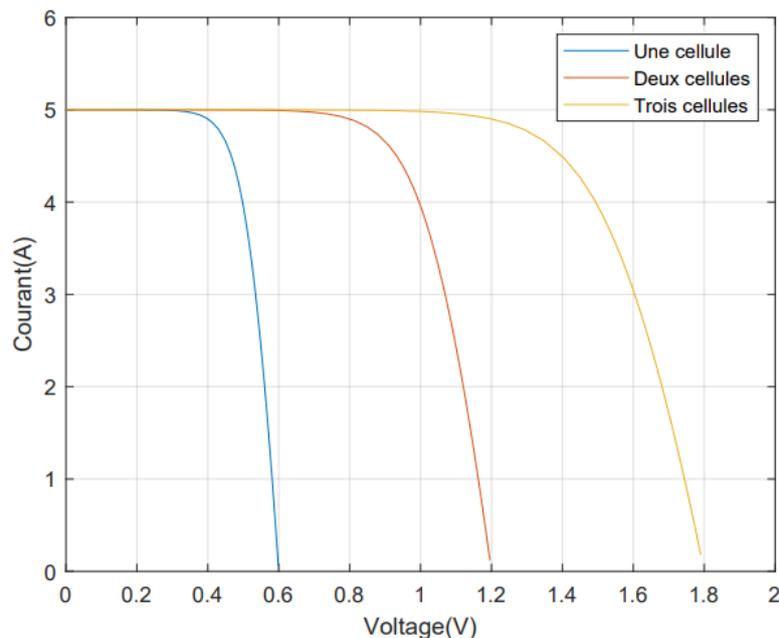


FIGURE 1.11 – Caractéristique I-V d'un groupement en série

### 1.8.2 Association en parallèle

Une association de  $N_p$  cellules en parallèle comme montré sur la figure 1.12 permet d'augmenter le courant de sortie du système photovoltaïque. Les cellules sont alors soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement parallèle est obtenue par addition des courants élémentaires de chaque cellule ( $I_{pv} = N_p I_{cell}$ ) [11].

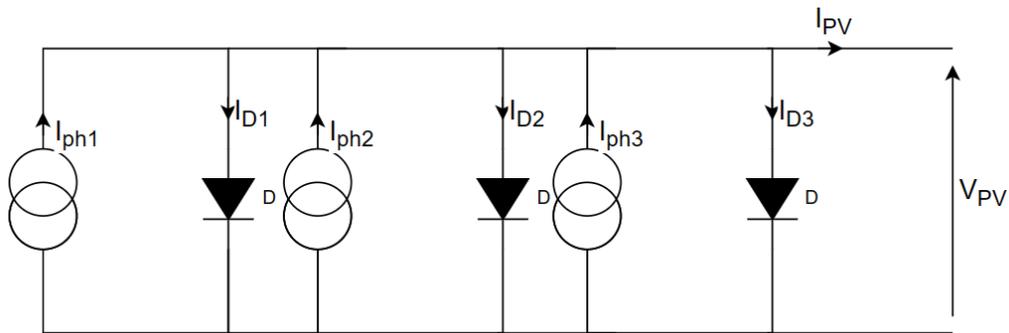


FIGURE 1.12 – Groupement en parallèle de cellules PV

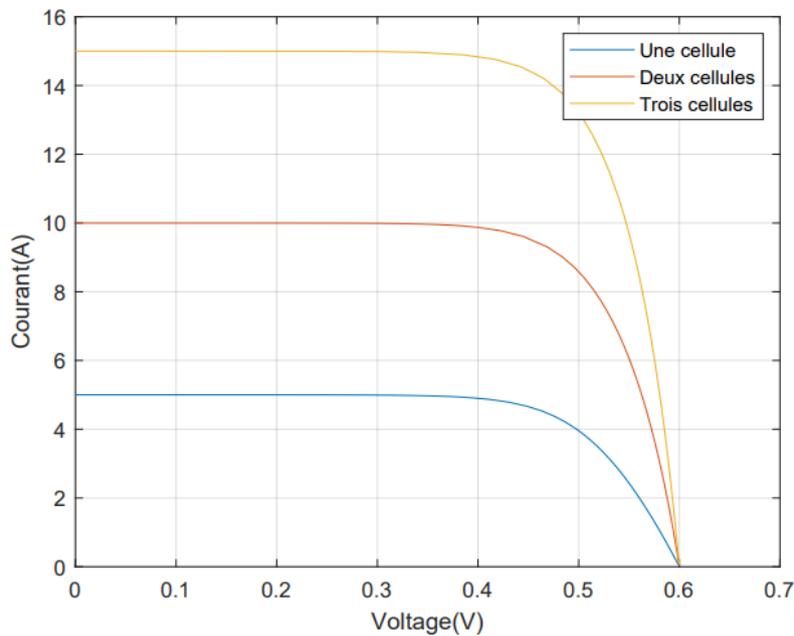


FIGURE 1.13 – Caractéristique I-V d'un groupement en parallèle

## 1.9 Le générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules qui convertissent la lumière solaire en électricité. Toute fois, Ces cellules sont regroupées en série et/ou en parallèle pour former un module photovoltaïque. Ensuite, ces modules sont connectés entre eux pour constituer un panneau photovoltaïque. Enfin, plusieurs de ces panneaux sont reliés ensemble pour former un champ ou un système photovoltaïque capable de produire de l'électricité à grande échelle [6] (figure 1.14).

La puissance électrique produite par le GPV dépend du matériau utilisé pour les cellules, des conditions météorologiques telles que la température et l'irradiation solaire, ainsi que des charges électriques auxquelles il est connecté.

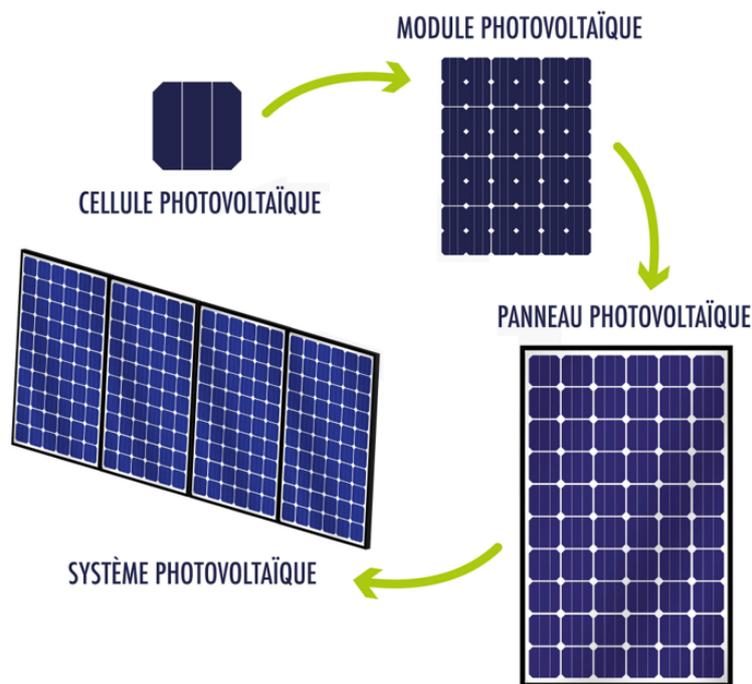


FIGURE 1.14 – Cellule, module, panneau ,système photovoltaïque

## 1.10 Effet de l'irradiation solaire

La variation du courant en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante ( $30^{\circ}\text{C}^{\circ}$ ) (figure 1.15) montre clairement que le courant du court-circuit  $I_{cc}$  varie proportionnellement à la variation de l'irradiation tandis que la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  varie très peu [11].

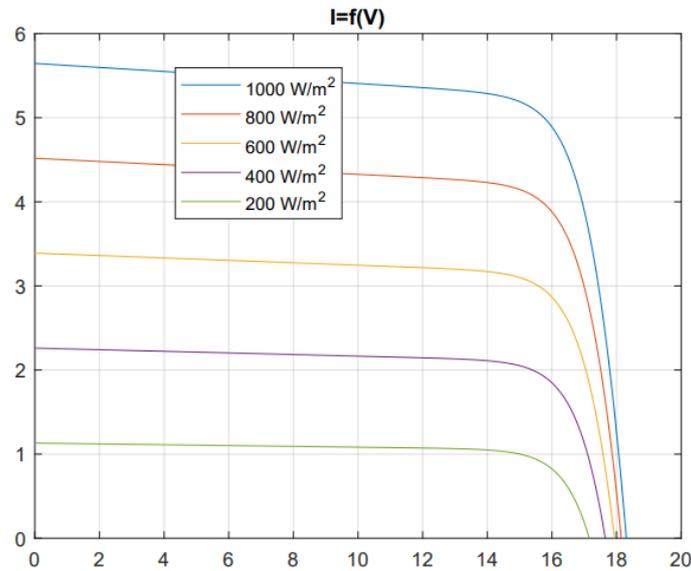


FIGURE 1.15 – Caractéristique I-V pour différents niveaux de rayonnement

## 1.11 Effet de la température

La température a également une influence sur la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque. La figure 1.16 présente la variation du courant en fonction de la tension pour différentes valeurs de températures à un éclairement fixé ( $800W.m^{-2}$ ). L'évolution de cette caractéristique en fonction de la température est complexe : alors que la température augmente, la tension de circuit ouvert diminue tandis que le courant de court-circuit connaît une légère augmentation [11] .

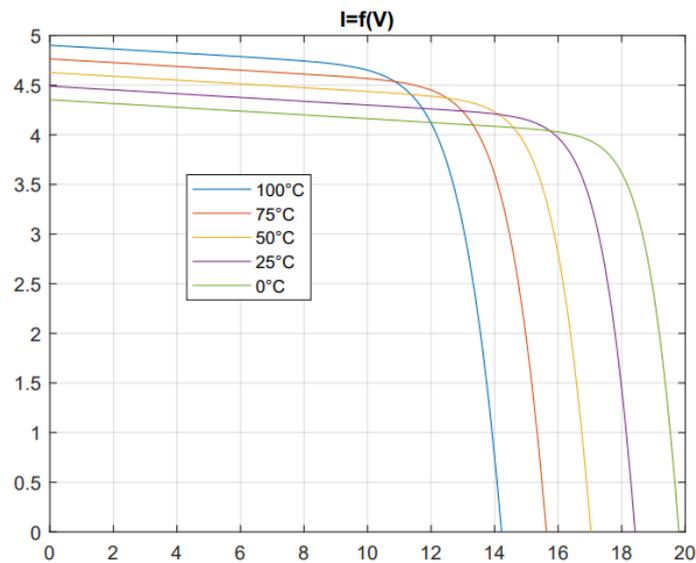


FIGURE 1.16 – Caractéristique I-V pour différentes valeurs de températures

## 1.12 Système de Protection

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles.[11]

### 1.12.1 Diode by-pass

Les panneaux solaires sont constitués de plusieurs cellules connectées en série. Lorsqu'une cellule est ombragée ou défectueuse, elle limite le courant global du panneau, car le courant de la série est déterminé par la cellule la plus faible. Les diodes by pass (1.17) permettent au courant de contourner ces cellules problématiques, maintenant ainsi un flux de courant plus élevé. De plus, les cellules ombragées ou défectueuses peuvent provoquer des points chauds, où une cellule fonctionne comme une résistance dissipant de la puissance sous forme de chaleur, ce qui peut endommager la cellule et, à terme, le panneau solaire d'où la nécessité de ces diodes de protection [11].

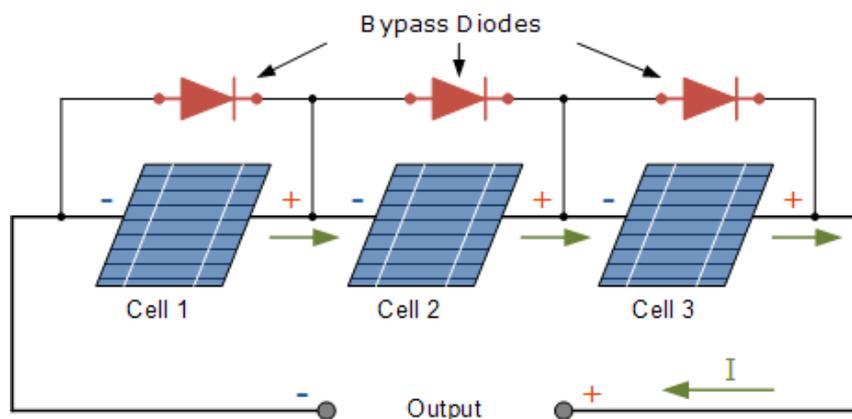


FIGURE 1.17 – Utilisation de la diode by-pass.

### 1.12.2 Diode anti-retour

Une mesure de protection supplémentaire, telle que la diode anti-retour (Blocking diode), est installée en série avec chaque branche d'un générateur photovoltaïque (figure 1.18). Cette diode vise à prévenir les courants inverses qui pourraient endommager un ou plusieurs modules photovoltaïques. Ce problème peut survenir lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou lorsque qu'une charge en connexion directe peut passer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie pendant la nuit.[11]

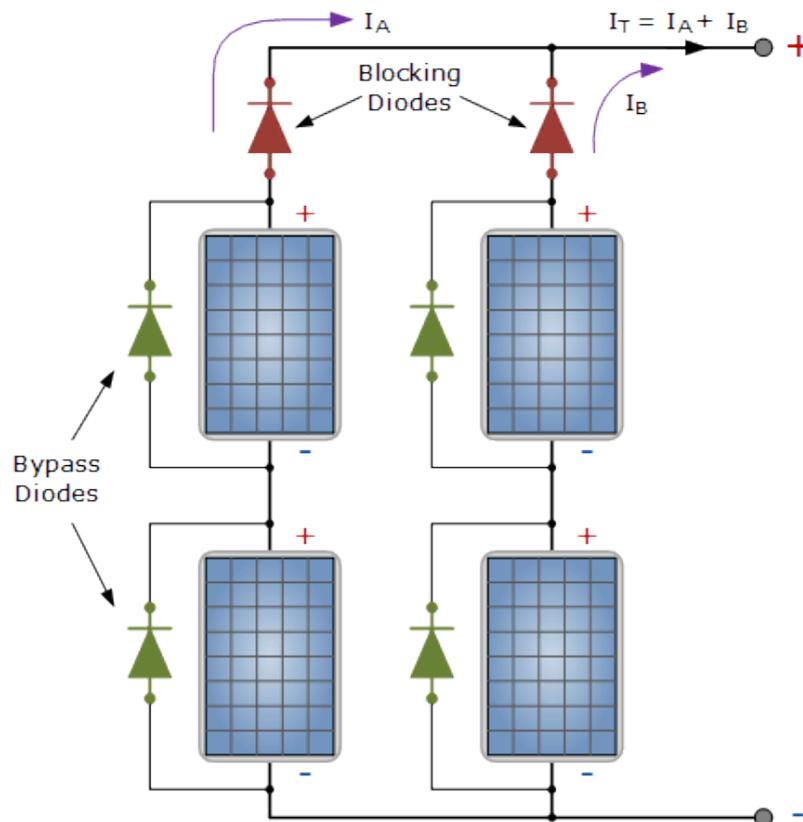


FIGURE 1.18 – Schéma d'un système de sécurité pour PV

### 1.13 Simulation d'un générateur photovoltaïque

Pour simuler un générateur photovoltaïque, nous allons utiliser le logiciel Matlab et plus spécifiquement son environnement Simulink. Parmi les fonctionnalités de Simulink, se trouve le bloc "PV Array" (figure 1.19), qui modélise un panneau solaire à l'aide des équations mathématiques d'un modèle à quatre paramètres d'une cellule photovoltaïque. Cette approche offre une simulation précise du comportement réel du panneau solaire.

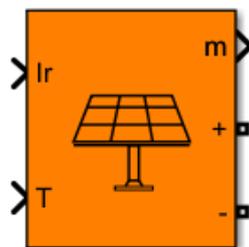


FIGURE 1.19 – Bloc simulink d'un GPV

Les données à saisir sur le bloc de paramètres du PV sont ceux donnés sur le datasheet du panneau en STC (conditions de test standard AM1.5,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

Paramètres(STC)	Valeurs
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	80 W
Tension au point de puissance maximale ( $V_{mpp}$ )	15.90 V
Courant au point de puissance maximale ( $I_{mpp}$ )	5.03 A
Tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	18.58 V
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	5.59 A
Température de fonctionnement nominale ( $T_{NOCT}$ )	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$

TABLEAU 1.2 – Paramètres en STC du PV

Afin d'obtenir les caractéristiques (I-V) et (P-V) à partir du modèle établi du GPV, nous avons relié les bornes du PV à une charge RC en série (figure 1.20) et tracé les caractéristiques précédentes pour différentes valeurs d'irradiation et de température.

