

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

**Faculté : TECHNOLOGIE**

**Département : ÉLECTROTECHNIQUE**

**Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**Filière : Commandes Électriques**

**Spécialité : Commandes Électriques**

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

### Thème:

**Étude du hacheurs et leur utilisation dans l'optimisation du fonctionnement des générateurs photovoltaïque**

**Présenté par :**

- BENNOUI Nadjoua
- LAYACHI Asma

**Encadrant :** Dr. SOLTANI Fatma

MCA

BADJI Mokhtar - Annaba

### Jury de Soutenance :

MEGHNI Billel	PROFESSEUR	BADJI Mokhtar - Annaba	Président
SOLTANI Fatma	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Encadrant
KSENTINI Abdelhamid	MCA	BADJI Mokhtar - Annaba	Examineur

**Année Universitaire : 2023/2024**



# Remerciements

Nous remercions, en premier lieu, notre Dieu le plus Puissant qui a bien Voulu nous donner la force et le courage Pour effectuer Ce présent travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudes à nos parents pour leurs Encouragements, leur soutien et pour les sacrifices Qu'ils ont enduré.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur " Mme. SOLTANI. F" pour son sérieux, sa compétence et ses orientations.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département Electrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Aussi nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et toute la promotion Master commande électrique (2023-2024) Qui par leur amitié et leur bonne humeur, ont créé une ambiance de travail parfaite.

# Dédicace

Je dédie ce précieux travail aux êtres les plus chers au monde, à qui je témoigne mon amour et mon affection pour leur encouragement, leur compréhension et leur patience, qui ont su me comprendre et m'ont poussé à apprendre, c'est de vous dont je parle très chers parents.

A mes frères et toute la famille : « BENNOUI » sans exception.

A tous mes amis qui m'ont toujours soutenu.

Je dédie ce travail à mes chers grands-parents, dont l'amour et le soutien continuent de m'inspirer chaque jour. Vous êtes ma source de sagesse et de force.

Je dédie également ce travail à la mémoire de mes deux tantes « HABIBA et DALILA » bien-aimées, dont la bienveillance et l'affection resteront à jamais gravées dans mon cœur. Vous nous manquez profondément, et cette réussite est en votre honneur.

En fin à tous ceux qui m'apprécient à ma juste valeur.

BEENOUÏ Nadjoua

# Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents : nacira ET Bachir

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit.

Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Merci d'être tout simplement mes parents, c'est à vous que je dois cette réussite et je suis fière de vous l'offrir.

A mes frères : lamine , chouaib et ziyano

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, santé et de réussite A mes grands parents :

Pour cela que était et que est encore pour mes jours est comme un nuage rempli de pluie chaude qui éteint le cœur avec des prières couronnées de bénédictions célestes mon chère grand-père.

A qui il a voyagé jusqu'à son créateur et a laissé son nectar dans tous les recoins de nos mémoires mon grand-père, que Dieu lui fasse miséricorde.

A qui la vie n'est pas agréable sans eu A qui j'ai passé les plus beaux moments de ma vie A un morceau de mon âme ma grand mère

LAYACHI Asma

# Résumé

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes sources d'énergie renouvelable, en nous concentrant sur l'énergie solaire et ses avantages environnementaux et économiques.

Le deuxième chapitre a abordé la modélisation des panneaux photovoltaïques, en examinant les caractéristiques I-V et P-V des cellules solaires, ainsi que l'impact des conditions environnementales.

Le troisième chapitre a étudié les convertisseurs DC/DC, notamment les hacheurs série et Buck entrelacés, essentiels pour réguler la tension et le courant des panneaux photovoltaïques.

Le quatrième chapitre s'est consacré à l'extraction de la puissance maximale des panneaux photovoltaïques à travers différents algorithmes MPPT, notamment l'algorithme de perturbation et observation (P&O).

Enfin, le cinquième chapitre a exploré l'alimentation des moteurs asynchrones à partir d'un générateur photovoltaïque, en utilisant des onduleurs triphasés et la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les résultats de simulation ont confirmé la viabilité de cette configuration pour une alimentation stable et efficace.

# Abstract

In the first chapter, we presented various renewable energy sources, focusing on solar energy and its environmental and economic benefits.

The second chapter dealt with the modeling of photovoltaic panels, examining the I-V and P-V characteristics of solar cells, and the impact of environmental conditions.

The third chapter studied DC/DC converters, particularly series and interleaved Buck converters, essential for regulating voltage and current from photovoltaic panels.

The fourth chapter was dedicated to maximum power extraction from photovoltaic panels using various MPPT algorithms, notably the perturb and observe (P&O) algorithm.

Finally, the fifth chapter explored powering asynchronous motors from a photovoltaic generator using three-phase inverters and pulse width modulation (PWM) control. Simulation results confirmed the viability of this configuration for stable and efficient power supply.

# ملخص

في الفصل الأول، قدّمنا مصادر الطاقة المتجددة المختلفة، مركزين على الطاقة الشمسية وفوائدها البيئية والاقتصادية.

الفصل الثاني تناول نمذجة الألواح الشمسية، مدققاً في الخصائص I-V و P-V للخلايا الشمسية، وتأثير الظروف البيئية.

الفصل الثالث درس المحولات DC/DC، بشكل خاص المحولات Buck في التسلسل والمتداخلة، الضرورية لتنظيم الجهد والتيار من الألواح الشمسية.

الفصل الرابع كرس لاستخراج الطاقة القصوى من الألواح الشمسية باستخدام خوارزميات MPPT متنوعة، لا سيما خوارزمية "الاضطراب والملاحظة" (P&O).

أما الفصل الخامس، استكشف تشغيل المحركات الغير متزامنة بواسطة مولد شمسي باستخدام محولات ثلاثية الطور وتحكم بعرض النبضات (PWM). أكدت نتائج المحاكاة جدوى هذا التكوين لتوفير إمداد طاقة مستقر وفعال.

# Table des matières

Introduction général	1
Chapitre 1 Diffèrent types d énergies renouvelables	3
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Biomasse (L'énergie de la matière vivante) . . . . .	3
1.3 Énergie hydraulique (L'énergie de l'eau) . . . . .	4
1.4 Géothermie (L'énergie de la Terre) . . . . .	5
1.5 L'énergie du vent . . . . .	5
1.5.1 Éoliennes terrestres . . . . .	5
1.5.2 Éoliennes en mer . . . . .	6
1.6 L'énergie du soleil . . . . .	7
1.6.1 Energie solaire thermique . . . . .	7
1.6.2 Energie solaire thermodynamique . . . . .	7
1.6.3 Energie Photovoltaïque . . . . .	8
1.6.4 Cellule PV . . . . .	9
1.6.5 Principe de fonctionnement d'une cellule PV . . . . .	10
1.6.6 Le module photovoltaïque (le panneau solaire) . . . . .	11
1.6.6.1 Groupement en série . . . . .	12
1.6.6.2 Groupement en parallèle . . . . .	13
1.6.6.3 Le générateur photovoltaïque (Groupement mixte) . . . . .	14
1.7 Potentiel d énergie solaire en Algérie . . . . .	14

1.8	Conclusion . . . . .	15
Chapitre 2 Modélisation de panneau photovoltaïque		16
2.1	Introduction . . . . .	16
2.2	Modélisation d'une cellule photovoltaïque . . . . .	16
2.3	Modélisation d'un panneau photovoltaïque . . . . .	18
2.4	Modélisation d'un générateur . . . . .	20
2.5	Simulation du panneau PV ND-240QCJ . . . . .	21
2.6	Effet des conditions environnementales sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques . . . . .	22
2.7	Résultats de simulation . . . . .	23
2.7.1	Effet de la variation de l'irradiation (rayonnement) solaire . . . . .	23
2.7.2	Effet de la variation de la température . . . . .	24
2.8	Conclusion . . . . .	26
Chapitre 3 Les hacheurs (Convertisseur DC/DC)		27
3.1	Introduction . . . . .	27
3.2	Hacheur BUCK . . . . .	27
3.2.1	Hacheur BUCK avec charge inductive "RL" . . . . .	27
3.3	Hacheurs Buck entrelacés . . . . .	30
3.4	Simulation des Hacheurs dans Matlab/Simulink . . . . .	32
3.4.1	Simulation d'Hacheur série charge inductive RL . . . . .	32
3.4.2	Simulation Hacheur entrelacé . . . . .	36
3.5	Conclusion . . . . .	40
Chapitre 4 Optimisation du fonctionnement des Systèmes photovoltaïque		41
4.1	Introduction . . . . .	41
4.2	Algorithme de la perturbation et observation (P&O) . . . . .	41
4.3	Simulation de la méthode P&O . . . . .	44
4.3.1	Simulation du PV avec un hacheur Buck entrelacé . . . . .	44