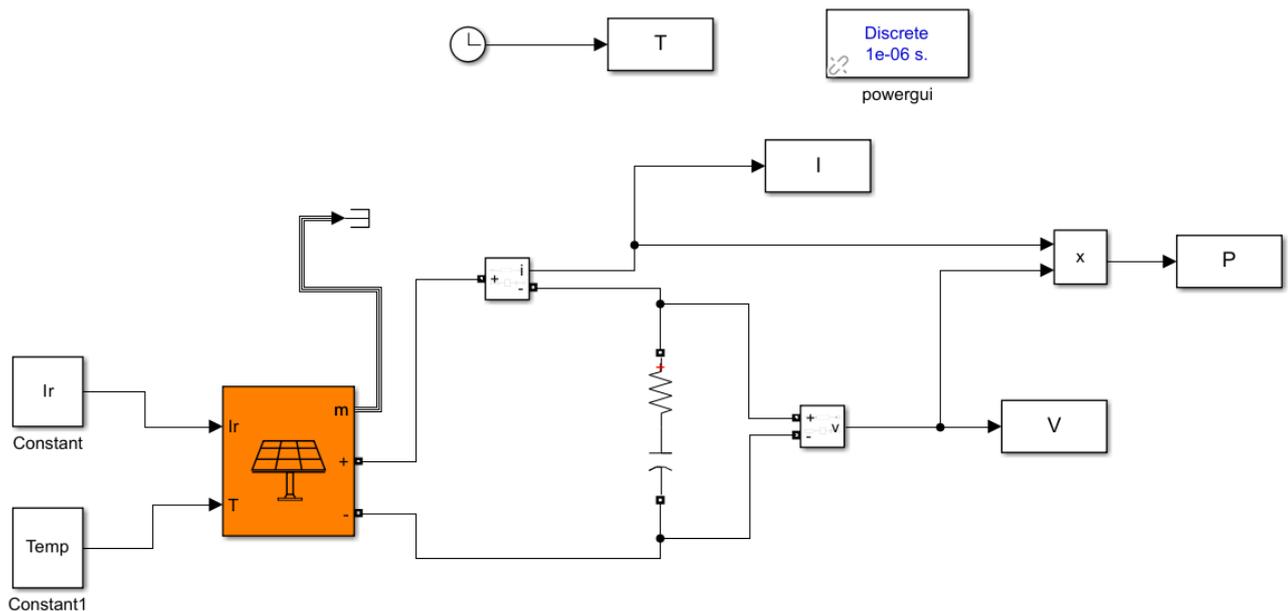


FIGURE 1.20 – : Système permettant d'obtenir les caractéristiques du GPV

Les résultats de la simulation pour une température  $T = 25^{\circ}\text{C}$  et une irradiation  $G = 1000\text{ W}/\text{m}^2$  sont montrés dans les figures 1.21 et 1.22

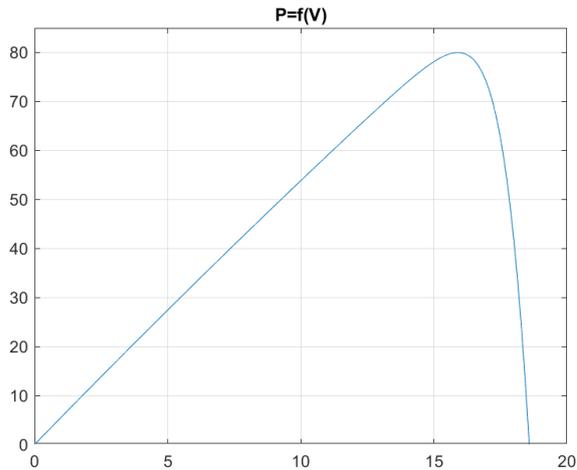


FIGURE 1.21 – Caractéristique P-V

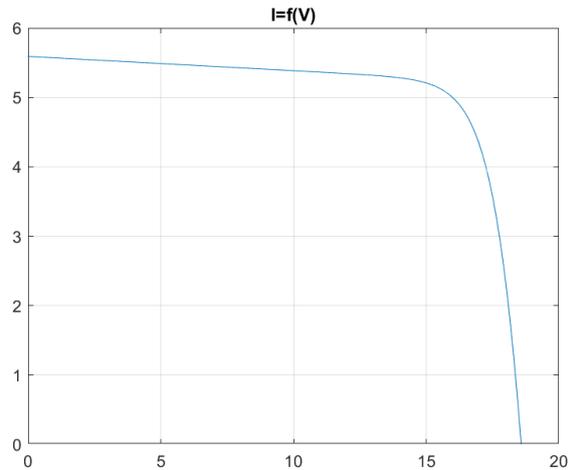


FIGURE 1.22 – Caractéristique I-V

## 1.14 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Les principaux avantages de cette source d'énergie sont :

- L'énergie photovoltaïque est une énergie renouvelable et inépuisable.
- L'utilisation de l'énergie solaire réduit les émissions de CO<sub>2</sub> et autres polluants, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique.
- Les panneaux solaires ont un impact environnemental limité. Ils ne produisent pas de polluants atmosphériques ni de déchets dangereux.
- Les systèmes photovoltaïques permettent de produire de l'électricité localement, réduisant ainsi la dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'électricité et des augmentations de tarifs.
- Les installations photovoltaïques peuvent être adaptées à des petits systèmes résidentiels jusqu'à de grandes centrales solaires.

Tandis que les principaux inconvénients de cette ressource sont :

- L'installation d'un système photovoltaïque peut être coûteuse, bien que les coûts ont considérablement baissé ces dernières années.
- Bien que les panneaux solaires soient durables, ils contiennent des matériaux pouvant être difficiles à recycler à la fin de leur vie utile.
- L'énergie solaire dépend de la disponibilité du soleil, ce qui peut rendre la production dépendante des conditions météorologiques.
- L'efficacité des panneaux solaires peut varier selon l'emplacement géographique.

## Conclusion

En conclusion, les systèmes photovoltaïques représentent une solution cruciale pour exploiter l'énergie solaire et produire de l'électricité proprement et durablement. Ce chapitre a exploré les principes de base des systèmes PV, en mettant en lumière les différents types de cellules photovoltaïques et leur fonctionnement. L'association des cellules pour former des générateurs photovoltaïques efficaces, ainsi que les considérations liées à la modélisation et à la sécurité, ont également été abordées.

## CHAPITRE

# 2

# CONVERTISSEUR MPPT

## Introduction

L'optimisation de l'énergie solaire captée par un panneau photovoltaïque nécessite l'intégration d'un convertisseur DC-DC équipé d'un algorithme de contrôle afin d'extraire un maximum de puissance. Ce processus est souvent désigné sous le terme de recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking), un point où le produit de la tension et du courant est maximal, garantissant ainsi une utilisation optimale de l'énergie solaire.

Dans ce chapitre, nous examinerons les différents types de convertisseurs DC-DC, tels que les convertisseurs buck, boost et buck-boost, ainsi que leurs modes de fonctionnement. Ensuite, nous nous concentrerons principalement sur la modélisation mathématique du convertisseur abaisseur (buck) qui sera utilisé pour la commande MPPT.

Un autre aspect abordé sera l'estimation des valeurs optimales de la tension et du courant auxquels le panneau devra se positionner pour atteindre le Point de Puissance Maximale.

## 2.1 Principe de la recherche du MPPT

La figure 2.1 illustre le système global de la commande MPPT, qui est conçu pour optimiser l'extraction d'énergie des panneaux photovoltaïques (PV).

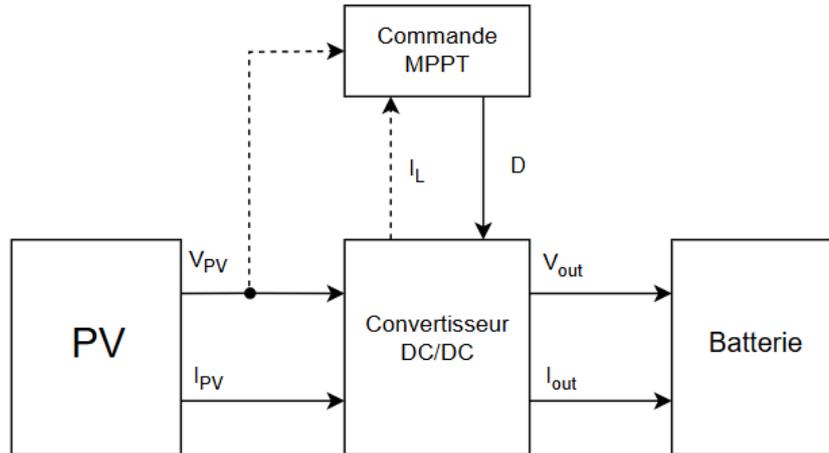


FIGURE 2.1 – Schéma du principe de la commande MPPT

Le panneau photovoltaïque capte l'énergie solaire et la convertit en électricité, produisant une tension  $V_{pv}$  et un courant  $I_{pv}$ . La commande MPPT mesure  $V_{pv}$  et  $I_L$  pour calculer le point de puissance maximale représenté par  $(V_{mpp}, I_{mpp})$  puis génère un signal de commande  $D$  (rapport cyclique) qui est envoyé au convertisseur DC/DC. Ce convertisseur ajuste la tension et le courant pour maintenir le panneau à son MPP (figure 1.7), garantissant ainsi une charge efficace de la batterie.

## 2.2 Convertisseur DC/DC

Dans le cadre des systèmes photovoltaïques (PV), le convertisseur DC/DC joue un rôle essentiel en assurant l'adaptation entre la source (GPV) et la charge afin de maximiser le transfert de puissance (figure 2.2). Cela implique le maintien du point de fonctionnement (PF) du système sur ou à côté du point de puissance maximale (MPP) pour n'importe quelles conditions de fonctionnement.[11][6]

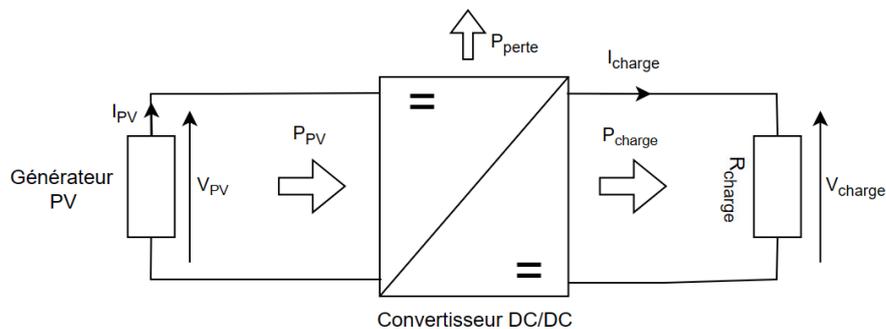


FIGURE 2.2 – Convertisseur DC/DC

Contrairement à l'utilisation général du convertisseur DC/DC qui consiste à réguler la tension de sortie, dans ce cas particulier, on régule la tension d'entrée qui dépend des facteurs du GPV. La tension de référence (ou consigne) est ajustée selon un algorithme de commande spécifique.

Lorsque les pertes internes du convertisseur sont négligeables, la puissance à l'entrée et à la sortie du convertisseur sont presque égales, ce qui permet de maximiser l'efficacité du système.[6]

Dans notre mémoire nous allons nous concentrer sur le convertisseur Buck qui a été utilisé pour charger une batterie de 12V.

### 2.2.1 Convertisseur buck

Le convertisseur buck, aussi appelé hacheur série, est une alimentation à découpage qui permet abaisser la tension d'entrée à un niveau inférieur et il est souvent utilisé comme adaptateur entre une source d'énergie et une charge (figure 2.3).

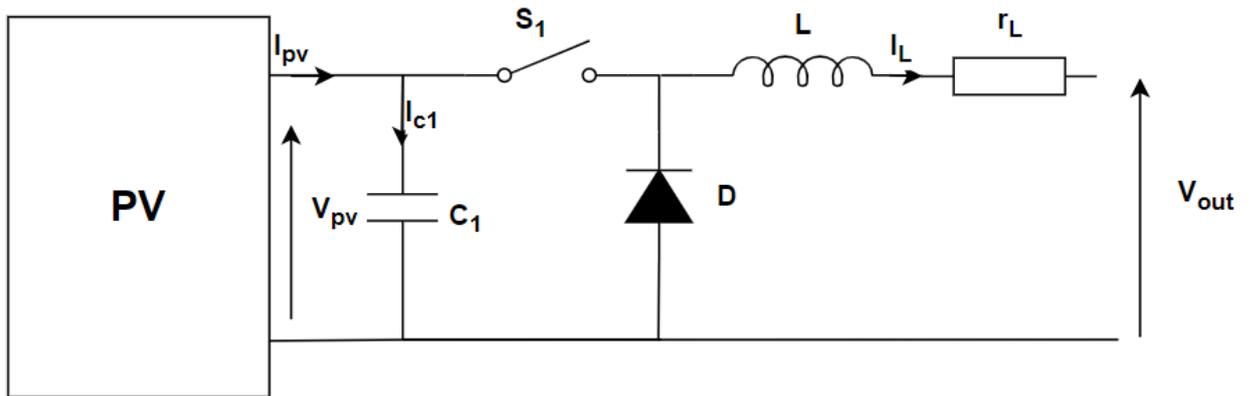


FIGURE 2.3 – Schéma électrique du convertisseur buck

Lorsque le commutateur  $S_1$  est fermé, un courant traverse le circuit, mais contourne la diode  $D$  car elle est en polarisation inverse. Lorsque le commutateur  $S_1$  est ouvert, la charge est isolée de son alimentation mais le courant persiste grâce à l'énergie stockée dans l'inductance  $L$  et passe à travers la diode de roue libre  $D$ .

Le condensateur  $C_1$  est placé avant le convertisseur pour réduire les pics de courant et élimine les bruits au niveau de la tension du GPV.

Le commutateur  $S_1$  est activé et désactivé avec une fréquence de commutation  $f_s = \frac{1}{T_s}$  avec  $T_s$  période de commutation et  $T_s = T_{on} + T_{off}$ .

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

$$V_{out} = DV_{PV}$$

avec  $D = \frac{T_{on}}{T}$  qui est le rapport cyclique ( $0 < D < 1$ ).

### 2.2.2 Convertisseur boost

Le convertisseur boost, aussi appelé hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui permet d'élever la tension d'entrée à un niveau supérieur et il est souvent utilisé comme adaptateur entre une source et une charge (figure 2.4).

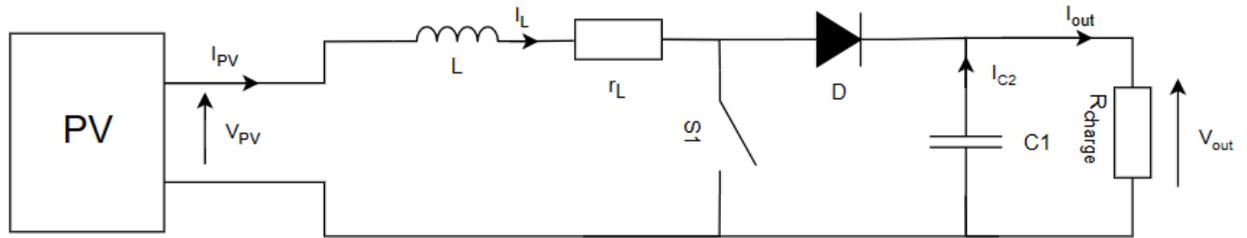


FIGURE 2.4 – Schéma électrique du convertisseur boost

Lorsque le commutateur  $S_1$  est fermé, ce qui implique que l'inductance se charge par l'intermédiaire de la tension du PV, alors la charge est déconnectée de l'alimentation. Lorsque le commutateur  $S_1$  est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traverse l'inductance, la diode, le condensateur et enfin la charge. il en résulte un transfert de l'énergie accumulée.

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

$$V_{out} = \frac{T}{T_{off}} V_{PV} = \frac{1}{1 - D} V_{PV}$$

### 2.2.3 Convertisseur buck-boost

Le convertisseur buck-boost est une alimentation à découpage qui permet abaisser ou d'élever la tension d'entrée à un niveau inférieur ou supérieur mais de polarité inverse (figure 2.5).