4.3.2	Simulation d un PV muni d un commande <b>P&amp;O</b> avec Hacheur entrelacé . . . . .	45
4.4	Conclusion . . . . .	49
Chapitre 5 Alimentation d un moteur asynchrone par un generateur PV		50
5.1	Introdction . . . . .	50
5.2	Présentation de la structure du système . . . . .	50
5.3	Étude de l'onduleur triphasé . . . . .	52
5.3.1	Classification des onduleurs . . . . .	52
5.3.1.1	Onduleur autonome . . . . .	53
5.3.1.2	Onduleur non autonome . . . . .	53
5.4	Modélisation de l'onduleur triphasé . . . . .	53
5.5	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) . . . . .	55
5.6	Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)	55
5.6.1	Commande MLI sinus – triangle . . . . .	55
5.6.2	Avantages de la commande MLI . . . . .	58
5.7	Représentation de la simulation Commande MLI sinus-triangle de l'on- duteur . . . . .	58
5.8	Modélisation de la Machine asynchrone . . . . .	63
5.8.1	introduction . . . . .	63
5.8.2	Les hypotheses simplificatrices . . . . .	63
5.8.3	Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique	63
5.8.4	Mise en équations de la machine asynchrone . . . . .	64
5.8.4.1	Equations électriques . . . . .	64
5.8.4.2	Équations magnétiques . . . . .	65
5.8.4.3	Équations mécaniques . . . . .	66
5.9	Modélisation diphasée de la Machine asynchrone . . . . .	67
5.9.1	Transformation de Park . . . . .	67

5.9.2	Application de la transformation de Park au modèle de la MAS	68
5.9.3	Équations électriques dans le repère de PARK . . . . .	69
5.9.4	Choix de référentiel . . . . .	70
5.9.4.1	Référentiel lié au stator . . . . .	70
5.9.4.2	Référentiel lié au rotor . . . . .	71
5.9.4.3	Référentiel lié au champ tournant . . . . .	71
5.9.5	Représentation d'état du système . . . . .	72
5.10	Simulation de la machine asynchrone alimenté par un générateur photovoltaïque . . . . .	73
5.11	Conclusion . . . . .	81
	Conclusion général	82
	Perspectives	83
	Bibliographie	84

# Liste des tableaux

2.1	Caractéristiques du panneau PV ND-240QCJ . . . . .	21
3.1	Les paramètres de simulation du hacheur série avec charge RL . . . . .	32
3.2	Les paramètres de simulation du hacheur entrelacé . . . . .	36
4.1	Résumé des algorithmes d'escalade et de P&O . . . . .	43
5.1	Parametres de la machine asynchrone utilisée . . . . .	74

# Table des figures

1.1	Energie biomasse . . . . .	4
1.2	Énergie hydraulique . . . . .	4
1.3	Énergie géothermie . . . . .	5
1.4	Éoliennes terrestres . . . . .	6
1.5	Éoliennes en mer . . . . .	6
1.6	lPrincipe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique . . . . .	7
1.7	les trois principaux systèmes thermodynamique a concentration . . . . .	8
1.8	Énergie photovoltaïque . . . . .	8
1.9	Plaque de silicium monocristallin . . . . .	9
1.10	Plaque de silicium poly cristallin . . . . .	9
1.11	Plaque de silicium amorphe . . . . .	10
1.12	Structure d'une cellule photovoltaïque . . . . .	11
1.13	Le module photovoltaïque . . . . .	11
1.14	(a.b). Association de cellules en séries . . . . .	12
1.15	(a.b).Association de cellules en parallèle . . . . .	13
1.16	Composants du générateur photovoltaïque . . . . .	14
1.17	Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (2002-2011)	15
2.1	Circuit électrique équivalent d'une cellule PV à une diode . . . . .	18
2.2	Model de caractérisation de panneau PV ND-240QCJ en Simulink . . . . .	21
2.3	Schéma bloc détaillé du module photovoltaïque . . . . .	22

2.4	Effet d irradiation variable avec temperature constante $T = 25C$ sur la courbe caractéristique P-V . . . . .	23
2.5	Effet de l'irradiation variable avec temperature constante $T = 25C$ sur la courbe caractéristique I-V . . . . .	24
2.6	Effet de la température variable avec irradiation constante $G = 1000W/m^2$ sur la courbe caractéristique P-V . . . . .	25
2.7	Effet de la température variable avec irradiation constante $G = 1000W/m^2$ sur la courbe caractéristique I-V . . . . .	25
3.1	Hacheur BUCK avec charge inductive . . . . .	28
3.2	Forme d'ondes d'Hacheur BUCK charge RL en conduction continue .	29
3.3	Forme d'ondes d'Hacheur BUCK charge RL en conduction discontinue	29
3.4	Topologie d'un hacheur Buck entrelacé . . . . .	30
3.5	Formes d'ondes pour un convertisseur 3 cellules . . . . .	31
3.6	Schéma bloc de simulation du hacheur BUCK charge RL . . . . .	32
3.7	Ondes de $I_{ch}$ et $V_{ch}$ pour le hacheur BUCK charge RL a $F = 2000$ Hz	33
3.8	spectre d harmoniques du $I_{ch}$ pour le hacheur BUCK charge RL a une $F = 2000$ Hz . . . . .	33
3.9	Ondes de $I_{ch}$ et $V_{ch}$ pour le hacheur BUCK charge RL a une $F = 5000$ Hz . . . . .	34
3.10	spectre d harmoniques du $I_{ch}$ hacheur BUCK charge RL a une $F = 5000$ Hz . . . . .	34
3.11	Schéma bloc de simulation du hacheur BUCK entrelacé . . . . .	36
3.12	Ondes de $I_1, I_2, I_3, I_{ch total}$ et $V_{ch}$ d hacheur BUCK entrelacé a $F = 2000$ Hz . . . . .	37
3.13	spectre d harmoniques du $I_{ch}$ hacheur BUCK entrelacé a une $F = 2000$ Hz . . . . .	37
3.14	Ondes de $I_1, I_2, I_3, I_{ch total}$ et $V_{ch}$ d hacheur BUCK entrelacé a une $F = 5000$ Hz . . . . .	38
3.15	spectre d harmoniques du $I_{ch}$ hacheur BUCK entrelacé a une $F = 5000$ Hz . . . . .	38

4.1	Schéma bloc de l'algorithme P&O . . . . .	42
4.2	Recherche du PPM par la méthode (P&O) . . . . .	43
4.3	Simulation du PV par un hacheur Buck entrelacé . . . . .	44
4.4	Résultats de simulation de I,V et P d'un PV adapté par un hacheur buck entrelacé . . . . .	44
4.5	Configurations dans Simulink pour l'algorithme MPPT (P&O) . . . . .	45
4.6	Schéma bloc d'un système PV avec un hacheur entrelacé équipé d'une commande MPPT . . . . .	46
4.7	Variation de l'irradiance en fonction du temps . . . . .	46
4.8	L'influence du changement d'irradiance sur $I_{pv}$ et $I_{ch}$ dans un système PV équipé d'une commande MPPT . . . . .	47
4.9	L'influence du changement d'irradiance sur $V_{pv}$ et $V_{ch}$ dans un système PV équipé d'une commande MPPT . . . . .	47
4.10	L'influence du changement d'irradiance sur $P_{pv}$ et $P_{ch}$ dans un système PV équipé d'une commande MPPT . . . . .	48
5.1	Le shema bloc du model global . . . . .	51
5.2	Principe de fonctionnement de l' onduleur . . . . .	52
5.3	Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé . . . . .	53
5.4	Description de la commande M.L.I. sinus – triangle . . . . .	57
5.5	Schéma de principe de la technique M.L.I triangle– sinusoïdale . . . . .	57
5.6	Schéma bloc du Commande MLI sinus-triangle . . . . .	58
5.7	Schéma bloc d'onduleur . . . . .	59
5.8	Bloc de simulation du modèle global . . . . .	59
5.9	Illustration de la MLI sinus-triangle . . . . .	60
5.10	Les tensions de sortie de l'onduleur . . . . .	60
5.11	Spectre d'harmonique de la tension composée à la sortie de l'onduleur ( $m=45$ ) . . . . .	61
5.12	Les courants de sortie de l'onduleur ( $m=45$ ) . . . . .	61

5.13	Spectre d'harmonique du courant à la sortie de l'onduleur ( $m=45$ ) . . .	62
5.14	Schéma d'une machine asynchrone triphasée . . . . .	64
5.15	Passage du repère triphasé au repère biphasé . . . . .	68
5.16	Référentiel tournant des axes ( $d-q$ ) . . . . .	69
5.17	Schéma de simulation de la Machine asynchrone . . . . .	75
5.18	schéma bloc du modèle de la machine asynchrone . . . . .	75
5.19	Bloc de simulation du modèle global . . . . .	76
5.20	le courants statoriques en fonction du temps (démarrage à vide) . . .	76
5.21	le flux en fonction du temps (démarrage à vide) . . . . .	77
5.22	le couple en fonction du temps (démarrage à vide) . . . . .	77
5.23	la vitesse en fonction du temps (démarrage à vide) . . . . .	78
5.24	le courants statoriques en fonction du temps (en charge $C_r=10$ N.m) .	78
5.25	le flux en fonction du temps (en charge) . . . . .	79
5.26	le couple en fonction du temps (en charge) . . . . .	79
5.27	la vitesse en fonction du temps (en charge) . . . . .	80

# Introduction général

L'énergie renouvelable est devenue un domaine d'intérêt primordial dans le contexte actuel, marqué par des préoccupations grandissantes liées aux changements climatiques, à la sécurité énergétique et à la durabilité environnementale. Parmi les diverses sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire occupe une position centrale en raison de sa disponibilité abondante et de son potentiel illimité. Les systèmes photovoltaïques (PV), qui transforment directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité, se révèlent être des acteurs clés dans cette transition vers une économie plus écologique et durable.

La transition énergétique mondiale vers des sources d'énergie renouvelable est une nécessité impérieuse face aux défis croissants liés aux changements climatiques, à la sécurité énergétique et à la durabilité environnementale. Parmi les nombreuses sources d'énergie renouvelable disponibles, l'énergie solaire se distingue par son abondance, sa disponibilité et son potentiel pratiquement illimité. Toutefois, malgré ces avantages, l'adoption de l'énergie solaire, notamment en Algérie, présente des défis significatifs.

L'un des principaux obstacles est la variabilité des conditions environnementales qui affectent la performance des systèmes photovoltaïques (PV). Il est crucial de bien comprendre les caractéristiques électriques des cellules solaires et de développer des modèles précis pour prédire leur performance.

Nous aborderons les convertisseurs DC/DC, en mettant en lumière le rôle crucial des hacheurs (buck) dans la régulation de la tension et du courant dans les systèmes PV. Nous explorerons les principes de fonctionnement des hacheurs simples et entrelacés. Nous avons utilisé la MOSFET, qui nous permet de travailler à des fréquences de commutation très élevées. Ce composant est conçu pour les applications à faible puissance. L'utilisation des hacheurs entrelacés nous permet de profiter des avantages de la MOSFET (fréquence de commutation très élevée), tout en obtenant une grande puissance.

Une caractéristique importante des panneaux solaires est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement défini par une tension et un courant connu, appelé point de puissance maximale. En outre, la position de ce point n'est pas fixe mais elle se déplace en fonction de l'irradiation et de la température des cellules solaires ainsi que de la charge utilisée pour l'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV), l'extraction de la puissance maximale (MPPT)

est essentielle. Une méthode couramment utilisée pour cela est la technique de Perturbation et Observation (PO).

Enfin, L'objectif de notre travail est l'étude est la simulation d'un panneau photovoltaïque Munier d'une commande MPPT puis l'alimentation d'un moteur asynchrone alimenté par un système de production photovoltaïque à partir d'un convertisseur DC /AC.

on terminera par une conclusion générale discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futurs travaux.

# Chapitre 1

## Diffèrent types d énergies renouvelables

### 1.1 Introduction

Les énergies renouvelables constituent une alternative prometteuse aux sources d'énergie traditionnelles, telles que les combustibles fossiles, qui sont limitées et polluantes. Ces sources d'énergie se caractérisent par leur capacité à se régénérer naturellement et leur faible impact environnemental.

Il existe 5 grandes familles d'énergies renouvelables a savoir :

### 1.2 Biomasse (L'énergie de la matière vivante)

L'énergie biomasse permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de matières végétales et animales (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques, lisier d'animaux...) ou du biogaz issu de leur fermentation.

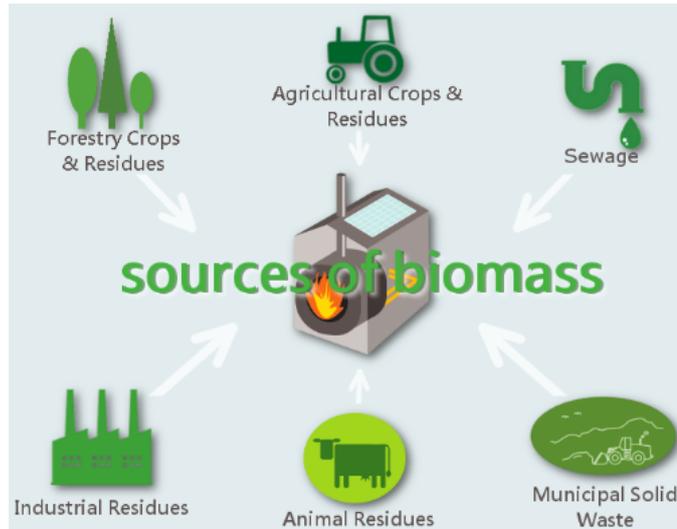


FIGURE 1.1 – Énergie biomasse

### 1.3 Énergie hydraulique (L'énergie de l'eau)

L'énergie mécanique de l'eau est utilisée pour actionner des turbines qui la convertissent en énergie électrique. Il s'agit d'une énergie renouvelable puisque le cycle de l'eau garantit le renouvellement annuel de la ressource. Le volume de production brute varie en fonction du niveau de pluviométrie. D'une manière générale, l'hydroélectricité permet, grâce aux retenues d'eau, de stocker de grands volumes d'eau et de produire de l'électricité à la demande, notamment lors des pics de consommation. En outre, l'hydroélectricité est à ce jour la seule solution de stockage de l'électricité à grande échelle et sur longue période, avec les réserves des grands barrages.

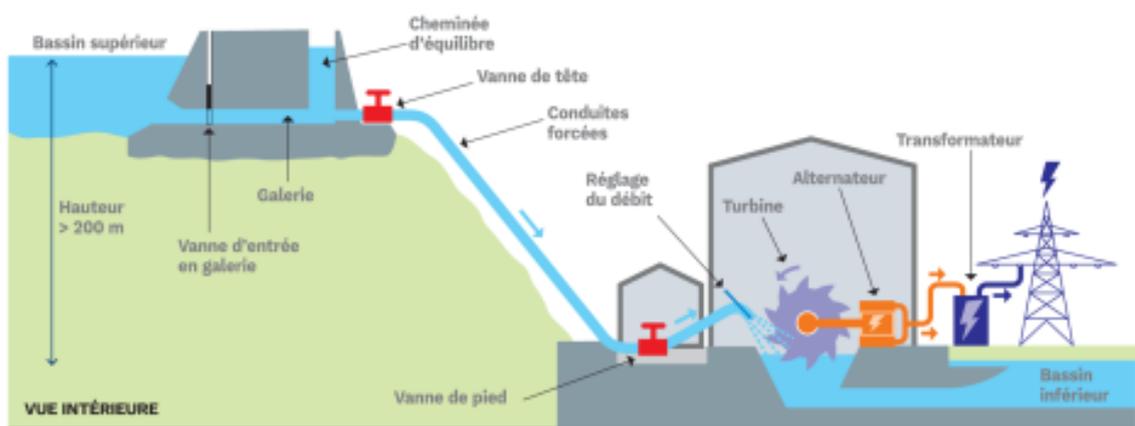


FIGURE 1.2 – Énergie hydraulique

## 1.4 Géothermie (L'énergie de la Terre)

Ce terme recouvre diverses technologies radicalement différentes, mais qui exploitent toutes la chaleur de la croûte terrestre. La géothermie peu profonde (entre 5 et 10 mètres) utilise le concept de pompe à chaleur pour produire du chauffage, le sol restant à température constante toute l'année. La deuxième technologie, dite géothermie profonde, va chercher la chaleur beaucoup plus loin. La température moyenne de la croûte terrestre augmentant avec la profondeur, en moyenne de 3 °C tous les 100 m, cette ressource permet d'alimenter des réseaux de chaleur.



FIGURE 1.3 – Énergie géothermie

## 1.5 L'énergie du vent

### 1.5.1 Éoliennes terrestres

Les éoliennes convertissent l'énergie du vent en énergie électrique qui est, en ce sens, totalement renouvelable et constitue par définition une source d'énergie intermittente et non pilotable, c'est-à-dire non prévisible, puisque conditionnée au niveau de vent (en général, une éolienne commence à produire à 15 km/h de vent et tourne à plein régime vers 40-50 km/h de vent).



FIGURE 1.4 – Éoliennes terrestres

### 1.5.2 Éoliennes en mer

Elles fonctionnent sur le même principe que les éoliennes terrestres. Ce sont donc des sources d'énergie renouvelable, intermittente, produisant de l'électricité à partir du vent. Elles peuvent être installées sur les fonds marins (éolien posé) ou sur une base flottante, elle-même ancrée aux fonds marins (éolien flottant). Elles sont en revanche différentes des éoliennes terrestres sur plusieurs points : le vent en mer étant plus fort et plus constant que sur terre, les éoliennes offshore possèdent un rendement plus élevé que leurs équivalentes terrestres. Enfin, les éoliennes installées en mer sont deux à trois fois plus puissantes que les éoliennes à terre, ce qui permet de produire plus d'électricité par éolienne. Les espaces maritimes étendus permettent d'installer des parcs de grande taille, composés de plusieurs dizaines d'éoliennes, mais leur implantation doit se faire en conciliant les différents usages maritimes.



FIGURE 1.5 – Éoliennes en mer

## 1.6 L'énergie du soleil

L'énergie solaire permet de produire soit de la chaleur, soit de l'électricité à travers différents procédés de captation : photovoltaïque, thermique et thermodynamique.

### 1.6.1 Energie solaire thermique

Contrairement à la forme photovoltaïque, le solaire thermique capte la chaleur du soleil. Cette chaleur peut être utilisée directement ou transformée en énergie mécanique, puis en électricité.