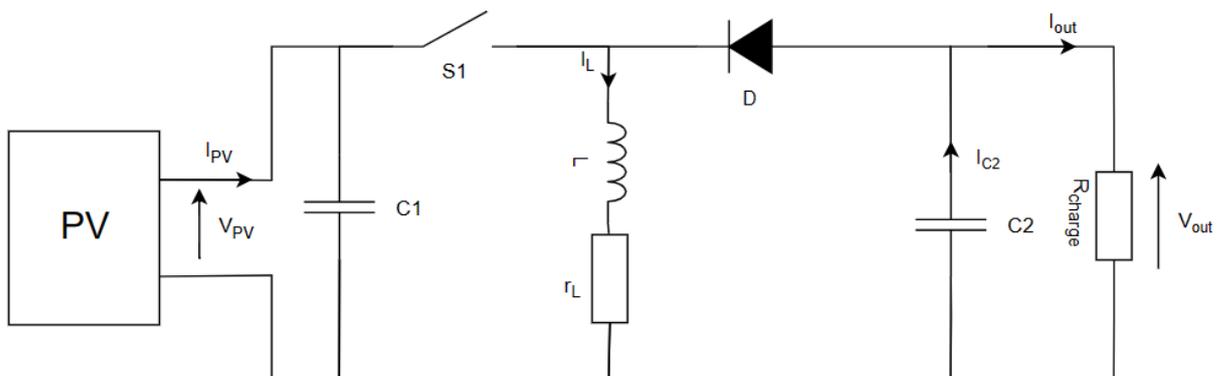


FIGURE 2.5 – Schéma électrique du convertisseur buck-boost

Lorsque le commutateur  $S_1$  est fermé, il conduit ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance. Lorsque le commutateur  $S_1$  est ouvert l'inductance transfère l'énergie accumulée vers la capacité  $C_1$  et la charge.

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

$$V_{out} = -\frac{T_{on}}{T_{off}} V_{PV} = -\frac{D}{1-D} V_{PV}$$

## 2.3 Etude du Fonctionnement du Convertisseur Statique dévolteur (convertisseur buck)

Le schéma de base du convertisseur est repris ci-dessous :

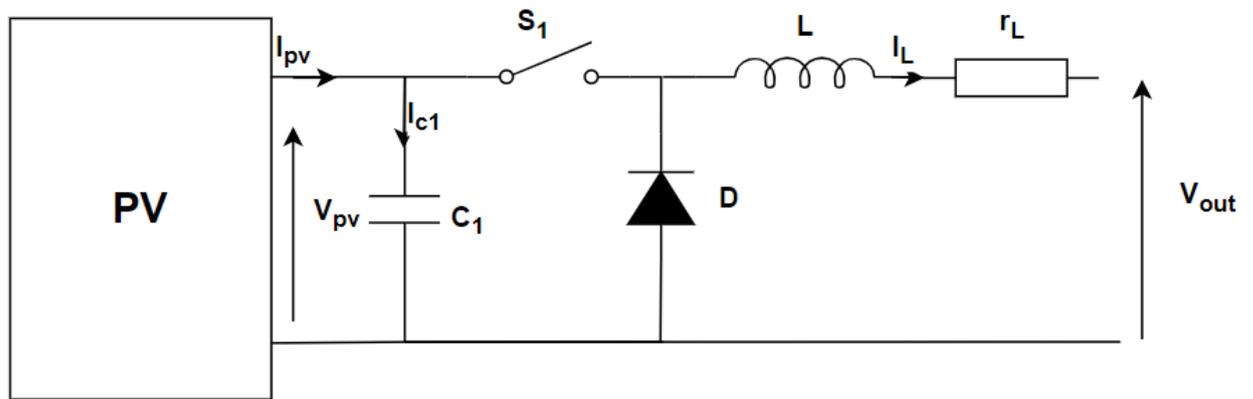


FIGURE 2.6 – Schéma électrique du convertisseur buck

Le convertisseur abaisseur utilise un interrupteur  $S_1$  (commutateur) contrôlé à travers un signal PWM (figure 2.7) pour réguler la tension d'entrée suivant deux modes de conduction continus.

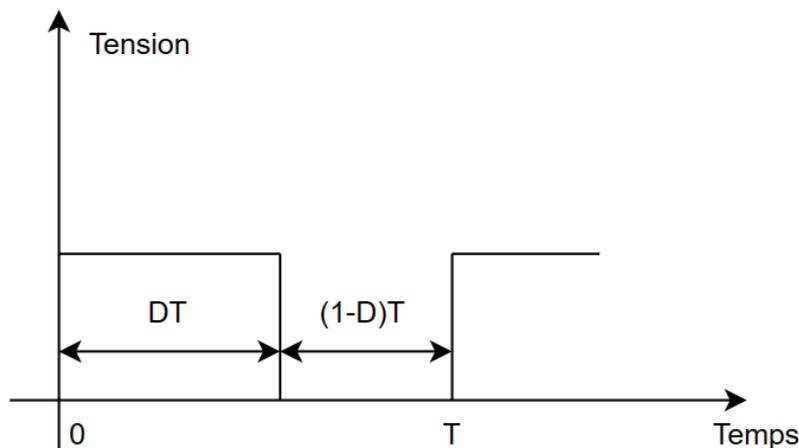


FIGURE 2.7 – Schéma d'un signal PWM

### 2.3.1 Les modes de conductions

#### Mode de fonctionnement continu (0 à DT)

Dans ce mode, une partie de l'énergie stockée dans l'inductance L est transférée. Le courant à travers l'inductance de sortie reste constant pendant toute la période de commutation (figure 2.8).

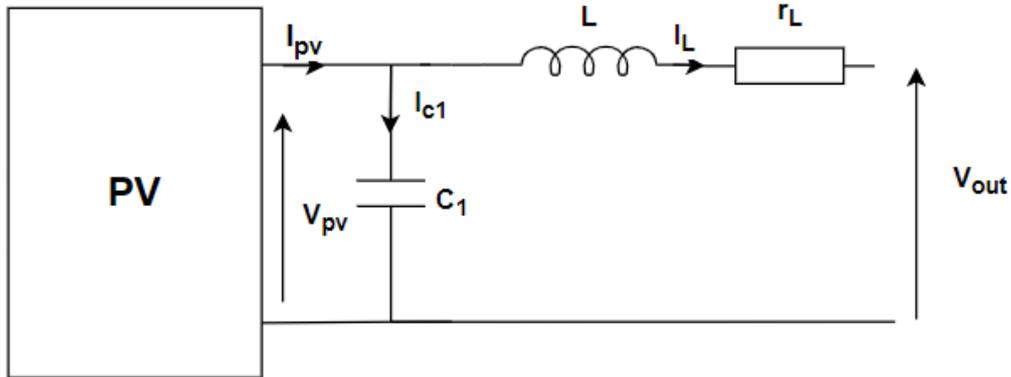


FIGURE 2.8 – Schéma électrique équivalent de 0 à DT

#### Mode de fonctionnement discontinu (DT à T)

Dans ce mode, l'énergie stockée dans l'inductance L est entièrement transférée. Le courant dans l'inductance s'épuise avant la fin de la période de commutation, résultant en un courant discontinu dans l'inductance (figure 2.9).

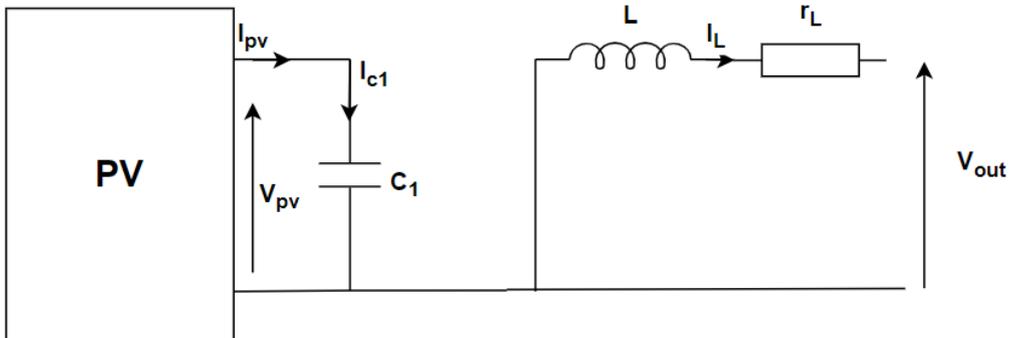


FIGURE 2.9 – Schéma électrique équivalent de DT à T

En appliquant les lois des nœuds et des mailles nous obtenons :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L = V_{PV} - V_{out} \\ C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - I_L \end{cases} \quad \text{De } 0 \text{ à } DT \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L = -V_{out} \\ C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} \end{cases} \quad \text{De } DT \text{ à } T \quad (2.2)$$

Dans le cas général :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} + R_L I_L = DV_{PV} - V_{out} \\ C_1 \frac{dV_{PV}}{dt} = I_{PV} - DI_L \end{cases} \quad \text{De } 0 \text{ à } T \text{ avec } D \in [0, 1] \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{I_{PV} - DI_L}{C_1} \\ \frac{dI_L}{dt} = \frac{DV_{PV} - V_{out} - R_L I_L}{L} \end{cases} \quad (2.4)$$

Nous avons un système non linéaire sous la forme :

$$\dot{x} = f(x, u)$$

Avec  $V_{PV}$  et  $I_L$  sont les états du système et  $D$  est la commande.

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{I_{PV} - DI_L}{C_1} \\ \frac{DV_{PV} - V_{out} - R_L I_L}{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

## 2.4 Linéarisation du système autour d'un point de fonctionnement

### 2.4.1 Calcul des points de fonctionnements

Pour cela on va résoudre les équations suivantes :

$$f(x_0, u_0) = \begin{bmatrix} \frac{I_{PV_0} - DI_{L_0}}{C_1} \\ \frac{DV_{PV_0} - V_{out} - R_L I_{L_0}}{L} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.6)$$

On trouve :

$$\begin{cases} I_{L_0} = \frac{I_{PV_0}}{D_0} \\ D_0 = \frac{V_{out} + \sqrt{V_{out}^2 + 4R_L I_{PV_0} V_{PV_0}}}{2V_{PV_0}} \end{cases} \quad (2.7)$$

### 2.4.2 Représentation d'état du convertisseur

A l'aide du Jacobian du système nous démontrons la matrice d'état  $A$  et la matrice de commande  $B$  :

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_0, u=u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial V_{PV}} & \frac{\partial f_1}{\partial I_L} \\ \frac{\partial f_2}{\partial V_{PV}} & \frac{\partial f_2}{\partial I_L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-D_0}{C_1} \\ \frac{D_0}{L} & \frac{-R_L}{L} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{x=x_0, u=u_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial D} \\ \frac{\partial f_2}{\partial D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-I_{L_0}}{C_1} \\ \frac{V_{PV_0}}{L} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Notre système peut s'écrire sous la représentation d'état suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{PV} \\ \dot{I}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-D_o}{C_1} \\ \frac{D_o}{L} & \frac{-R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{PV} - V_{PV_0} \\ I_L - I_{L_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-I_{L_0}}{C_1} \\ \frac{V_{PV_0}}{L} \end{bmatrix} [D - D_0] \quad (2.10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{PV} - V_{PV_0} \\ I_L - I_{L_0} \end{bmatrix}$$

On pose le changement de variable :

$$\begin{aligned} U &= D - D_0 \\ e_1 &= V_{PV} - V_{PV_0} \\ e_2 &= I_L - I_{L_0} \end{aligned}$$

L'ajout d'un troisième état qui est l'intégrale de l'erreur  $e_0 = \int e_1 dt$  va nous permettre d'annuler l'erreur statique sur la tension.

Et donc le système devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_0 \\ \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-D_o}{C_1} \\ 0 & \frac{D_o}{L} & \frac{-R_L}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-I_{L_0}}{C_1} \\ \frac{V_{PV_0}}{L} \end{bmatrix} U \quad (2.11)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_0 \\ e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$$

Notre système est un système à commutation qui change en fonction de la température et de l'irradiation. On peut l'écrire sous la forme suivante :

$$\dot{x} = A_i x + B_i u \quad (2.12)$$

Nous avons choisis neuf points de fonctionnement basés sur des combinaisons de température (23, 25, 27) et d'irradiation (600, 800, 1000). Ces dernières sont représentatifs des conditions réelles auxquelles un panneau photovoltaïque est souvent soumis.

Ce qui résulte en un système à neuf commutations dont les points de fonctionnements pour chaque valeur de (T,G) sont calculés avec le programme Matlab (voir annexe A programme A.1).

Le tableau résume les résultats :

T/G	600	800	1000
23	$V_{mpp} = 16.1351 V$ $I_{mpp} = 3.0065 A$ $I_{L_0} = 3.6085 A$ $D_0 = 0.8332$	$V_{mpp} = 15.9173 V$ $I_{mpp} = 4.0087 A$ $I_{L_0} = 4.6091 A$ $D_0 = 0.8697$	$V_{mpp} = 15.6995 V$ $I_{mpp} = 5.0108 A$ $I_{L_0} = 5.5346 A$ $D_0 = 0.9054$
25	$V_{mpp} = 16.0361 V$ $I_{mpp} = 3.0139 A$ $I_{L_0} = 3.5965 A$ $D_0 = 0.8380$	$V_{mpp} = 15.8183 V$ $I_{mpp} = 4.0185 A$ $I_{L_0} = 4.5938 A$ $D_0 = 0.8748$	$V_{mpp} = 15.6004 V$ $I_{mpp} = 5.0232 A$ $I_{L_0} = 5.5161 A$ $D_0 = 0.9106$
27	$V_{mpp} = 15.9371 V$ $I_{mpp} = 3.0213 A$ $I_{L_0} = 3.5843 A$ $D_0 = 0.8429$	$V_{mpp} = 15.7193 V$ $I_{mpp} = 4.0284 A$ $I_{L_0} = 4.5783 A$ $D_0 = 0.8799$	$V_{mpp} = 15.5014 V$ $I_{mpp} = 5.0355 A$ $I_{L_0} = 5.4974 A$ $D_0 = 0.9160$

TABLEAU 2.1 – Tableau des points de fonctionnements

## 2.5 Estimation de $V_{mpp}$ et $I_{mpp}$

L'estimation des paramètres  $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$  est essentielle dans la commande MPPT afin d'obliger notre système à fonctionner à son optimum.

Le tableau suivant regroupe les différents paramètres utilisés dans l'estimation de  $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$ .

Paramètres	Valeurs
Courant du court circuit dans les conditions STC ( $I_{ccSTC}$ )	5.59 A
Température dans les conditions STC ( $T_{STC}$ )	25°C
Irradiation dans les conditions STC ( $G_{STC}$ )	1000 W/m <sup>2</sup>
Température nominale de fonctionnement de la cellule ( $T_{NOCT}$ )	47°C
Coefficient de la température du courant de court circuit ( $k_T$ )	0.00123 1/°C

TABLEAU 2.2 – Paramètres pour l'approximation

Le courant du court circuit  $I_{cc}$  est exprimé en fonction de la température ambiante et de l'irradiation par l'équation suivante [19] :

$$I_{cc} = I_{ccSTC} \frac{G}{G_{STC}} (1 + k_T(T - T_{STC})) \quad (2.13)$$

La température de fonctionnement de la cellule  $T_m$  dépend de l'irradiation G et de la température ambiante T, selon l'équation suivante [15] :

$$T_m = T + \left( \frac{T_{NOCT} - T_{STC}}{G_{STC}} \right) G \quad (2.14)$$

En utilisant une régression linéaire et les caractéristiques du panneau la tension du circuit ouvert peut être donnée par [15] :

$$V_{oc} = 20.372 - 0.05626T_m \quad (2.15)$$

Le courant et la tension au point maximal  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$  sont approximativement égaux au courant de court-circuit  $I_{cc}$  et à la tension du circuit ouvert  $V_{oc}$  respectivement multiplié par une constante  $k_I$  et  $k_V$ .

$$V_{mpp} = k_V V_{oc} \quad (2.16)$$

$$I_{mpp} = k_I I_{cc} \quad (2.17)$$

Ces constantes sont identifiées en utilisant la méthode des moindres carrés :

$$V_{mpp} = 0.88V_{oc} \quad (2.18)$$

$$I_{mpp} = 0.8986I_{cc} \quad (2.19)$$

Cette approximation fournit des estimations de  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$  en fonction de la température et de l'irradiation avec une marge d'erreur de 0 à 5%.

## Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous avons exploré en détail le fonctionnement des convertisseurs DC-DC, avec une attention particulière portée au convertisseur buck. Une nouvelle modélisation mathématique de ce convertisseur a été abordée, basée sur la linéarisation du système autour de plusieurs points de fonctionnement. Cette modélisation sera utilisée par la suite pour synthétiser les lois de commande MPPT.

## CHAPITRE

### 3

# SYNTHÈSE DE LOIS DE COMMANDE

## Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les lois de commande appliquées au convertisseur DC-DC pour l'optimisation de l'énergie d'un panneau photovoltaïque.

Pour commencer, une approche classique pour assurer le suivi du MPP est l'utilisation d'une commande PI (Proportionnelle-Intégrale) essentielle pour stabiliser et réguler la tension de sortie du PV.

Par la suite, on considérera notre système comme un système à commutations, ce qui nécessite des approches plus avancées pour concevoir une commande robuste et stable. Des outils tels que les Inégalités Matricielles Linéaires (LMI) et le Lemme de Schur sont utilisés pour synthétiser une commande optimale qui garantit la stabilité et la robustesse du système même sous des conditions variables.

---

## Synthèse d'un correcteur PI

La figure 3.4 représente un schéma bloc de commande d'un système avec un correcteur.

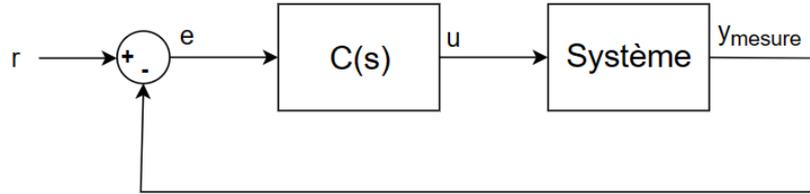


FIGURE 3.1 – Schéma bloc système avec correcteur

avec

$r$  : La référence

$e$  : L'erreur

$u$  : La commande

$y_{mesure}$  : La sortie mesurée

La fonction de transfert d'un correcteur PI est :

$$C(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (3.1)$$

On prenant une combinaison convexe de tous les sous-systèmes cités précédemment :

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i A_i}{N} \quad (3.2)$$

$$B_m = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i B_i}{N} \quad (3.3)$$

En prenant  $\lambda_i = 1$  pour avoir une équité entre tous les sous-systèmes, on trouve :

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & -386.1825 \\ 354.0006 & -166.6667 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$B_m = \begin{bmatrix} -1761.2 \\ 6651.5 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

On trouve une fonction de transfert en boucle ouverte de notre système à partir de la représentation d'état suivant le programme Matlab (voir annexe A programme A.2) :

$$G(s) = \frac{-1761s - 2.862 * 10^6}{s^2 + 166.7s + 1.367 * 10^5} = \frac{a_1 s + a_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \quad (3.6)$$

Les pôles de notre système sont :

$$p_1 = -83,3 + 360.23i \quad p_2 = -83,3 - 360.23i \quad (3.7)$$

La fonction transfert en boucle fermée est décrit par :

$$F(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)} \quad (3.8)$$

En remplaçant G(s) et C(s) par leur expression, on trouve :

$$F(s) = \frac{(a_1s + a_0)(K_p s + K_i)}{s^3 + (b_1 + a_1K_p)s^2 + (b_0 + a_1K_i + a_0K_p)s + a_0K_i} \quad (3.9)$$

On choisit les pôles suivants selon la décroissance de l'erreur :

$$S_d = \{s_0 = -170 + 352.89i, s_1 = -170 - 352.89i, s_2 = -50\} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} P(s) &= (s - s_0)(s - s_1)(s - s_2) \\ &= s^3 - (s_2 + s_1 + s_0)s^2 + (s_2(s_0 + s_1) + s_0s_1)s - s_0s_1s_2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

par identification on trouve :

$$K_p = -\frac{(s_0 + s_1 + s_2 + b_1)}{a_1} = -0.1268 \quad (3.12)$$

$$K_i = -\frac{s_0 * s_1 * s_2}{a_0} = -2.6805 \quad (3.13)$$

### 3.1 Simulation de la commande PI sur simulink

La figure 3.2 représente un schéma bloc de la commande avec un contrôleur PI et ses étapes.

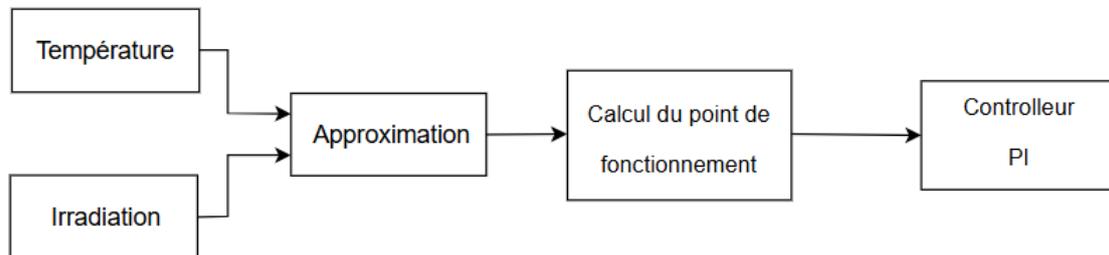


FIGURE 3.2 – Commande PI d'un hacheur Buck

La figure 3.3 représente le modèle simulink d'un hacheur buck qui va faire l'adaptation d'impédance entre le PV et la batterie.

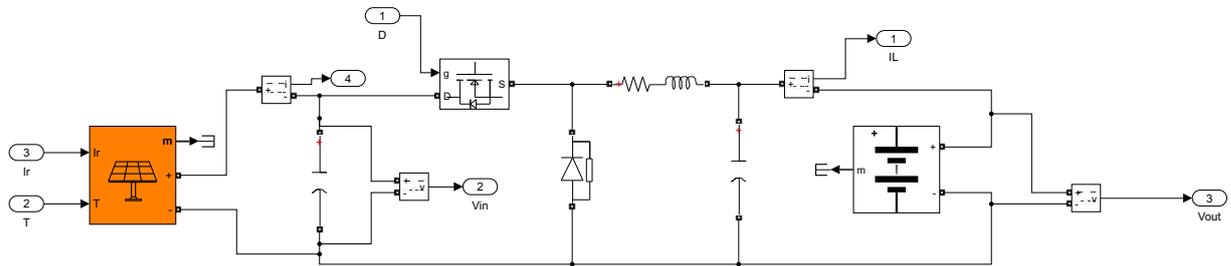


FIGURE 3.3 – Circuit simulink du hacheur buck

Le dimensionnement du hacheur est fait dans le chapitre quatre :

Capacité  $C_1 = 2200 \mu F$

Capacité  $C_2 = 22 \mu F$

Inductance  $L = 2.4 mH$

Résistance de l'inductance  $R_L = 0.4 \Omega$

Temps d'échantillonnages  $T_e = 10^{-6} s$

Tension de sortie  $V_{out} = 12 V$

La figure 3.4 représente le schéma simulink de la commande PI avec le système.

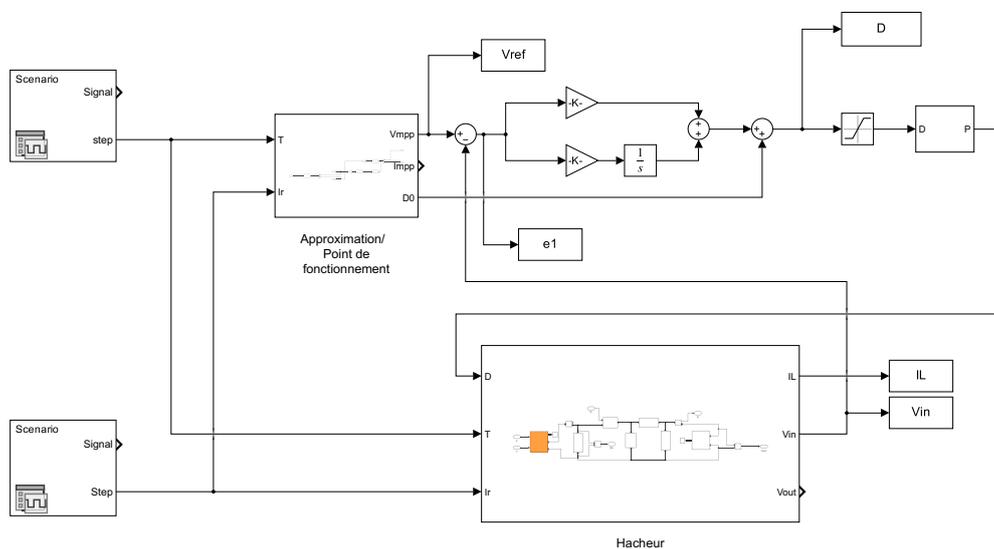


FIGURE 3.4 – Schéma Simulink du hacheur avec le correcteur PI

Dans notre cas nous allons varier les valeurs de température et d'irradiation suivant les scénarios définis dans les figures 3.5 et 3.6.

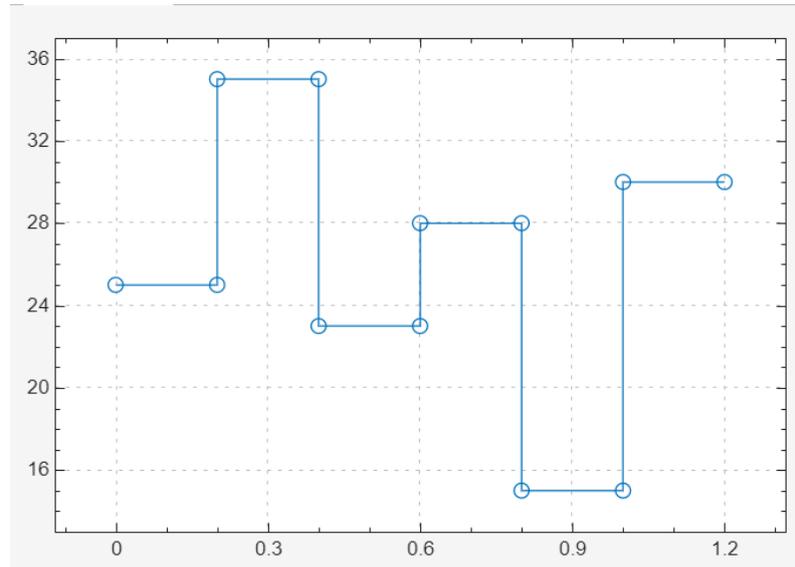


FIGURE 3.5 – Scénario de la température

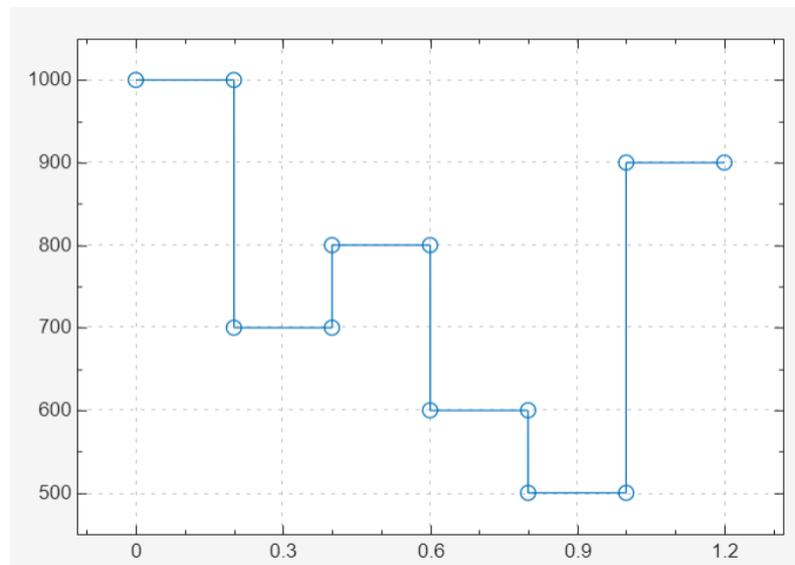


FIGURE 3.6 – Scénario de l'irradiation

### 3.1.1 Résultats de simulation et interprétation

Les figures (3.7 et 3.8) représentent les résultats de la tension fournie par le PV ainsi que la variation du rapport cyclique suite à une régulation avec un régulateur PI.

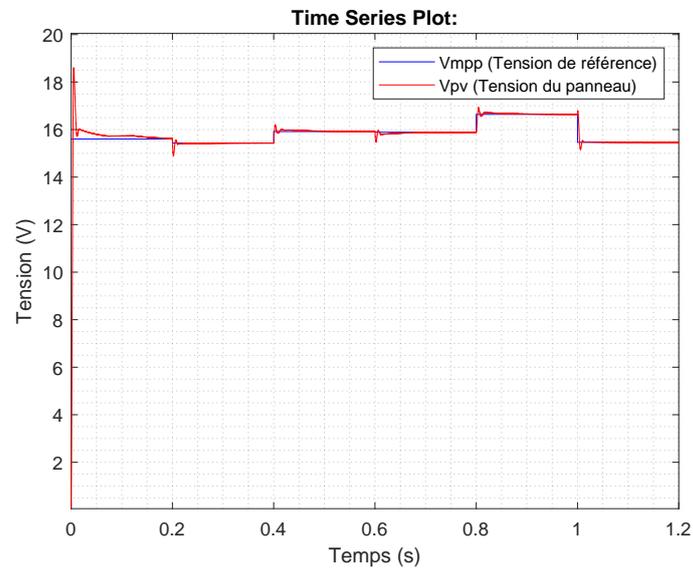


FIGURE 3.7 – Représentation de la tension d'entrée en fonction du temps après régulation PI

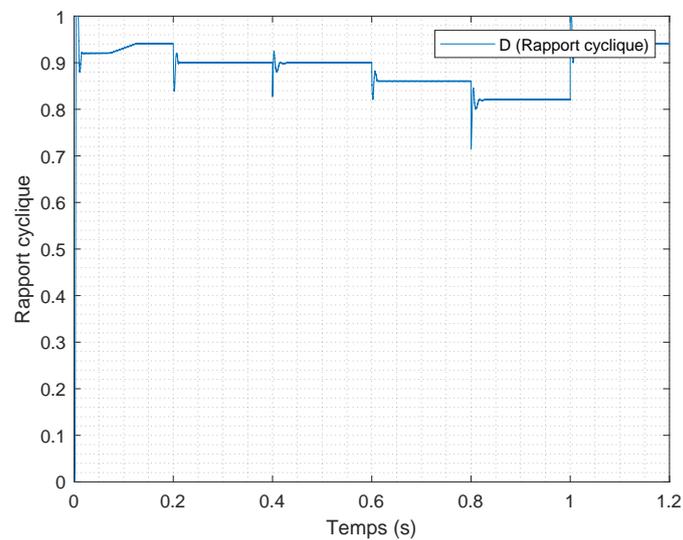


FIGURE 3.8 – Représentation du rapport cyclique en fonction du temps

On remarque que la réponse du système suit notre référence imposée par l'approximation de  $V_{mpp}$  même si il y a un changement brusque de la température ou de l'irradiation.

Le contrôleur PI nous a permis de réguler la tension délivrée par le PV à la tension optimale, cependant il ne garantit pas la stabilité globale du système lors des commutations.

## 3.2 Synthèse de la commande optimale

Le panneau photovoltaïque fonctionne en mode MPPT grâce à un hacheur commandé en entrée. Nous avons vu précédemment que ce convertisseur peut être modélisé par un système à neuf commutations.

### 3.2.1 Système à commutations

Un système à commutations est un système dynamique composé d'un nombre fini de sous-systèmes et d'une règle logique prédéfinie (fonction de commutation) qui détermine par des conditions internes au système ou par des signaux externes la commutation entre ces sous-systèmes.[9]

### 3.2.2 Stabilité des système à commutations

Afin de garantir la stabilité du système à commutations, on utilisera les LMI afin de trouver une fonction de Lyapunov quadratique commune pour tous ces sous-systèmes.

#### Fonctions définies positives

Une fonction  $V : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}$  est semi-définie positive dans  $\mathcal{D}$  si

- $V(x) = 0$  si et seulement si  $x = 0$ .
- $V(x) \geq 0, \forall x \in \mathcal{D} - \{0\}$ .

Une fonction  $V : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}$  est définie positive dans  $\mathcal{D}$  si

- $V(x) > 0, \forall x \in \mathcal{D} - \{0\}$ .

$V : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  est une fonction continue définie positive, on dit que  $V$  est une fonction de Lyapunov commune pour le système  $\dot{x} = f_i(x)$  s'il existe une fonction continue  $W : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  définie positive telle que :

$$\frac{\partial V}{\partial x} f_i(x) \leq -W \quad \forall i \in 1, 2, \dots, 9 \quad (3.14)$$

### 3.3 Définition d'une LMI

Les inégalités matricielles linéaires (LMI) sont utilisées en théorie du contrôle pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles. Elles permettent de garantir la stabilité et les performances des systèmes dynamiques. Les LMI sont un outil puissant pour la conception de régulateurs et la résolution de problèmes de contrôle robuste. Ce qui les rend attrayantes, c'est qu'elles peuvent être résolues efficacement à l'aide de la programmation convexe.

On appelle une inégalité matricielle linéaire notée (LMI) l'inégalité suivante [7] :

$$F(x) = F_0 + \sum_{n=1}^m x_n F_n(x) > 0 \quad (3.15)$$

avec  $F_i(x)$  les matrices réelles, carrées et symétriques :  $F_i(x) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$  et  $x \in \mathbb{R}^m$ .