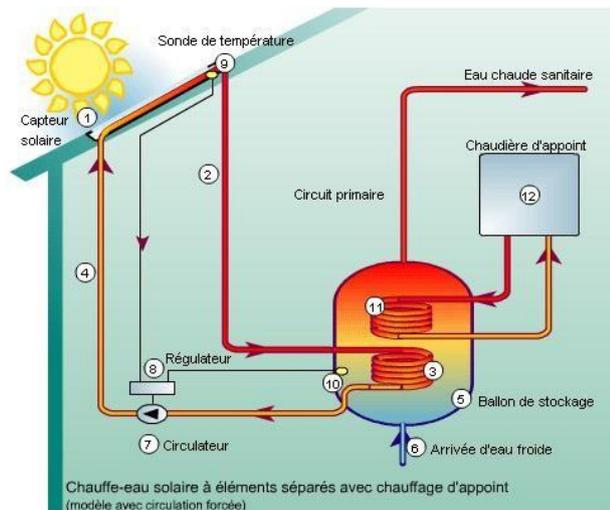


FIGURE 1.6 – Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique

### 1.6.2 Energie solaire thermodynamique

Cette technologie permet de convertir l'énergie des rayons solaires en chaleur, puis d'utiliser cette chaleur pour produire un courant électrique. Contrairement à l'énergie solaire photovoltaïque, l'électricité n'est pas produite directement, mais à partir de la chaleur générée.

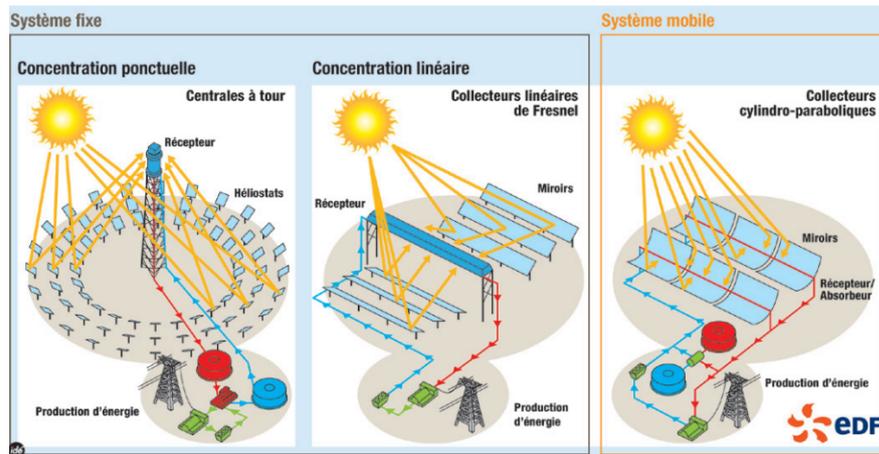


FIGURE 1.7 – les trois principaux systèmes thermodynamique a concentration

### 1.6.3 Energie Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque transforme directement le rayonnement solaire en électricité via des cellules photovoltaïques intégrées dans des panneaux solaires. Ces panneaux peuvent être installés sur les toits, dans des centrales solaires, ou intégrés à des structures.

Les avantages de l'énergie photovoltaïque incluent sa propreté, son caractère renouvelable et sa capacité à être déployée à différentes échelles, de l'installation domestique aux grandes centrales. Avec les avancées technologiques et la baisse des coûts de production, elle devient de plus en plus accessible et économiquement viable. Toutefois, son efficacité dépend des conditions environnementales comme la température et l'irradiation solaire, nécessitant des techniques de suivi et d'optimisation pour maximiser le rendement.



FIGURE 1.8 – Énergie photovoltaïque

## 1.6.4 Cellule PV

Les différents types de cellules photovoltaïques sont :

### 1. Silicium monocristallin

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher.



FIGURE 1.9 – Plaque de silicium monocristallin

### 2. silicium poly-cristallin

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser.



FIGURE 1.10 – Plaque de silicium poly cristallin

### 3. silicium amorphe

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin ; les cellules sont constituées par des couches très minces

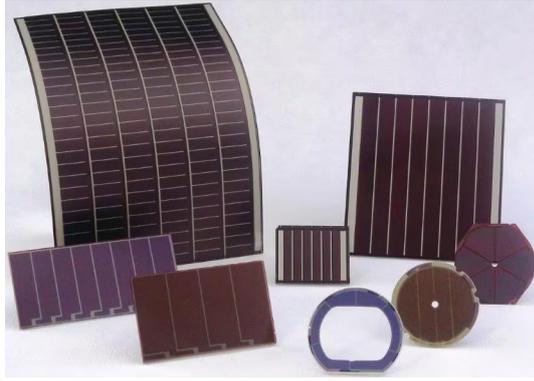


FIGURE 1.11 – Plaque de silicium amorphe

### 1.6.5 Principe de fonctionnement d'une cellule PV

Une cellule photovoltaïque est composée d'un semi-conducteur avec une bande de conduction, une bande de valence, et une bande interdite les séparant. Le niveau de Fermi, situé entre ces deux bandes, représente le potentiel électrochimique.

L'effet photovoltaïque se produit lorsqu'un photon est absorbé par un matériau composé de semi-conducteurs dopés de types p (positif) et n (négatif), formant ainsi une jonction p-n (ou n-p).

Ce dopage crée un champ électrique permanent au sein du matériau. Lorsque un photon incident (particule de lumière) interagit avec les électrons du semi-conducteur, il transfère son énergie ( $h$ ) à un électron, le libérant ainsi de sa bande de valence et le plaçant sous l'influence du champ électrique interne. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la surface supérieure, tandis qu'un trou est laissé derrière, se déplaçant dans la direction opposée.

Des électrodes placées sur les surfaces supérieure et inférieure recueillent les électrons, leur permettant de réaliser un travail électrique avant de rejoindre les trous sur la face opposée.

La figure (1.12) donne illustre la structure d'une cellule photovoltaïque :

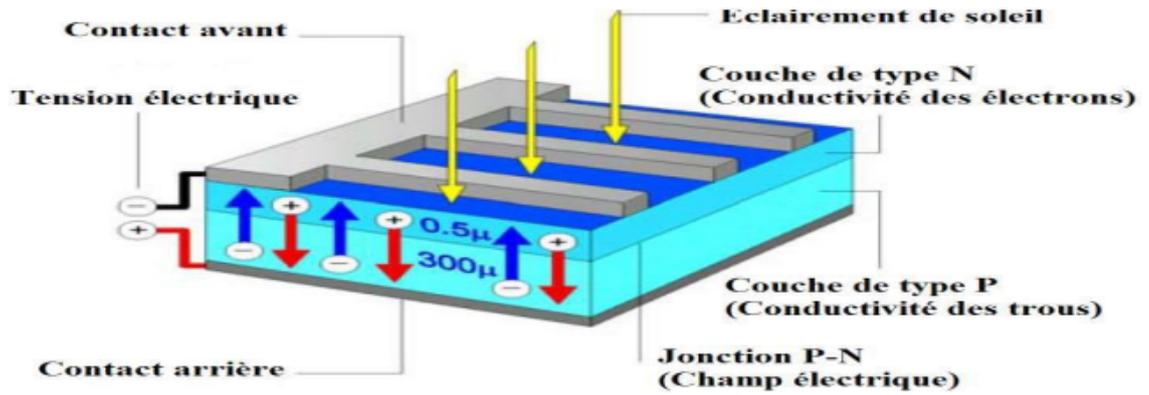


FIGURE 1.12 – Structure d'une cellule photovoltaïque

### 1.6.6 Le module photovoltaïque (le panneau solaire)

- La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt (0,6 V).
- Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module ou panneau.
- Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant.
- La mise en parallèle des cellules accroît le courant en conservant la tension.
- Les cellules sont connectées entre elles par des fins rubans métalliques, des contacts en face avant (-) au contact en face arrière (+).

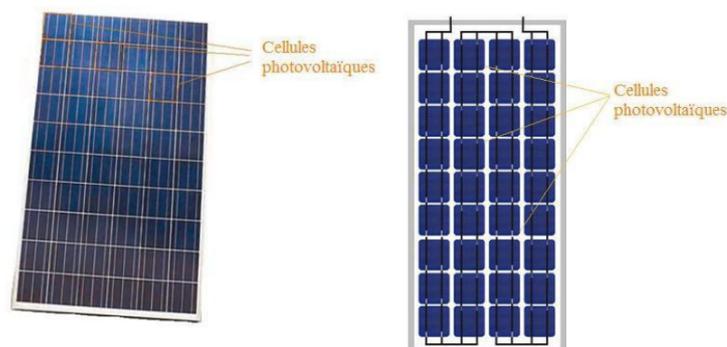


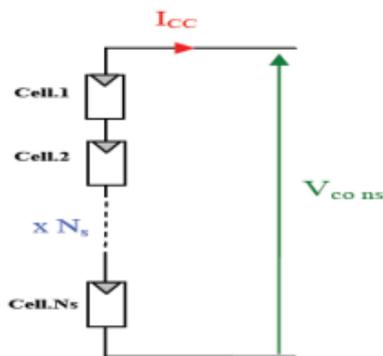
FIGURE 1.13 – Le module photovoltaïque

### 1.6.6.1 Groupement en série

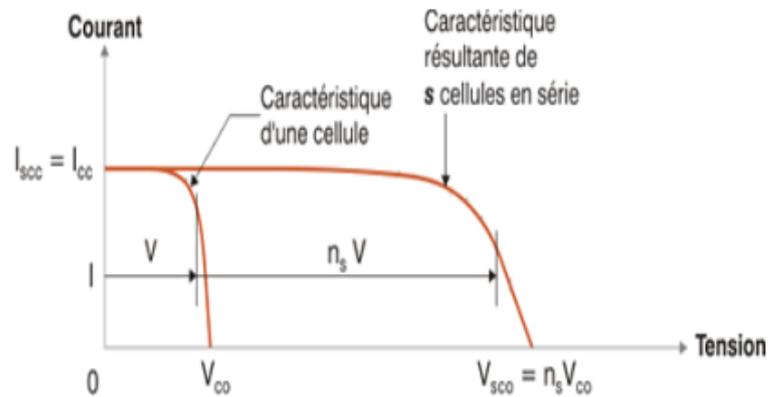
Pour augmenter la tension du générateur PV, on dispose d'un nombre ( $N_s$ ) de cellules en série. Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule comme le montre la figure (1.14). L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série de ( $N_s$ ) cellules.