### 3.4 Lemme de Schur

Le lemme du complément de Schur converti une classe d'inégalités non linéaires à des inégalités matricielles linéaires (LMI) convexes qui apparaissent régulièrement dans les problèmes de commande [7]. Les inégalités non linéaires convexes sont :

$$\begin{cases} R(x) > 0 \\ Q(x) - S(x)R^{-1}(x)S^T(x) > 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Le lemme du complément de Schur convertit ces inégalités non linéaires convexes à une LMI équivalente :

$$\begin{bmatrix} Q(x) & S(x) \\ S^T(x) & R(x) \end{bmatrix} > 0 \quad (3.17)$$

### 3.5 Synthèse de la commande LQR en utilisant les LMI

Dans cette partie nous synthétiserons une commande LQR en utilisant la théorie des LMI et une fonction de Lyapunov commune afin de résoudre un LQR dans tous le domaine d'utilisation, l'objectif de cette méthode est de trouver des gains optimaux sur quelque cas du sous systèmes pour une commande  $u = K_i x$  pour un système incertain du type :

$$\dot{x} = A_i x + B_i u \quad \text{avec } i=1, \dots, L \quad (3.18)$$

La mesure des performances est donnée par le coût quadratique standard à horizon infini :

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.19)$$

Les matrices  $Q, R \in \mathbb{R}^{n \times n}$  sont appelées matrices de pondérations avec :  
 $Q = Q^T \geq 0, R = R^T > 0$ .

On définit une fonction de Lyapunov  $V(x) = x^T P x$  avec une matrice  $P$  symétriques semi définie positive ( $P = P^T \geq 0$ ).

On peut écrire :

$$\begin{aligned} J &= x_0^T P x_0 - x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \\ J &= x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} \left( \frac{d}{dt} x^T P x + x^T Q x + u^T R u \right) dt \end{aligned} \quad (3.20)$$

car  $[x^T P x]_0^{\infty} = 0 - x_0^T P x_0$

On a :

$$\frac{d}{dt} x^T P x = \dot{x}^T P x + x^T P \dot{x} \quad (3.21)$$

On remplace (3.18) dans (3.21).

On trouve :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} x^T P x &= (A_i x + B_i u)^T P x + x^T P (A_i x + B_i u) \\ &= x^T A_i^T P x + u^T B_i^T P x + x^T P A_i x + x^T P B_i u \\ \frac{d}{dt} x^T P x &= x^T (A_i^T P + P A_i) x + u^T B_i^T P x + x^T P B_i u \end{aligned} \quad (3.22)$$

On remplace (3.22) dans (3.20).

On trouve :

$$\begin{aligned} J &= x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} (x^T (A_i^T P + P A_i) x + u^T B_i^T P x + x^T P B_i u + x^T Q x + u^T R u) dt \\ J &= x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} (x^T (A_i^T P + P A_i + Q) x + u^T B_i^T P x + x^T P B_i u + u^T R u) dt \end{aligned} \quad (3.23)$$

On remplace  $u = K_i x$  dans (3.23) avec  $K = -R^{-1} B^T P$ .

$$\begin{aligned} J &= x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} (x^T (A_i^T P + P A_i + Q) x + x^T K_i^T B_i^T P x + x^T P B_i K_i x + x^T K_i^T R K_i x) dt \\ &= x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} (x^T (A_i^T P + P A_i + Q + K_i^T B_i^T P + P B_i K_i + K_i^T R K_i) x) dt \\ J &= x_0^T P x_0 + \int_0^{\infty} (x^T ((A_i + B_i K_i)^T P + P (A_i + B_i K_i) + Q + K_i^T R K_i) x) dt \end{aligned} \quad (3.24)$$

Afin de minimiser la fonction de coût on résoud le problème de programmation semi-définie suivant :

$$\begin{aligned} \min_{P,K} tr(P) \\ SC (A_i + B_i K_i)^T P + P(A_i + B_i K_i) + Q + K_i^T R K_i < 0 \end{aligned} \quad (3.25)$$

qui devient :

$$\begin{aligned} \min_{P,K} tr(P) \\ SC (A_i + B_i K_i)^T P + P(A_i + B_i K_i) < -Q - K_i^T R K_i \end{aligned} \quad (3.26)$$

Il s'agit d'un problème non convexe (produit de deux matrices variables P et K) [7], on peut le transformer en un problème convexe en faisant le changement de variable suivant :  $Y = P^{-1}$ ,  $L_i = K_i Y$ .

$$\begin{aligned} \max_{Y,L} tr(Y) \\ SC P^{-1} [(A_i + B_i K_i)^T P + P(A_i + B_i K_i)] P^{-1} < P^{-1} (-Q - K_i^T R K_i) P^{-1} \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \max_{Y,L} tr(Y) \\ SC P^{-1} A_i^T + P^{-1} K_i^T B_i^T + A_i P^{-1} + B_i K_i P^{-1} < -P^{-1} Q P^{-1} - P^{-1} K_i^T R K_i P^{-1} \end{aligned} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} \max_{Y,L} tr(Y) \\ SC Y A_i^T + L_i^T B_i^T + A_i Y + B_i L_i < -Y Q Y - L_i^T R L_i \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} \max_{Y,L} tr(Y) \\ SC - (A_i Y + B_i L_i)^T - (A_i Y + B_i L_i) - Y Q Y - L_i^T R L_i > 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

et en appliquant un complément de Schur sur la deuxième contrainte :

$$\begin{aligned} \max_{Y,L} tr(Y) \\ SC - (A_i Y + B_i L_i)^T - (A_i Y + B_i L_i) - \begin{bmatrix} Y & L_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ L \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \quad (3.31)$$

On pose :

$$Q(x) = -(A_i Y + B_i L_i)^T - (A_i Y + B_i L_i) \quad (3.32)$$

$$S(x) = \begin{bmatrix} Y & L_i^T \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$R^{-1}(x) = \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

on trouve :

$$\begin{aligned} \max_{Y,L} tr(Y) \\ SC \begin{bmatrix} -(A_i Y + B_i L_i)^T - (A_i Y + B_i L_i) & Y & L_i^T \\ Y & Q^{-1} & 0 \\ L_i & 0 & R^{-1} \end{bmatrix} > 0 \end{aligned} \quad (3.35)$$

En résolvant ce problème on peut trouver une matrice  $P$  et les matrices  $L_i$  de chaque cas et enfin calculer les gains de commande :

$$K_i = L_i P \quad (3.36)$$

On reprend le même cas décrit précédemment avec :

$$R = 10 \text{ et } Q = \begin{bmatrix} 1000 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

Un programme Matlab calcule ces gains (voir annexe A programme A.1) en utilisant la bibliothèque YALMIP, voici les résultats :

$$P = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 1260 & 2226 \\ 0 & 2226 & 11304 \end{bmatrix}$$

T/G	600	800	1000
23	$K_1 = [45.4618, 0.3547, -0.1321]$	$K_2 = [53.2983, 0.4217, -0.1448]$	$K_3 = [67.0827, 0.5396, -0.1670]$
25	$K_4 = [45.2384, 0.3530, -0.1314]$	$K_5 = [53.0473, 0.4197, -0.1441]$	$K_6 = [66.7848, 0.5372, -0.1662]$
27	$K_7 = [45.0145, 0.3512, -0.1307]$	$K_8 = [52.7969, 0.4178, -0.1433]$	$K_9 = [66.4774, 0.5348, -0.1653]$

TABLEAU 3.1 – Tableau des gains de la commande optimale

### 3.6 Fonction de commutation

Afin de pouvoir commander sur des points hors des point préalablement calculés, la fonction de commutation doit choisir le gain adéquat pour la commande. Cette décision est basé sur le calcul de  $V_{mpp}$  et va le comparer avec les neuf autres pour trouver le plus proche (voir annexe A programme A.3).

### 3.7 Simulation de la commande optimale sur simulink

La figure 3.9 représente un schéma bloc de la commande avec ses étapes.

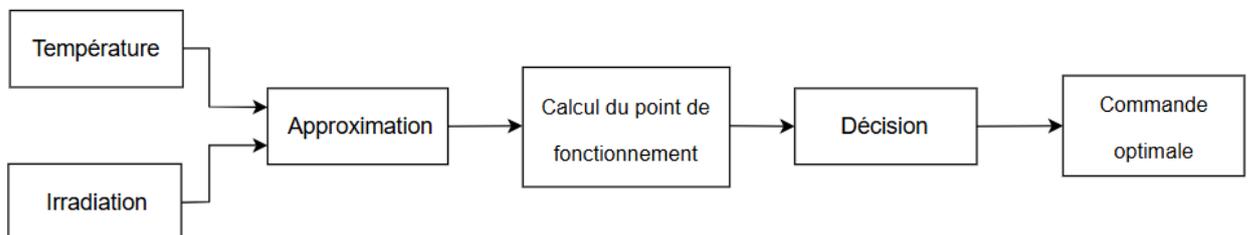


FIGURE 3.9 – Schéma bloc de la commande

Dans ce cas nous reprenons le même scénario de la température et de l'irradiation (figure 3.5 et 3.6). La figure 3.10 représente en détail le bloc de la commande optimale.

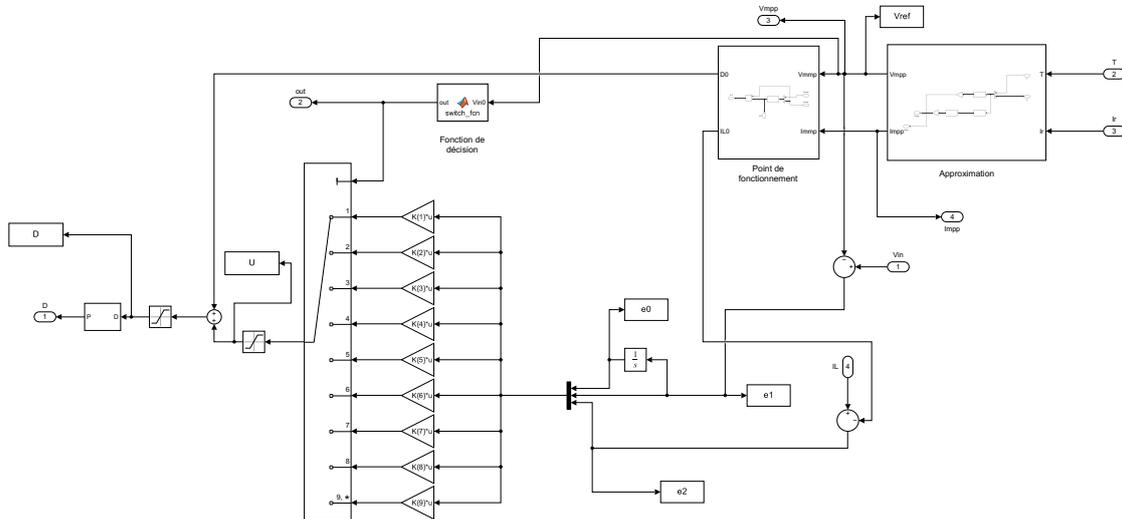


FIGURE 3.10 – Schéma Simulink de la commande

La figure 3.11 représente le schéma Simulink de la commande optimale avec le système PV.

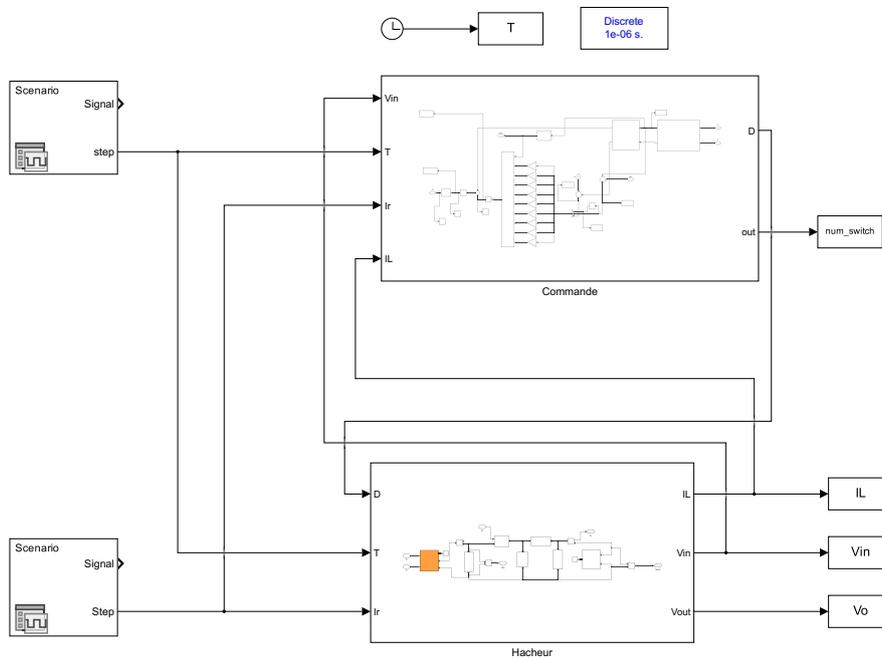


FIGURE 3.11 – Schéma Simulink du hacheur avec la commande

Les figures (3.12 et 3.13) représentent les résultats de la tension du PV et la valeur de rapport cyclique suite à une régulation avec une commande optimale.

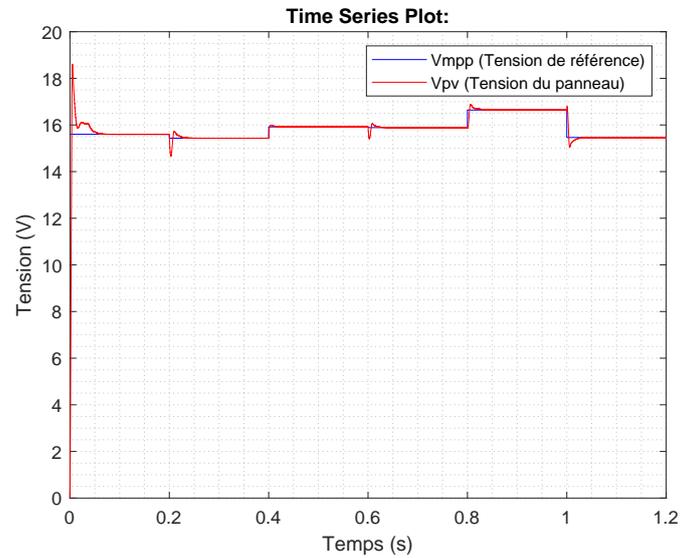


FIGURE 3.12 – Représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps

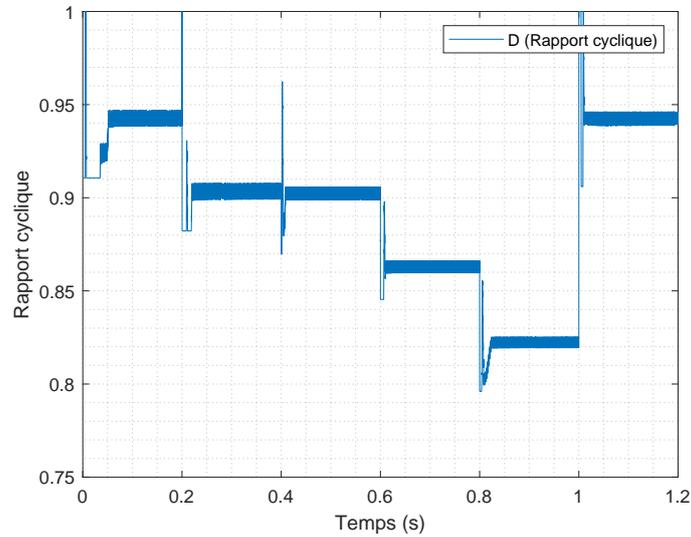


FIGURE 3.13 – Représentation du rapport cyclique par rapport au temps

La figure 3.14 représente les décisions choisies par la fonction de commutation.

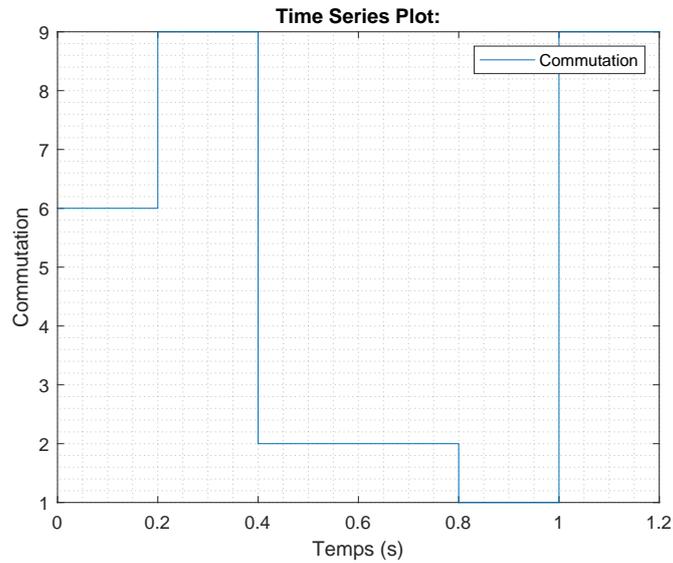


FIGURE 3.14 – Représentation de la commutation par rapport au temps

### 3.8 Comparaison entre les deux commandes

La figure 3.15 représente les résultats de la tension de sortie du PV (tension d'entrée du hacheur) commandée par deux commandes.