$I_{sc} = I_{cc}$  : le courant de court-circuit

$V_{sco} = n_s \times V_{co}$  : la tension de circuit ouvert



a) groupement de ( $N_s$ ) cellules identiques



b) Caractéristique résultante d'un groupement en série de ( $n_s$ ) cellules identiques

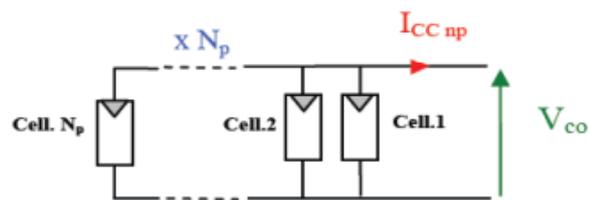
FIGURE 1.14 – (a.b). Association de cellules en séries

### 1.6.6.2 Groupement en parallèle

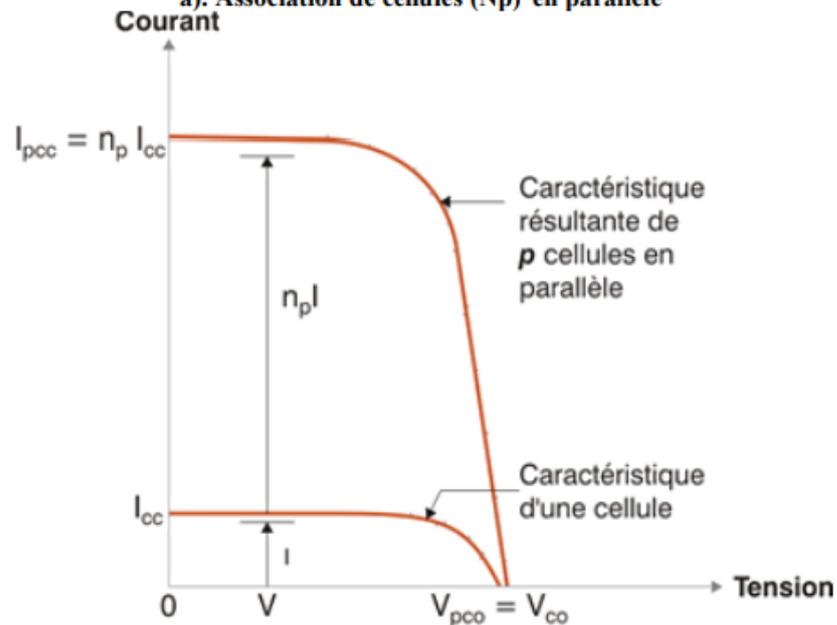
Pour accroître le courant du générateur PV, il suffit d'installer un nombre ( $N_p$ ) de cellules en parallèle. Toutes les cellules sont soumises à une tension identique, et la caractéristique électrique globale du groupe est obtenue en additionnant les courants individuels. L'équation suivante récapitule les propriétés électriques d'une configuration parallèle de ( $N_p$ ) cellules comme le montre la figure (1.15) :

$I_{pcc} = n_p \times I_{cc}$  : le courant de court-circuit

$V_{pco} = V_{co}$  : la tension de circuit ouvert



a). Association de cellules ( $N_p$ ) en parallèle



b) Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de ( $n_p$ ) cellules identiques

FIGURE 1.15 – (a.b).Association de cellules en parallèle

### 1.6.6.3 Le générateur photovoltaïque (Groupement mixte)

Les panneaux solaires résultent de la combinaison de cellules photovoltaïques en série, formant ainsi des modules. Lorsqu'ils sont connectés en série et munis de diodes de dérivation et de blocage, ces panneaux solaires forment une chaîne PV. Un générateur photovoltaïque est constitué de chaînes PV parallèles. Des diodes de blocage sont utilisées pour prévenir le courant de retour. En cas de défaillance de certains modules PV, les diodes de dérivation sont activées, permettant à la chaîne de maintenir la production d'énergie tout en évitant les points chauds qui pourraient endommager de manière permanente les panneaux solaires. Selon la puissance requise, les panneaux solaires peuvent être assemblés pour former un "champ PV" représenté dans la figure (1.16).

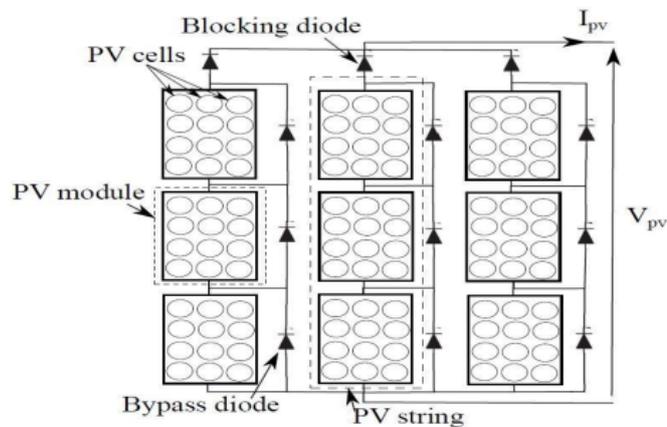


FIGURE 1.16 – Composants du générateur photovoltaïque

## 1.7 Potentiel d'énergie solaire en Algérie

Vue de sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde comme le montre la figure (1.17) ci-dessous. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  soit près de 3  $\text{KWh}/\text{m}^2$  au nord et dépasse 5,6  $\text{KWh}/\text{m}$  au Grand Sud.

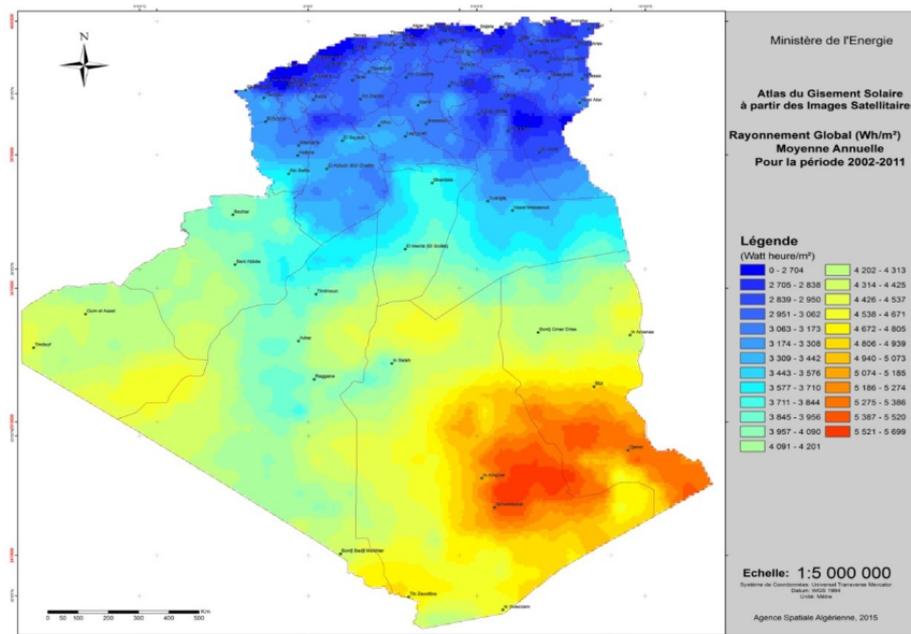


FIGURE 1.17 – Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne (2002-2011)

## 1.8 Conclusion

dans ce chapitre, nous avons exploré les différents types d'énergie renouvelable, en mettant un accent particulier sur l'énergie solaire. L'énergie solaire, notamment sous sa forme photovoltaïque.

Nous avons détaillé la constitution des cellules photovoltaïques, la manière dont elles sont assemblées en panneaux, et leur intégration dans des générateurs PV.

La structure économique du pays reste fortement dépendante des hydrocarbures, mais au fil du temps, ces réserves ont commencé à diminuer.

Grâce à son exposition solaire importante tout au long de l'année, due à son emplacement géographique privilégié, l'Algérie a le potentiel de développer à grande échelle le photovoltaïque et le solaire thermique. Ainsi, le pays se profile comme une nation capable de fournir de l'électricité solaire ou verte à l'échelle mondiale.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi de nous concentrer sur l'énergie solaire en raison de ses avantages significatifs dans le contexte du développement durable et de la transition énergétique en Algérie.

# Chapitre 2

## Modélisation de panneau photovoltaïque

### 2.1 Introduction

La modélisation des panneaux photovoltaïques (PV) est une étape cruciale pour comprendre et optimiser leur performance. Ce chapitre se concentre sur la compréhension des caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques, essentielle pour concevoir des systèmes PV efficaces et fiables. Nous aborderons les équations de base qui régissent le fonctionnement des cellules solaires, en mettant en évidence les principaux paramètres influençant leur performance.

### 2.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle pratique, également désigné sous le nom de modèle à une diode, est reconnu pour parvenir à un équilibre judicieux entre la complexité et la précision.