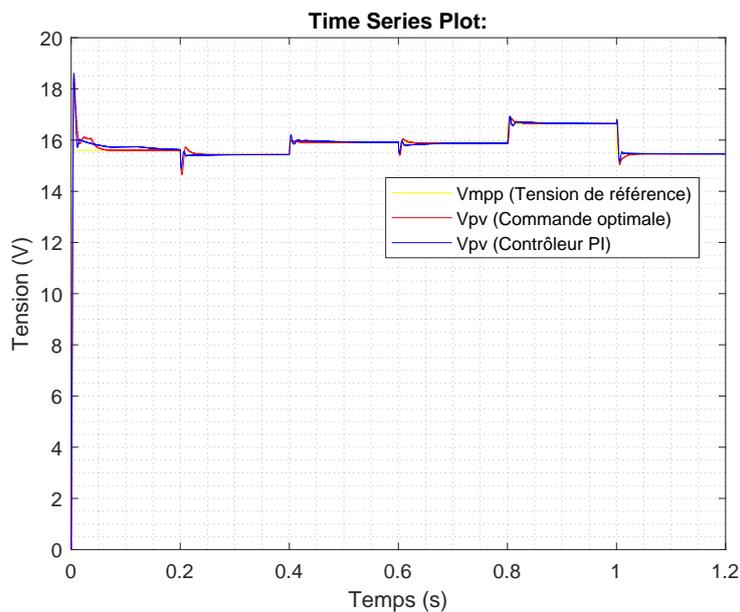


FIGURE 3.15 – Représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps

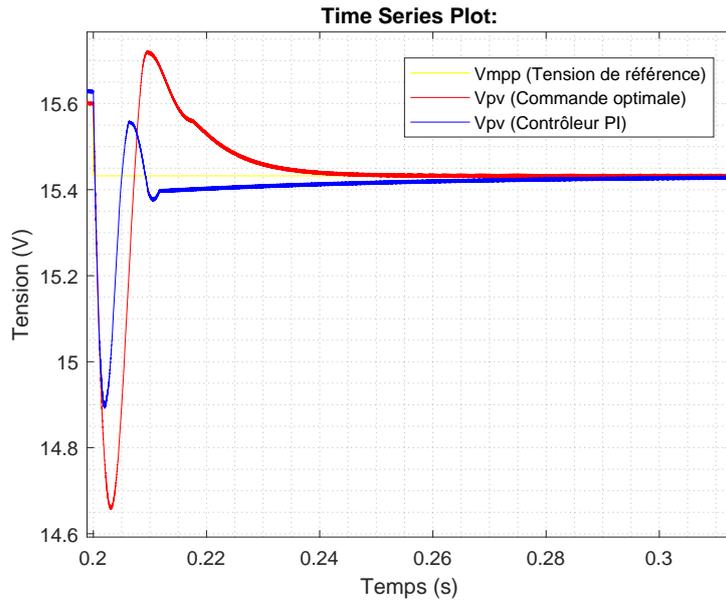


FIGURE 3.16 – Zoom sur la représentation de la tension d’entrée du hacheur par rapport au temps

### 3.8.1 Intérprétation des résultats

On remarque aussi que la réponse du système avec la commande optimale par LMI présente un dépassement plus grand que celui avec une commande PI mais une convergence plus rapide vers le point  $V_{mpp}$

On remarque que la réponse du système suit notre référence imposée par l’approximation de  $V_{mpp}$  et  $I_{mpp}$  même si il y a des variations brusques de la température ou de l’irradiation.

### 3.8.2 Erreur quadratique moyenne

$$e_m = \frac{\sum_{i=0}^N e_i^2}{N} \quad (3.37)$$

$N$  : Le nombre de points

$e_i$  : L’erreur pour chaque point

On trouve pour chaque commande

$$e_{m_{PI}} = 0.3004 \quad (3.38) \quad e_{m_{LMI}} = 0.3066 \quad (3.39)$$

On remarque que les erreurs quadratiques moyennes sont presque les même, cependant avec l’approche des LMI nous avons démontré et assuré la stabilité pour un système non-linéaire contrairement à un contrôleur PI.

## Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons mis en œuvre deux types de commandes pour optimiser le suivi du point de puissance maximale (MPP) : une commande classique PI (Proportionnelle-Intégrale) et une commande avancée (commande optimale). Le contrôleur PI s'est avéré efficace pour réguler la tension de sortie du système photovoltaïque, mais son utilisation seule ne garantit pas toujours la stabilité du système. Pour remédier à cette limitation, une approche basée sur la commande LQR, utilisant les LMI (Linear Matrix Inequalities), a été présentée comme une solution robuste assurant à la fois stabilité et performances optimales. Les simulations ont prouvé l'efficacité des deux approches, assurant une optimisation de l'énergie solaire captée par les panneaux photovoltaïques.

## CHAPITRE

### 4

# CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION DE LA COMMANDE MPPT

## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons procéder à la validation expérimentale des résultats théoriques et des simulations présentés dans les chapitres précédents. Pour ce faire, nous présenterons le matériel nécessaire à la mise en œuvre de la commande MPPT pour un générateur photovoltaïque.

Une partie importante du chapitre est dédiée à la réalisation du hacheur Buck, un convertisseur DC/DC essentiel pour le fonctionnement de la commande MPPT. Nous détaillerons le processus de dimensionnement des composants et expliquerons les choix effectués pour assurer l'efficacité et la stabilité du système.

Enfin, nous clôturons ce chapitre par les essais pratiques réalisés pour valider les performances du système MPPT conçu. Les résultats des tests, notamment les réponses du système aux variations de température et d'irradiation, seront présentés pour démontrer l'efficacité et la réactivité de la commande.

## 4.1 Méthodologie

La figure 4.1 représente le schéma bloc de la commande MPPT d'un générateur photovoltaïque avec les différentes unités de commandes et de mesures.

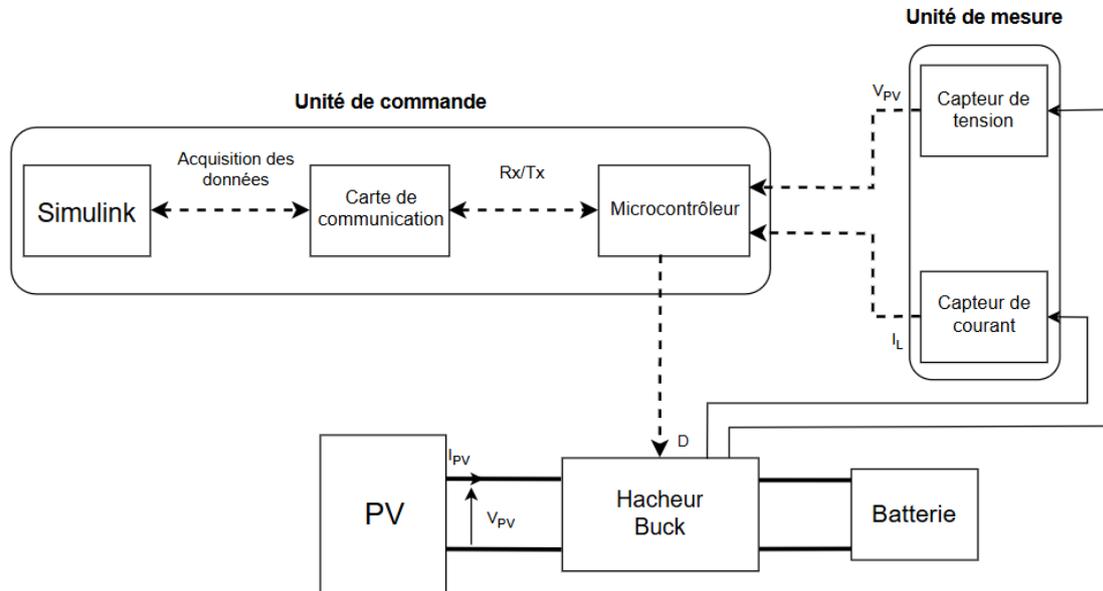


FIGURE 4.1 – Schéma bloc de la méthodologie de la commande

La commande est implémentée sur le microcontrôleur grâce à la bibliothèque Waijung, qui permet de convertir les fichiers Simulink en langage C.

La carte de communication nous permet de communiquer en temps réel avec le microcontrôleur et d'acquies les données.

Des capteurs sont utilisés pour mesurer la tension du panneau et le courant de l'inductance, valeurs qui sont ensuite utilisées pour calculer le rapport cyclique.

### 4.1.1 Unité de commande

#### 4.1.1.1 Microcontrôleur

Les microcontrôleurs sont de petits circuits intégrés qui intègrent les éléments essentiels d'un ordinateur, notamment un processeur, de la mémoire et des interfaces d'entrée/sortie, le tout sur une puce unique. Ils sont utilisés pour contrôler des dispositifs et des systèmes dans une grande variété d'applications. Notre choix s'est porté sur le micro-contrôleur STM32 pour sa compatibilité avec simulink et pour sa communication en temps réel.[13]

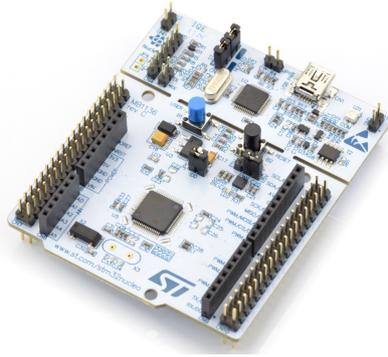


FIGURE 4.2 – Carte STM32

#### 4.1.1.2 Carte de communication

Une carte de communication, est un composant matériel qui facilite à l'ordinateur d'interagir avec des périphériques externes via des protocoles de communication série tels que UART, SPI ou I2C. Nous avons opté pour la carte cjmcu-232H qui permettra l'échange de données et de signaux entre Simulink et le micro-contrôleur. [8]



FIGURE 4.3 – Carte cjmcu-232H

#### 4.1.2 Unité de mesure

La commande MPPT nécessite une mesure précise de la tension de sortie du panneau solaire (PV) ainsi que le courant de l'inductance (figure 4.4).



FIGURE 4.4 – Circuits des capteurs

#### 4.1.2.1 Capteur de tension

Dans notre configuration, nous utilisons le capteur de tension LEM LV 25-P, qui se base sur l'effet Hall pour assurer une mesure fiable.[18]



FIGURE 4.5 – Capteur LV 25-P

#### 4.1.2.2 Capteur de courant

Le microcontrôleur ne peut pas mesurer de courant, pour cela on utilisera Le LTS 55-P de LEM, un transducteur de courant qui utilise la technologie à effet Hall et dispose d'une sortie instantanée, d'une excellente précision et une très bonne linéarité.[17]

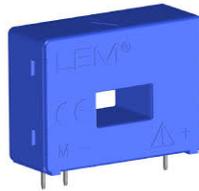


FIGURE 4.6 – Capteur LTS 55-P

## 4.2 Réalisation du hacheur

### 4.2.1 Dimensionnement du hacheur buck

Le dimensionnement d'un convertisseur DC/DC est fait en fonction du cahier de charge suivant :

Paramètres	Valeurs
Tension du panneau photovoltaïque ( $V_{PV} = V_{mpp,STC}$ )	15.9 V
Courant du panneau photovoltaïque ( $I_{PV} = I_{mpp,STC}$ )	5.03 A
Ondulation du courant de l'inductance maximale ( $\Delta i_{L,max}$ )	0.1
Ondulation de la tension de la capacité maximale ( $\Delta V_{C,max}$ )	0.05
Ondulation de la tension d'entrée maximale ( $\Delta V_{PV,max}$ )	0.15
Fréquence de commutation ( $f_s$ )	20 KH

TABLEAU 4.1 – Cahier de charge pour le dimensionnement du hacheur

D'après les équations données dans [6] :

$$L \geq \frac{V_{PV}}{4\Delta i_{L,max}f} \Rightarrow L \geq \frac{15.9}{4 * 0.1 * 20 * 10^3} \Rightarrow L \geq 1.98 \text{ mH} \quad (4.1)$$

On utilisera une inductance de valeur  $L = 2.4 \text{ mH}$ .

$$C_2 \geq \frac{\Delta i_{L,max}}{8\Delta V_{C,max}f} \Rightarrow C_2 \geq \frac{0.1}{8 * 0.05 * 20 * 10^3} \Rightarrow C_2 \geq 12.5 \text{ }\mu\text{F} \quad (4.2)$$

On utilisera une capacité de valeur  $C_2 = 22 \text{ }\mu\text{F}$ .

$$C_1 \geq \frac{I_{PV}}{\Delta V_{PV,max}f} \Rightarrow C_1 \geq \frac{5.03}{0.15 * 20 * 10^3} \Rightarrow C_1 \geq 1700 \text{ }\mu\text{F} \quad (4.3)$$

On utilise une capacité de valeur  $C_1 = 2200 \text{ }\mu\text{F}$ .

### 4.2.2 Transistor MOSFET

Un MOSFET est un transistor utilisé pour amplifier ou commuter des signaux électroniques. Il possède trois terminaux : grille (G), source (S) et drain (D). La tension appliquée à la grille contrôle le courant entre la source et le drain. Il existe deux types principaux N et P selon le type de canal. Les MOSFETs sont appréciés pour leur vitesse de commutation rapide et leur efficacité énergétique, ce qui les rend indispensables dans les applications d'électronique de puissance et de commande rapide. Dans notre cas, nous avons utilisé le MOSFET IRF 4905, qui est de type P, avec les caractéristiques suivantes : une tension de drain-source maximale de -55V, un courant drain maximal de -74A.[4]

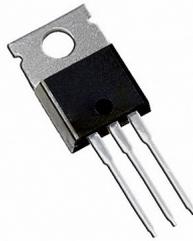


FIGURE 4.7 – MOSFET 4905

### 4.2.3 Transistor bipolaire

Un transistor bipolaire est un composant électronique à semi-conducteur qui permet de contrôler un courant électrique à l'aide d'un autre courant plus faible. Il est constitué de trois zones semi-conductrices : l'émetteur (E), la base (B) et le collecteur (C). On distingue deux types de transistors bipolaires : NPN et PNP. Dans notre cas, nous avons utilisé un transistor bipolaire 2N2222 de type NPN. Il sera placé entre la carte STM32 et le driver HCPL afin de minimiser le courant délivré par la carte.[2]



FIGURE 4.8 – transistor

#### 4.2.4 Driver HCPL

Le HCPL 31-20 est un dispositif optocoupleur de la famille des circuits intégrés. Il est utilisé pour isoler électriquement les circuits de faible puissance des circuits de puissance élevée. Ce composant intègre une diode électroluminescente infrarouge (LED) et un phototransistor dans un seul boîtier. Lorsque la LED est activée par un courant d'entrée, elle émet de la lumière infrarouge qui est détectée par le phototransistor, permettant ainsi le transfert optique du signal. Le HCPL 31-20 est souvent utilisé dans les applications nécessitant une isolation galvanique pour des raisons de sécurité ou de performances.[3]



FIGURE 4.9 – HCPL 31-20

#### 4.2.5 Circuit Snubber

Un circuit snubber est un dispositif électronique utilisé pour protéger des composants tels que les transistors, les diodes, et autres éléments de commutation contre les surtensions, les pics de courant, et les oscillations indésirables. Les snubbers sont couramment employés dans les alimentations à découpage et autres applications de conversion d'énergie où des commutations rapides se produisent.

Le dimensionnement des composants du circuit Snubber est fait à partir du cahier de charge suivant[1] :

Paramètres	Valeurs
Tension du panneau photovoltaïque ( $V_{PV} = V_{mpp,STC}$ )	15.9 V
Courant de l'inductance maximale ( $I_{L,max}$ )	6.26 A
Courant moyen qui passe à travers le snubber ( $I_{rs}$ )	0.01 A
Temps de recouvrement de la diode ( $t_f$ )	$35 * 10^{-9}$ s
Ondulation de la tension d'entrée maximale ( $\Delta V_{PV,max}$ )	0.15
Période de commutation ( $T$ )	$20 * 10^{-3}$ s

TABLEAU 4.2 – Paramètres pour le circuit snubber

Le calcul de  $R_{snubber}$  et  $C_{snubber}$  se fait grâce [20] :

$$C_{snubber} = \frac{t_f i_{L,max}}{\Delta V_{PV,max}} \geq 1.46 \mu F \quad (4.4)$$

On utilisera une capacité de valeur  $C_{snubber} = 4.7 \mu F$ .

$$R_{snubber} = \frac{t_f I_{L,max}}{2T I_{rs}} \left( \frac{V_{PV}^2}{\Delta V_{PV,max}} + \Delta V_{PV,max} \right) \geq 369.30 \Omega \quad (4.5)$$

On utilisera une capacité de valeur  $R_{snubber} = 470 \Omega$ .

### 4.2.6 Présentation du prototype

La figure 4.10 représente le prototype du hacheur Buck qui a été réalisé sur le logiciel de CAO électronique Proteus (Isis) conçue par Labcenter Electronics. Le hacheur Buck est composé d'une inductance, des condensateurs de filtrage, d'un MOSFET (IRF4905), d'un Optocoupleur (Driver HCPL) et enfin d'un circuit Snubber.

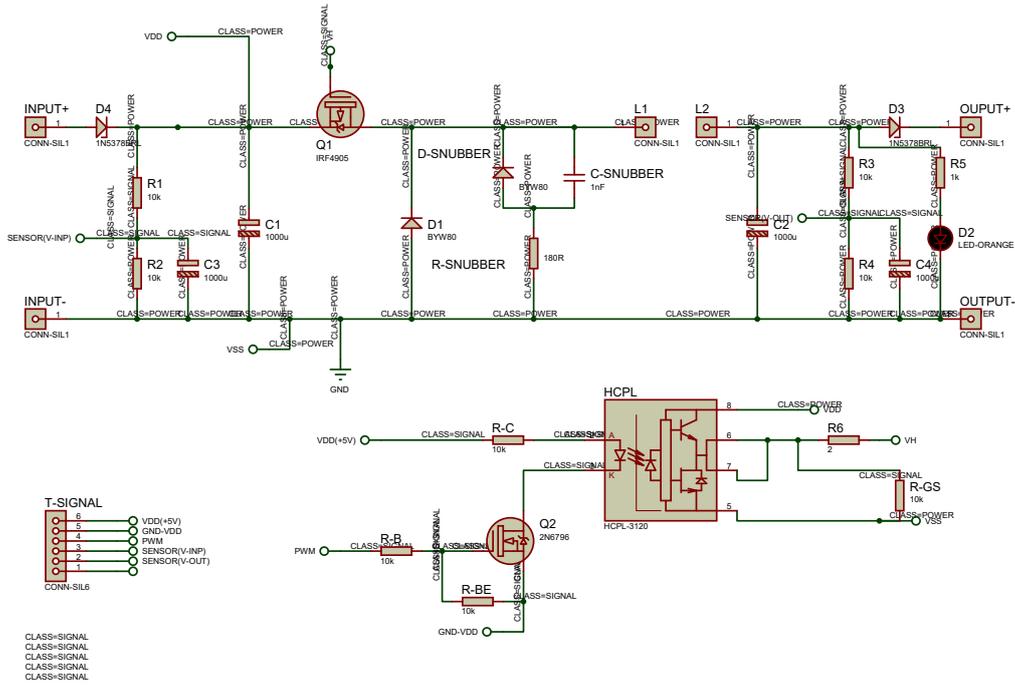


FIGURE 4.10 – Circuit proteus du hacheur buck

avec :

$$\begin{aligned}
 R_B &= 1 K\Omega & R_1 &= 100 K\Omega & C_3 &= 4.7 nF \\
 R_{BE} &= 27 K\Omega & R_2 &= 15 K\Omega & C_4 &= 100 nF \\
 R_C &= 220 \Omega & R_3 &= 4.7 K\Omega \\
 R_{GS} &= 27 K\Omega & R_4 &= 1 K\Omega \\
 & & R_5 &= 1 K\Omega \\
 & & R_6 &= 2 \Omega
 \end{aligned}$$

Nous avons rajouté des diviseurs de tension à l'entrée et à la sortie du hacheur qui en fin de compte n'ont pas été utilisés. Pour obtenir la valeur des résistances nécessaires, on utilise les relations :

$$\frac{V_{STM}}{V_{pv_{max}}} = \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (4.6)$$

$$\frac{V_{STM}}{V_{out_{max}}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3} \quad (4.7)$$

avec :

$$V_{stm} = 3.3V$$

$$V_{pv_{max}} = 20V \text{ (correspond à la tension } V_{oc} \text{ pour une température de } 0^\circ\text{C)}$$

$$V_{out_{max}} = 15V$$

L'énergie dissipée est  $P_{diviseur1} = \frac{V_{pv_{max}}^2}{R_2}$  et  $P_{diviseur2} = \frac{V_{out_{max}}^2}{R_4}$ , qui sont des pertes de l'ordre de (0.0001W).

La figure 4.11 représente le schéma ARES du hacheur Buck

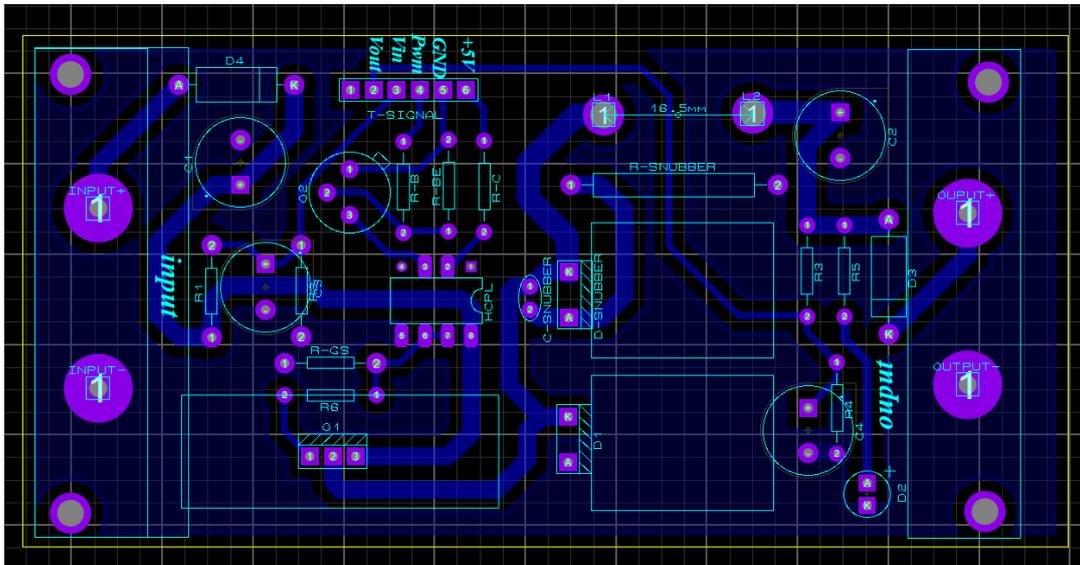


FIGURE 4.11 – Circuit PCB du hacheur buck

La figure 4.12 montre le prototype final du convertisseur buck, après avoir imprimé le circuit PCB sur la plaque et soudé les composants.

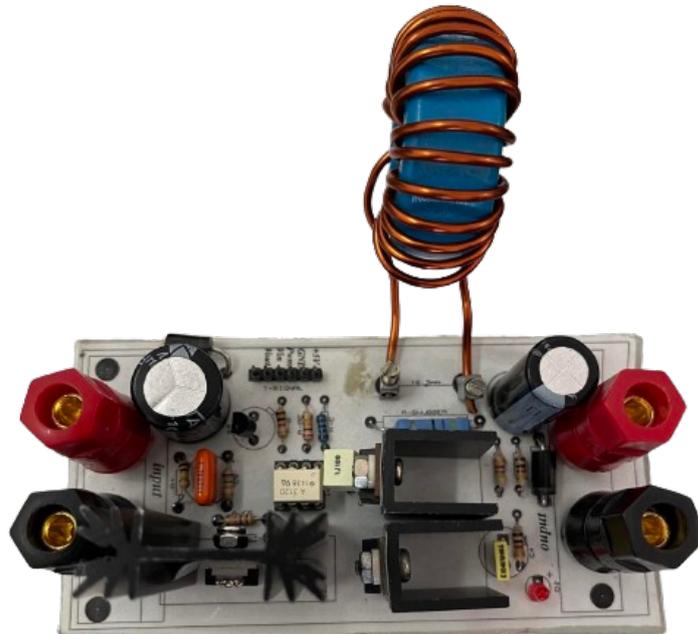


FIGURE 4.12 – Prototype final du hacheur buck

### 4.3 Implémentation de la commande optimale

La figure 4.13 illustre l'implémentation de la commande sur l'hacheur. Une alimentation régulée en source de courant est utilisée pour simuler un panneau photovoltaïque afin de charger une batterie au plomb de valeur nominale de 12 V.

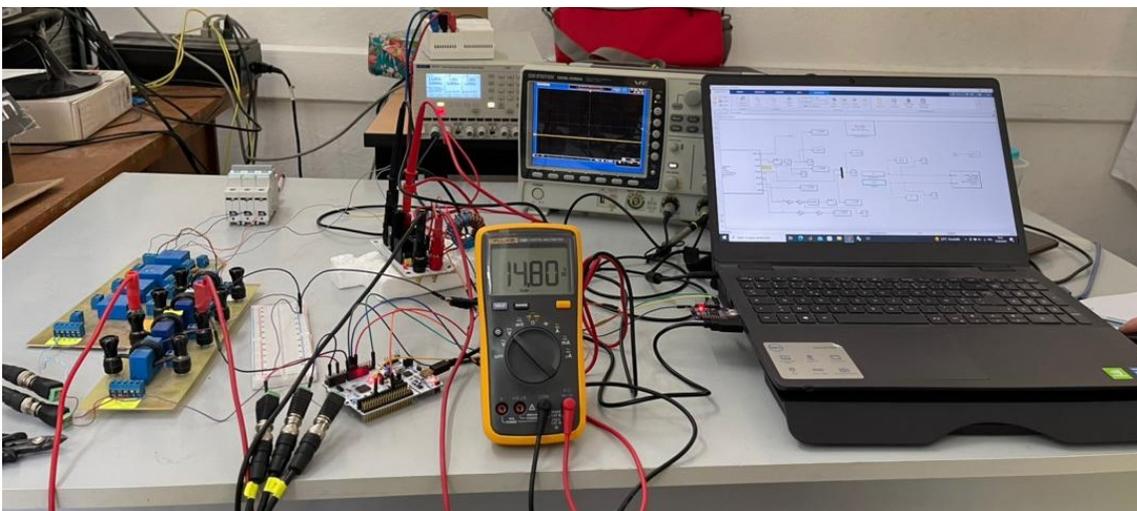


FIGURE 4.13 – Illustration de la manipulation

La figure 4.14 illustre le programme simulink qui est implémenté sur la carte STM32. La valeur du rapport cyclique de la commande est envoyé par son complément ( $1-D$ ) car le MOSFET est de type P.

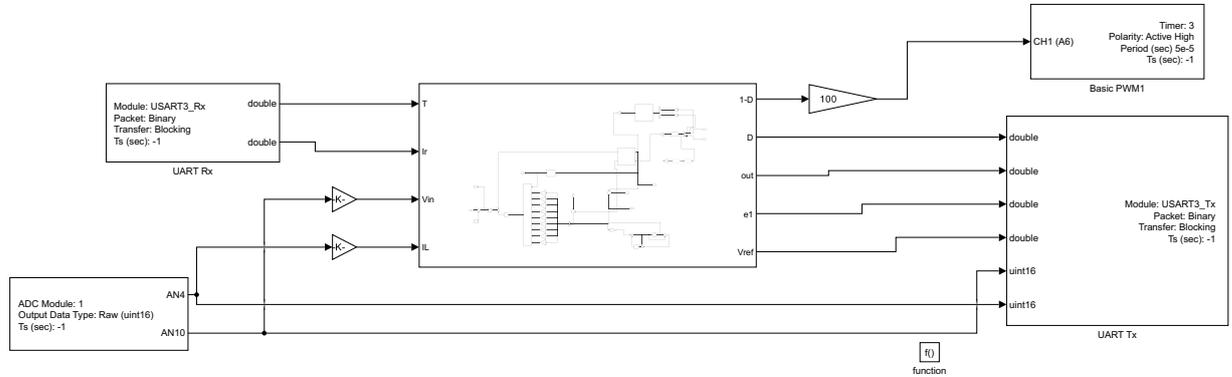


FIGURE 4.14 – Schéma Simulink de la commande

La figure 4.15 illustre le programme simulink qui va récupérer les données requises et envoyer les valeurs de la température et de l'irradiation en temps réelles.

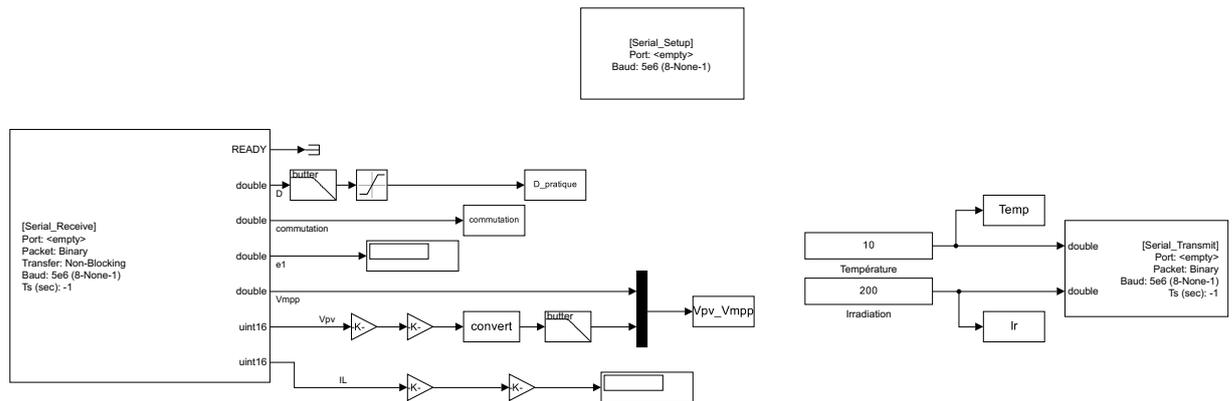


FIGURE 4.15 – Schéma Simulink pour l'acquisition des données

Nous avons rajouté un filtre numérique pour pouvoir bien visualiser les données sur les courbes.

## 4.4 Résultats pratiques

Les figures (4.16 et 4.17) représentent respectivement les scénarios de températures et d'irradiations en temps réel.

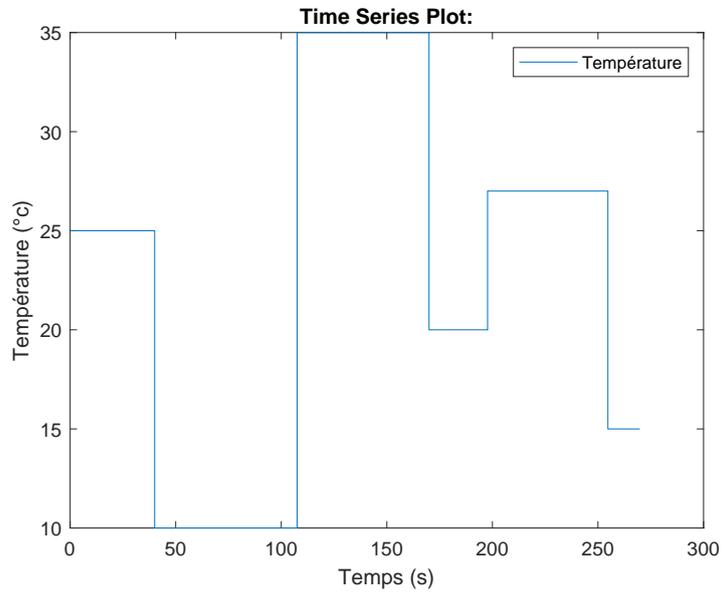


FIGURE 4.16 – Représentation de la température par rapport au temps

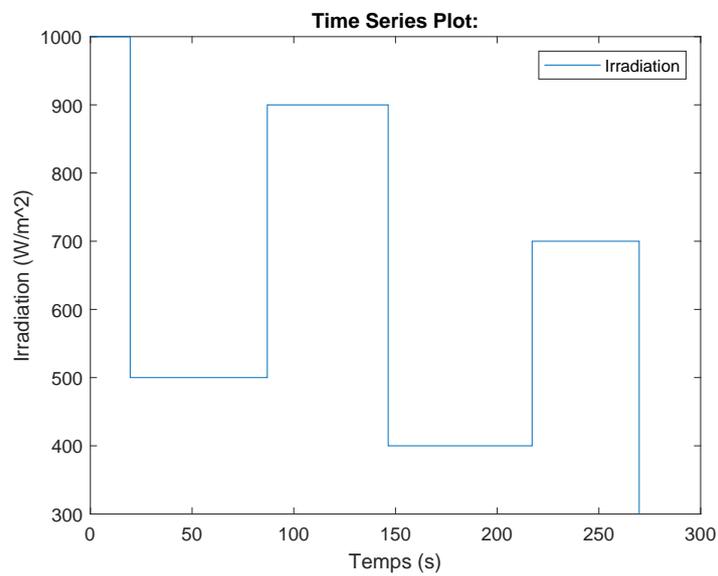


FIGURE 4.17 – Représentation de l'irradiation par rapport au temps

Les figures (4.18 et 4.19) représentent respectivement les valeurs de la tension fournie par l'alimentation et la variation du rapport cyclique.