Le modèle mathématique se trouve à partir de celui d'une jonction PN représentée par une diode ou y ajoute le courant  $I_{PV}$  proportionnelle à la quantité de photons reçu par la cellule en intégrant un générateur de courant on y ajoute deux résistances ( $R_p, R_s$ ) (pour tenir compte des pertes).

D'où l'équation  $I=f(V)$  :

$$I_c = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp\left(\frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (2.1)$$

Ou :

$$I_{pv\text{cell}} = a_1 \cdot G \cdot \text{Photo courant}(A).$$

Avec :

$$a_1 = 2.5 \times 10^{-7} T + 2 \times 10^4 \text{ [en } A/(w/m^2)\text{]}$$

$$I_D = I_{sat\text{cell}} \left( \exp\left(\frac{q \cdot V}{a \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

Avec :

- $I = I_{pv\text{cell}} - I_D$ .
- $V_T = KT/q$  : la potentielle thermodynamique à une température donnée.
- $I_D$  : le courant d'une jonction PN (A).
- $I_{sat}$  : le courant de saturation(A).
- $R_s$  : résistance série ( $\Omega$ ).

Représente les pertes résistives dues à la résistance interne des matériaux conducteurs et des connexions dans le panneau photovoltaïque.

- $R_p$  : résistance parallèle (shunt) ( $\Omega$ ).

Elle incluent pertes par fuite de courant à travers la jonction lorsqu'elle est polarisée, ainsi qu'aux pertes dues aux défauts du matériau semi-conducteur et aux chemins de courant de fuite.

- $K$  : la constante de Boltzmann ( $k=1.38 \times 10^{-3}$  (j / °k)).
- $V$  : Tension aux bornes de la diode (V).
- $q$  : la charge de l'électron ( $q=1.6 \times 10^{-19}$ (c)).
- $T$  : la température de la cellule (°k).
- $a$  : le facteur d'idéalité ( $1 \leq a \leq 2$ ,  $a = 2$  pour une diode en silicium).

On peut deduire de ces expressions, un schema équivalent comme le montre la figure 2.1.

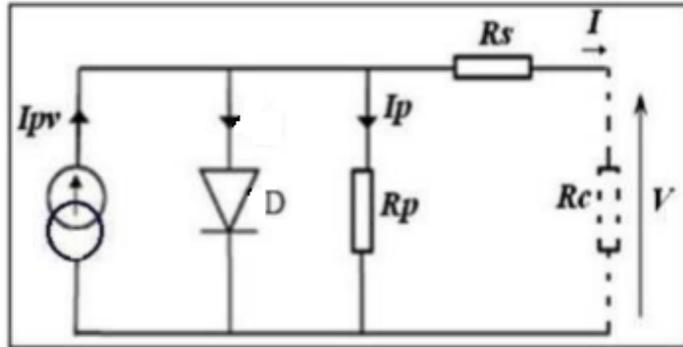


FIGURE 2.1 – Circuit électrique équivalent d'une cellule PV à une diode

## 2.3 Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Après avoir procédé à la caractérisation de la cellule photovoltaïque, la modélisation du module s'effectue en le considérant comme une combinaison de NS cellules en série et NP cellules en parallèle. De manière similaire, le courant de court-circuit du module est multiplié par NP, tandis que la tension en circuit ouvert du module est multipliée par NS.

La caractéristique d'un module, constitué de NS cellules connectées en série et de NP cellules connectées en parallèle, peut ainsi être exprimée par :

$$I_p = I_{pv\text{cell}} - I_{sat\text{cell}} \left( \exp\left(\frac{V + R_s I}{a \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (2.3)$$

Avec :

$$I_{pv} = I_{pv\text{cell}} \times NP$$

et

$$I_{sat} = I_{sat\text{cell}} \times NP$$

ET  $V_T = \frac{N_s KT}{q}$  : la potentielle thermodynamique d'un panneau photovoltaïque.

Les équations du modèle sont présentées en détails et le modèle est validé avec les données Expérimentales.

Le courant produit par le panneau photovoltaïque varie de manière linéaire en fonction de l'irradiation solaire et est également affecté par la température, comme le décrit l'équation suivante :

$$I_{pv} = \frac{\left( I_{pvn} + K_1 \Delta_T \right) G}{G_n} \quad (2.4)$$

Avec :

- $I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} \times I_{ccn}$ .
- $I_{pvn}$  est le courant nominal généré (donné aux conditions nominales :  $T = 25^\circ C$  et  $G = 1000 W/m^2$ ),
- $\Delta_T = T - T_n$  : ( $T$  et  $T_n$  étant la température réelle et nominale [K]).
- $G (W/m^2)$  : est l'irradiation sur la surface du dispositif.
- $G_n$  : est l'irradiation nominale.

L'hypothèse  $I_{cc} \approx I_{pv}$  est généralement utilise dans les modèles photovoltaïques, car dans les Dispositifs pratiques la série la résistance est faible et la résistance parallèle est élevée

$$I_{cc} = \frac{\left( I_{ccn} + K_1 \Delta_T \right) G}{G_n}.$$

- $I_{cc}$  : courant de court-circuit.

Le courant de saturation  $I_{sat}$  de diode et de sa dépendance sur le la température peut être exprimée par :

$$I_{sat} = I_{satn} \left( \frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left( \frac{q E_g}{a k} \left( \frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (2.5)$$

$$I_{satn} = \frac{I_{ccn}}{\exp \left( \frac{V_{ccn}}{a V_{Tn}} \right) - 1} \quad (2.6)$$

- $E_g$  : l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur ( $g \approx 1,12$  Ev pour le silicium à  $25^\circ\text{C}$ ).
- $I_{sat}$  : le courant de saturation nominale.
- $V_{Tn}$  : la tension thermique à la température nominale.

Le modèle photovoltaïque décrit dans la section précédente peut être améliorée et remplacé par :

$$I_{sat} = \frac{I_{ccn} + K_i \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{ccn} + K_v \Delta T}{a V_T}\right) - 1} \quad (2.7)$$

L'équation (2.8) peut être introduite dans le modèle :

$$I_{pvn} = \frac{R_p + R_s}{R_p} \times I_{ccn} \quad (2.8)$$

## 2.4 Modélisation d'un générateur

L'équation caractéristique pour un ensemble de modules, résultant de la sérialisation de modules  $M_s$  et de la mise en parallèle de modules  $M_p$ , est dérivée de celle d'un module individuel.

$$I_G = M_P I_{PV} M_P \left[ \exp\left(M_s V + \frac{M_s R_s I}{a M_P V_T} - 1\right) \right] - \left( \frac{M_s \cdot V + \frac{M_s R_s I}{M_P}}{\frac{R_P M_s}{M_P}} \right) \quad (2.9)$$

Cette relation reste valide uniquement lorsque tous les modules qui forment le générateur PV sont identiques et exposés à la même irradiation, présentant ainsi la même caractéristique (I-V).

## 2.5 Simulation du panneau PV ND-240QCJ

Dans notre travail, nous avons choisi le panneau PV ND-240QCJ, dont les données sont regroupées dans le tableau 2.1. Le model en simulink avec le shema bloc détaillé du PV sont donnée dans les figures respectivement 2.2 et 2.3 .

Paramètre	La Valeur
Irradiance et température au STC	$1000W/m^2, 25C$
Puissance maximum (Pmax)	240 W
tension en Pmax (Vmp)	29.3 V
courant en Pmax (Imp)	8.19 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	37.50 A
Courant en circuit ouvert (Isc)	8.75 A
Nombre de cellules	60 en série
Dimension Module	1640x994x46 mm
Tolérance Puissance	+5%/ - 0%

TABLE 2.1 – Caractéristiques du panneau PV ND-240QCJ

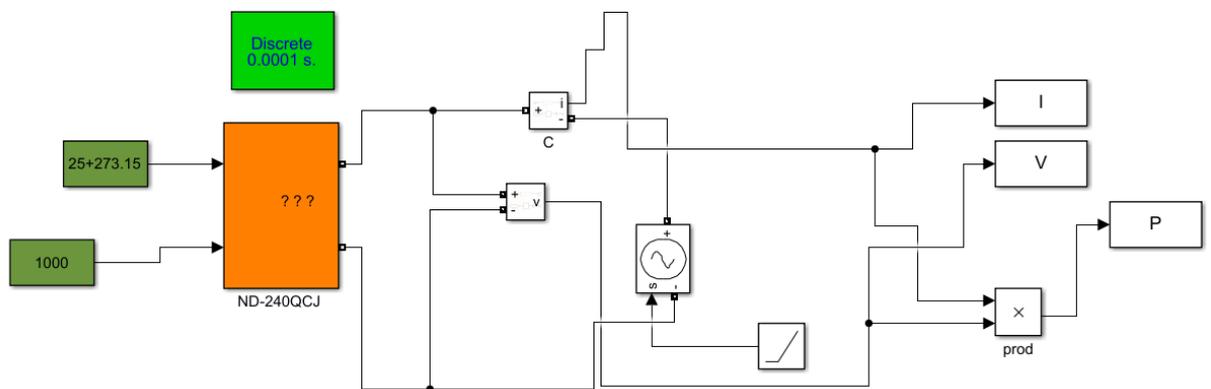


FIGURE 2.2 – Model de caractérisation de panneau PV ND-240QCJ en Simulink

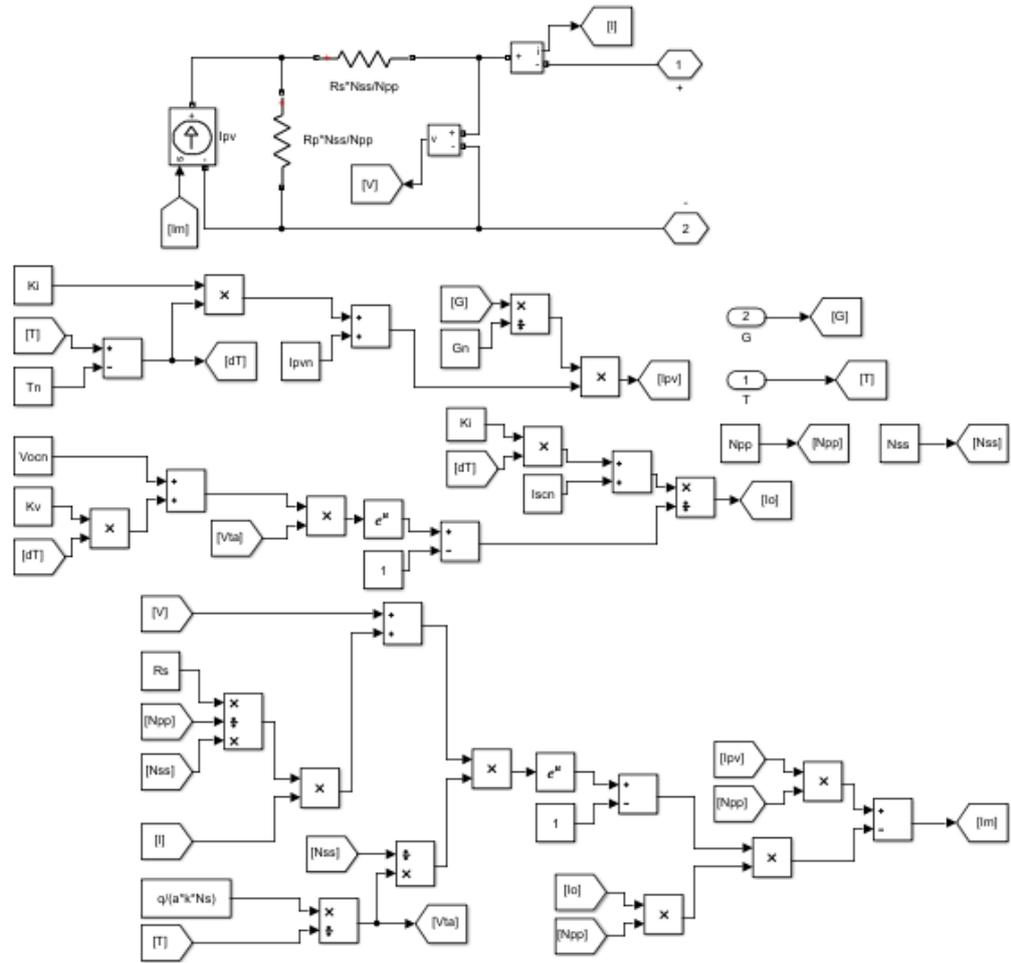


FIGURE 2.3 – Schéma bloc détaillé du module photovoltaïque

## 2.6 Effet des conditions environnementales sur le fonctionnement des générateurs photovoltaïques

Les conditions climatiques variables ont un impact direct sur les caractéristiques électriques des générateurs photovoltaïques. Ces variations se manifestent particulièrement aux points de fonctionnement spécifiques, à savoir :

- Le point de fonctionnement en circuit ouvert ; caractérisé par un courant de sortie nul  $I_{pv} = 0$  et une tension de sortie en circuit ouvert  $V_{pv} = V_{oc}$ .
- Le point de fonctionnement en court-circuit, caractérisé par une tension de

sortie nulle  $V_{pv} = 0$  et un courant de court-circuit  $I_{pv} = I_{sc}$ .

- Le Maximum Power Point (MPP), caractérisé par un courant de sortie  $I_{pv} = I_{MPP}$ , une tension de sortie  $V_{pv} = V_{MPP}$ , et une puissance maximale extremum.  $\frac{\partial p_{pv}}{\partial v_{pv}} = \frac{\partial p_{pv}}{\partial i_{pv}} = 0$

## 2.7 Résultats de simulation

### 2.7.1 Effet de la variation de l'irradiation (rayonnement) solaire

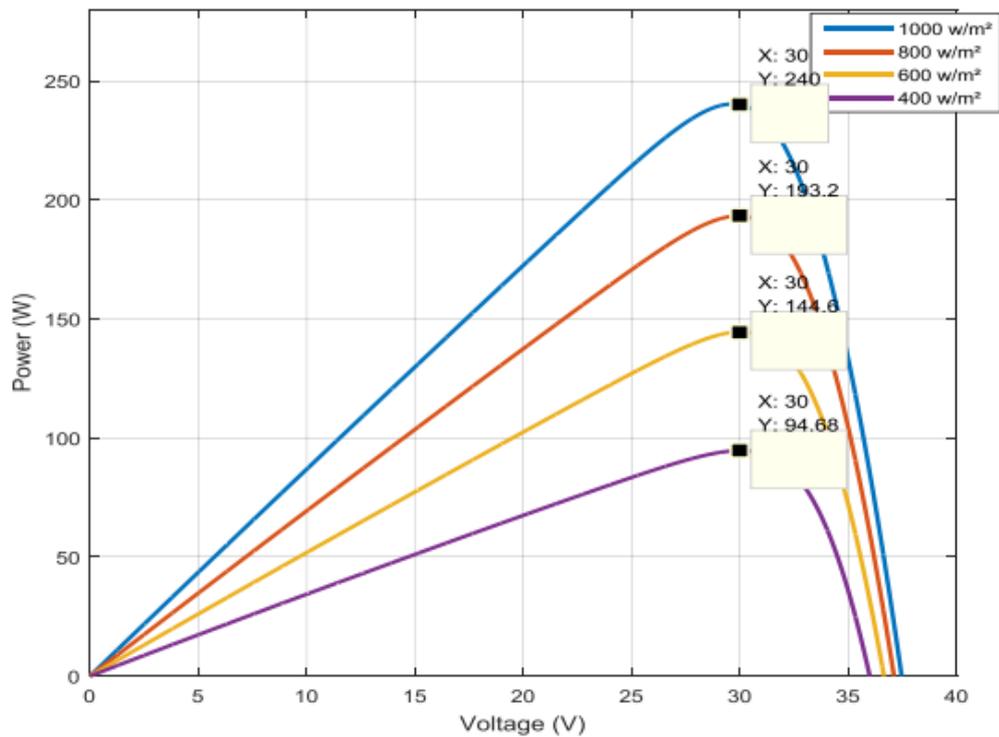


FIGURE 2.4 – Effet d irradiation variable avec température constante  $T = 25C$  sur la courbe caractéristique P-V

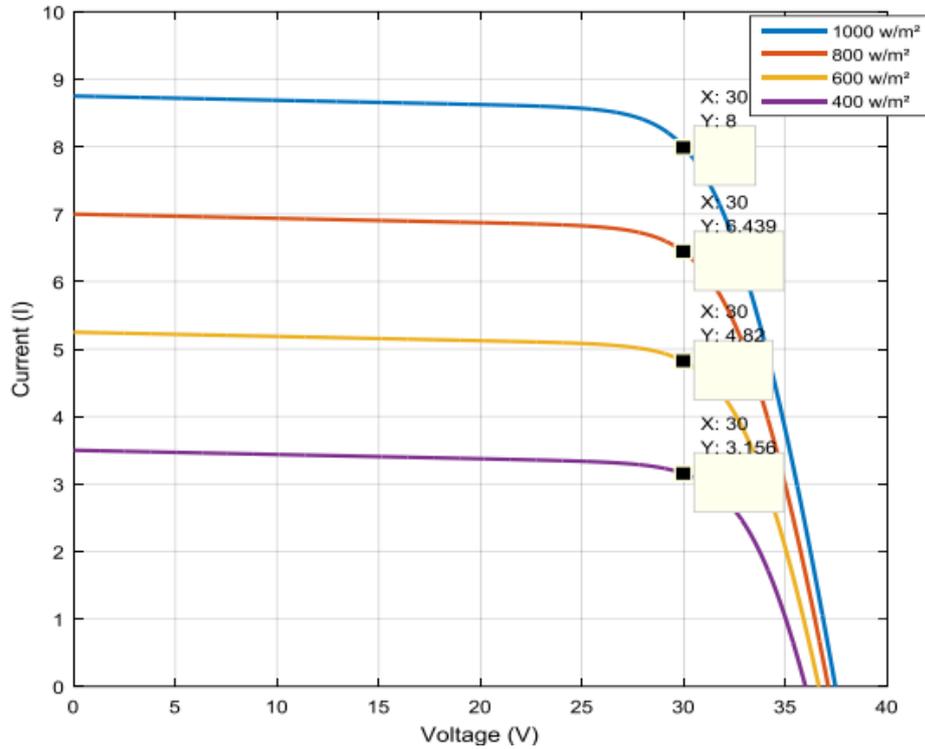


FIGURE 2.5 – Effet de l’irradiation variable avec tempirature constante  $T = 25C$  sur la courbe caractéristique I-V

### interprétation des resultats :

La variation du rayonnement solaire est identifiée comme le principal facteur perturbateur des systèmes de conversion d’énergie photovoltaïque, en raison de sa dynamique plus rapide par rapport à la température et de son impact plus significatif sur la puissance de sortie des systèmes PV.