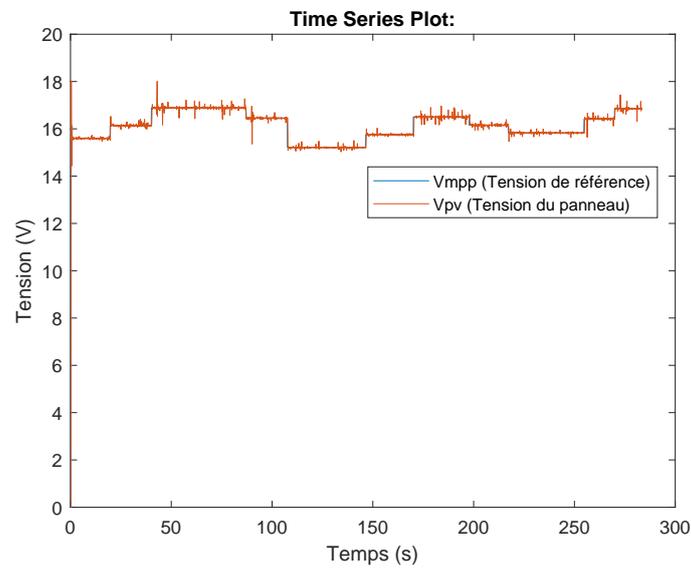


FIGURE 4.18 – Représentation de la tension d'entrée du hacheur par rapport au temps

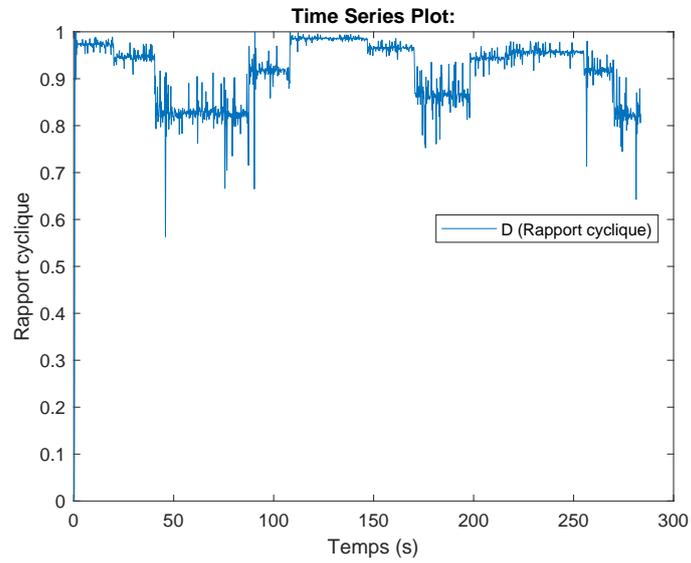


FIGURE 4.19 – Représentation du rapport cyclique en fonction du temps

## 4.5 Interprétation des résultats

Nous remarquons que la tension délivrée par l'alimentation suit la référence imposée par la commande optimale, tout en prenant compte des changements en temps réelles de la température et de l'irradiation.

Nous observons que notre commande réagit rapidement aux changement climatique tout en maintenant la stabilité du système.

### Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté les étapes essentielles pour la conception et l'implémentation de la commande MPPT dans un système photovoltaïque. Les validations expérimentales ont démontré l'efficacité de la commande MPPT dans l'optimisation de l'énergie fournit par le panneau photovoltaïque.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail a principalement porté sur la conception, la modélisation et l'implémentation d'un système de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour optimiser la conversion de l'énergie solaire dans les systèmes photovoltaïques.

L'étude a commencé par une revue des caractéristiques et de modélisations des panneaux photovoltaïques, y compris leurs performances sous différentes conditions d'irradiation et de température permettant de mieux comprendre leur comportement dans divers environnements. Cette modélisation a servi de base pour le développement d'un convertisseur DC/DC efficace, essentiel pour la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques.

La partie centrale du travail a été dédiée au développement et à la mise en œuvre de deux techniques de commande MPPT : une commande basée sur un contrôleur PI et une autre sur le retour d'état avec utilisation de LMI (Linear Matrix Inequalities). Les résultats des simulations ont montré que les deux méthodes peuvent améliorer significativement l'efficacité de la conversion énergétique, avec une préférence pour la méthode basée sur les LMI en termes de stabilité et de rapidité de réponse aux variations climatiques.

L'implémentation pratique de la commande MPPT a été testée avec succès sur un prototype, confirmant ainsi les résultats théoriques et simulés. Les tests expérimentaux ont démontré que la commande MPPT développée est capable de suivre efficacement le point de puissance maximal malgré les variations de l'irradiation et de la température, tout en maintenant la stabilité du système.

Cette recherche ouvre des perspectives pour de futures études visant à optimiser encore davantage les systèmes photovoltaïques (PV). Ces études pourraient explorer l'optimisation de la commande optimale en modifiant, par exemple, les valeurs des pondérations ou en allégeant la commande. Elles pourraient également développer d'autres méthodes pour élaborer des stratégies plus avancées d'estimation de  $I_{mpp}$  et  $V_{mpp}$ .

## ANNEXE

### A

# PROGRAMME MATLAB

Ce programme nous permet de calculer les points de fonctionnements de notre système ainsi que les gains de la commande.

Programme A.1 – prog\_calcule\_gain\_K

```
1  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\extras')
2  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\yalmip')
3  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\.github')
4  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\demos')
5  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\modules')
6  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\operators'
7      )
8  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\slprj')
9  addpath('C:\Users\Private\Documents\MATLAB\PFE\solvers')
10 %% Input
11 VTemp=[23 25 27];
12 VIr=[400 600 1000];
13 Vout=12;      %input("la valeur de Vout:  ")
14 C1 = 2200*1e-6;      % capacite [F]
15 L = 2.4*1e-3;      % inductance [H]
16 rL = 0.4;      % resistance de l'inductance rL
17 dt = 1e-6;      % temps d'echantillonnage [s]
18 N=1;
19 %% Data base
20 VVin0 = zeros(1,length(VTemp)*length(VIr));
21 VIin0 = zeros(1,length(VTemp)*length(VIr));
22 VD0= zeros(1,length(VTemp)*length(VIr));
23 VIL0 = zeros(1,length(VTemp)*length(VIr));
24 A = zeros(3,3*(N-1));
```

```

24 B = zeros(3,N-1);
25 Y = cell(1,N-1);
26 K = cell(1, N-1);
27 Lob=cell(2,N-1);
28 VIsc=cell(1,N-1);
29 VVoc=cell(1,N-1);
30 %% Point de fonctionnement
31 for i= 1:length(VTemp)
32     for j=1:length(VIr)
33         Temp=VTemp(i);
34         Ir=VIr(j);
35         Isc=5.59*(Ir/1000)*(1+0.00123*(Temp-25));
36         Impp=0.8986*Isc;
37         Tm=Temp+0.022*Ir;
38         Voc=20.372-0.05626*Tm;
39         Vmpp=0.88*Voc;
40         D0=(Vout+sqrt((Vout^2)+4*rL*Vmpp*Impp))/(2*Vmpp);
41         IL0=Impp/D0;
42         VVin0(N) = Vmpp;
43         VIin0(N) = Impp;
44         VD0(N) = D0;
45         VIL0(N) = IL0;
46         Isc=5.59*(Ir/1000)*(1+0.00123*(Temp-25));
47         VIsc{N}=Isc;
48         Tm=Temp+0.022*Ir;
49         Voc=20.372-0.05626*Tm;
50         VVoc{N}=Voc;
51         N=N+1;
52     end
53 end
54 clc
55 sprintf("Vin = ")
56 disp(VVin0)
57 sprintf("Iin0 = ")
58 disp(VIin0)
59 sprintf("D0 = ")
60 disp(VD0)
61 sprintf("IL0 = ")
62 disp(VIL0)
63 %% commande et observateur systeme
64 for i= 1:N-1
65     Iin=VIin0(i);
66     Ai = [0 1 0;0 0 -VD0(i)/C1;0 VD0(i)/L -rL/L];
67     Bi = [0;-VIL0(i)/C1 ; VVin0(i)/L];
68     C=[0 1 0]
69     D=0
70     clc
71     A(:,(i-1)*3+1:(i-1)*3+3) = Ai;

```

---

```

72     B(:,(i-1)+1)=Bi;
73 end
74 yalmip('clear')
75 Q = diag([1000, 1, 0.01]);
76 R = 10;
77 X = sdpvar(3, 3, 'symmetric');
78 for i = 1:N-1
79     Y{i} = sdpvar(1, 3, 'full');
80 end
81 J = [X >= 0];
82 for i=1:N-1
83 J = [J, [-A(:,(i-1)*3+1:(i-1)*3+3)*X - B(:,(i-1)+1)*Y{i}
      + (-A(:,(i-1)*3+1:(i-1)*3+3)*X - B(:,(i-1)+1)*Y{i})' X
      Y{i}']; X inv(Q) zeros(3,1); Y{i} zeros(1,3) inv(R)]
      >= 0];
84 end
85 optimize(J, -trace(X))
86 for i=1:N-1
87 K{i}=value(Y{i})*inv(value(X));
88 end
89
90 save data_A A
91 save data_B B
92 save data_Vin0 VVin0
93 save data_K K
94 save data_Isc VIsc
95 save data_Impp VIin0
96 save data_Voc VVoc

```

---

---

Ce programme nous permet de calculer les gains du contrôleur PI.

Programme A.2 – prog\_calcule\_gain\_PI

```
1 clear,clc
2 A = [0 -386.1825 ;354.0006 -166.6667];
3 B = [-1761.2 ; 6651.5];
4 C=[1 0];
5 D=0;
6 sys=ss(A,B,C,D);
7 G=tf(sys)
8 P=pole(G)
9 a1=-1761
10 a0=- 2.862*1e06
11 b1=166.7
12 b0=1.367*1e05
13 s0=-170+352.89i
14 s1=-170-352.89i
15 s2=-50
16 Kp=-(s0+s1+s2+b1)/a1
17 Ki=-s0*s1*s2/a0
```

---

La fonction de commutation qui permet de choisir le gain approprié.

Programme A.3 – fonction de commutation

```
1 function out = switch_fcn(Vin0)
2 VVin0=[16.1351 15.9173 15.6995 16.0361 15.8183 15.6004
3       15.9371 15.7193 15.5014];
4 VV = [VVin0; 1:9];
5 [V_tri, X] = sort(VV(1, :));
6 V_j=( [0 V_tri(1, :)]+[V_tri(1, :) 0])/2;
7 V_j=V_j(:, 2:9);
8 if (Vin0<=V_j(1))
9     out=X(1);
10 elseif (Vin0>V_j(1))&& (Vin0<=V_j(2))
11     out=X(2);
12 elseif (Vin0>V_j(2)) && (Vin0<=V_j(3))
13     out=X(3);
14 elseif (Vin0>V_j(3)) && (Vin0<=V_j(4))
15     out=X(4);
16 elseif (Vin0>V_j(4)) && (Vin0<=V_j(5))
17     out=X(5);
18 elseif (Vin0>V_j(5)) && (Vin0<=V_j(6))
19     out=X(6);
20 elseif (Vin0>V_j(6)) && (Vin0<=V_j(7))
21     out=X(7);
22 elseif (Vin0>V_j(7)) && (Vin0<=V_j(8))
23     out=X(8);
24 else
25     out=X(9);
26 end
```

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALLDATASHEET.com. Datasheet de la diode. *Internet* : <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/842876/DSK/MUR820/53/1/MUR820.html>.
- [2] ALLDATASHEET.com. Datasheet du 2n2222. *Internet* : <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/956542/FCI/2N2222A/54/1/2N2222A.html>.
- [3] ALLDATASHEET.com. Datasheet du hcpl. *Internet* : <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/64629/HP/HCPL-3120/23/1/HCPL-3120.html>.
- [4] ALLDATASHEET.com. Datasheet du mosfet. *Internet* : <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/68156/IRF/IRF4905/46/1/IRF4905.html>.
- [5] E Benkhelil and A Gherbi. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque avec un étage d'adaptation dc/dc. *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar*, pages 159–170, 2011.
- [6] Omar Boukli-Hacene. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique. 2011.
- [7] Stephen Boyd. Inequalities in system and control theory. *SIAM Stud. Appl. Math.*, 15, 1994.
- [8] FTDI Chip. Cjmcu-232h. *Internet* : [https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/07/DS\\_UM232H.pdf](https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/07/DS_UM232H.pdf).
- [9] Ali Dali. Synthèse de commande et observateur pour une classe de systèmes dynamiques hybrides : théorie et applications. 2021.
- [10] digischool. les semi-conducteurs et le silicium. *Internet* : <https://www.digischool.fr/cours/les-semi-conducteurs-et-le-silicium>.

- 
- [11] Mr. OUARI Mondher et Mr. ZINE Yakoub. Étude des commandes mppt d'un système photovoltaïque. 2020.
- [12] G2V. Qu'est-ce que la masse d'air a à voir avec la lumière du soleil? *Internet* : <https://g2voptics.com/air-mass-solar-intensity/>.
- [13] Mbed. Stm32f446re. *Internet* : <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F446RE/>.
- [14] MEZIANI Zahra Mémoire de Magister. Modelisation de modules photovoltaïques. 2012.
- [15] S Rustemli and F Dincer. Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in matlab/simulink. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 109(3) :35–40, 2011.
- [16] M elle Kheddoudja MANSEUR Sabiha KARNOU, M. Djamel IDIR. Simulation d'un émulateur d'un panneau photovoltaïque en utilisant un hacheur buck sous matlab-simulink. 2011-2012.
- [17] LEM Sensor. La 55-p. *Internet* : [https://www.lem.com/sites/default/files/products\\_datasheets/la\\_55-p\\_e.pdf](https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/la_55-p_e.pdf).
- [18] LEM Sensor. lv-25p. *Internet* : <https://www.lem.com/en/product-list/lv-25p>.
- [19] Hadeed Ahmed Sher, Ali F Murtaza, Khaled E Addoweesh, and Marcello Chia-berge. An intelligent off-line mppt technique for pv applications. In *2013 IEEE Conference on Systems, Process & Control (ICSPC)*, pages 316–320. IEEE, 2013.
- [20] Alexandre Rodrigues Vaz and Fernando Lessa Tofoli. Practical design of a dc-dc buck converter using an rcd snubber. In *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pages 1–6. IEEE, 2017.

## Résumé

Ce mémoire traite de la conception, modélisation et implémentation d'un système de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour optimiser la conversion de l'énergie solaire dans les systèmes photovoltaïques. La première partie examine les caractéristiques et la modélisation des panneaux photovoltaïques, incluant leurs performances sous différentes conditions d'irradiation et de température. La seconde partie développe un convertisseur buck, crucial pour la gestion de l'énergie dans ces systèmes. Deux techniques de commande MPPT sont explorées : une basée sur un contrôleur PI et une autre sur une commande optimale utilisant des inégalités matricielles linéaires (LMI). Les résultats de simulation montrent que les deux méthodes améliorent significativement l'efficacité de la conversion énergétique, avec la méthode LMI offrant une meilleure stabilité et une réponse plus rapide aux variations climatiques.

**Mots clés :** Système photovoltaïque, MPPT, Convertisseur DC/DC, Commande optimale, Commande PI, LMI, Simulation.

## Abstract

This thesis addresses the design, modeling, and implementation of an MPPT (Maximum Power Point Tracking) control system to optimize solar energy conversion in photovoltaic systems. The first part examines the characteristics and modeling of photovoltaic panels, including their performance under different irradiation and temperature conditions. The second part develops a buck converter, crucial for energy management in these systems. Two MPPT control techniques are explored: one based on a PI controller and another on optimal control using Linear Matrix Inequalities (LMI). Simulation results show that both methods significantly improve energy conversion efficiency, with the LMI method offering better stability and faster response to climatic variations.

**Keywords:** Photovoltaic system, MPPT, DC/DC converter, optimal control, PI control, LMI, Simulation.

## ملخص

يتناول هذا البحث تصميم ونمذجة وتنفيذ نظام تحكم بتقنية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT) لتحسين تحويل الطاقة الشمسية في الأنظمة الكهروضوئية. تدرس الجزء الأول خصائص ونمذجة الألواح الكهروضوئية، بما في ذلك أدائها تحت ظروف مختلفة من الإشعاع ودرجة الحرارة. يطور الجزء الثاني محول Buck، وهو حيوي لإدارة الطاقة في هذه الأنظمة. يتم استكشاف تقنيتين للتحكم في (MPPT) واحدة تعتمد على وحدة تحكم PI والأخرى على التحكم الأمثل باستخدام متباينات المصفوفة الخطية LMI تظهر نتائج المحاكاة أن كلتا الطريقتين تحسنان بشكل كبير من كفاءة تحويل الطاقة، مع توفير طريقة LMI استقراراً أفضل واستجابة أسرع لتغيرات المناخ.

**الكلمات المفتاحية:** نظام كهروضوئي، MPPT، محول DC/DC، التحكم الأمثل، تحكم PI، LMI، محاكاة.