Son effet prédominant se manifeste principalement sur le courant de court-circuit  $I_{sc}$  du générateur PV, comme illustré dans la figure 2.5, avec une influence relativement mineure sur la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ .

### 2.7.2 Effet de la variation de la température

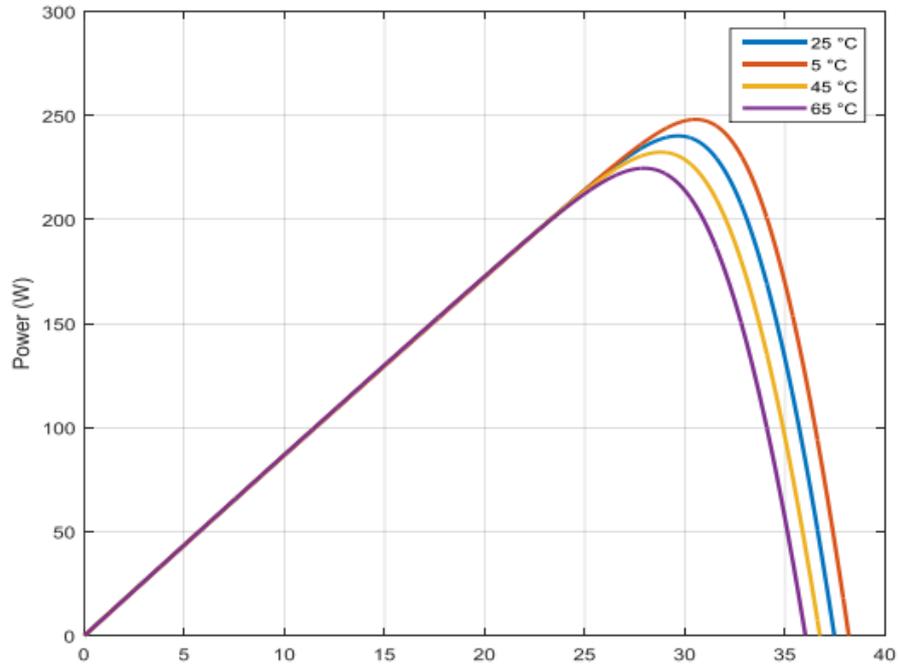


FIGURE 2.6 – Effet de la température variable avec irradiation constante  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  sur la courbe caractéristique P-V

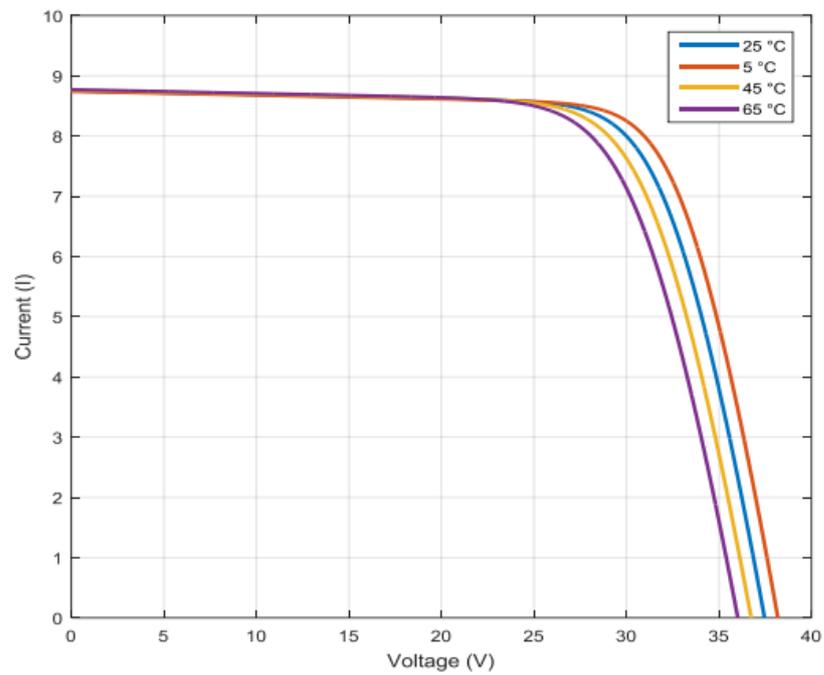


FIGURE 2.7 – Effet de la température variable avec irradiation constante  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  sur la courbe caractéristique I-V

### **interprétation des resultats :**

Les graphiques P-V et P-I présentés dans les figures 2.4 et 2.5 illustrent l'influence de la variation de la température sur les performances du générateur photovoltaïque.

Une augmentation de la température entraîne une réduction du Point de Puissance Maximale (MPP), ce qui se traduit par une diminution des performances, ainsi que des fluctuations correspondantes de la tension en circuit ouvert.

## **2.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, il est essentiel de souligner l'importance de la modélisation du panneau photovoltaïque (PV) pour prédire et optimiser son rendement dans des conditions réelles. En examinant l'effet de la température et de l'irradiation sur le point de puissance maximale (MPP), nous avons mis en évidence la sensibilité du système PV aux variations environnementales.

Après avoir approfondi la modélisation des panneaux photovoltaïques et compris les caractéristiques électriques des cellules solaires, il est essentiel d'examiner comment cette énergie peut être efficacement régulée et utilisée, en entercalant entre le panneau PV et la charge un convertisseur DC/DC , ce que nous verrons dans le chapitre suivant en explorant deux types de hacheurs : le hacheur série simple et le hacheur série entrelacé.

# Chapitre 3

## Les hacheurs (Convertisseur DC/DC)

### 3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons deux types de hacheurs : le hacheur série simple et le hacheur série entrelacé. Ces deux dispositifs sont des convertisseurs DC/DC largement utilisés dans les systèmes d'énergie renouvelable pour réguler et contrôler la tension et le courant. Nous débuterons par une introduction aux principes de fonctionnement de chaque type de hacheur, en mettant en lumière leurs avantages et leur modélisation. Par la suite, nous aborderons en détail la mise en œuvre de simulations sur MATLAB pour chaque configuration, ce qui nous permettra de comparer leurs performances. Cette analyse approfondie nous offrira une meilleure compréhension des caractéristiques et des applications de ces dispositifs cruciaux dans les systèmes d'énergie renouvelable.

### 3.2 Hacheur BUCK

#### 3.2.1 Hacheur BUCK avec charge inductive "RL"

Le hacheur série buck (figure 3.1), également connu sous le nom de convertisseur abaisseur, est un dispositif électronique qui convertit une tension continue (DC) d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Il utilise un interrupteur électronique, comme un transistor MOSFET, en combinaison avec des composants passifs tels qu'une diode, une inductance et un condensateur, pour abaisser la tension d'entrée tout en augmentant le courant de sortie.

Ce type de convertisseur est largement utilisé dans les systèmes d'énergie renouvelable, notamment pour adapter la puissance générée par les panneaux photovoltaïques aux besoins spécifiques des charges.

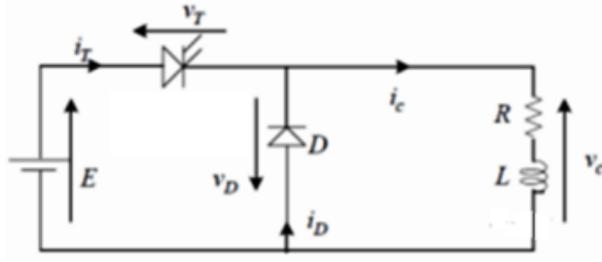


FIGURE 3.1 – Hacheur BUCK avec charge inductive

$0 < t < \alpha T$  : H est commandé à la fermeture, donc il va devenir passant et la diode D sera bloquée.

$$v_H = 0 \quad v_D = E$$

$$v_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} = E \Rightarrow i_c(t) = (I_{min} - \frac{E}{R}) e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E}{R} \quad \text{avec } I_{min} = I_0 = i_c(0)$$

A ( $t = \alpha T$ ) le courant atteint sa valeur maximale :

$$I_{max} = i_c(\alpha T) = (I_{min} - \frac{E}{R}) e^{-\frac{\alpha T}{\tau}} + \frac{E}{R}$$

$\alpha T < t < T$  : H est ouvert et la diode de roue libre D devient passante. ce qui permet à l'inductance de libérer l'énergie électromagnétique qu'elle avait accumulée.

L'équation différentielle du courant de la charge sera la suivante :

$$v_D = 0 \quad v_E = E$$

$$v_c = R i_c + L \frac{di_c}{dt} = 0 \Rightarrow i_c(t) = I_{max} e^{-\frac{t-\alpha T}{\tau}} \quad \text{avec } I_{max} = i_c(\alpha T)$$

$$\text{D'ou } I_{min} = i_c(T) = I_{max} e^{-\frac{T-\alpha T}{\tau}}$$

**Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :**

$$v_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_c(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt$$

$$v_{cmoy} = \alpha E$$

Ce hacheur est équivalent donc à un transformateur à courant continu avec  $\alpha$  comme rapport de transformation.

Donc nous pouvons voir l'allure des tensions et courants en **conduction continue** (charge RL avec DRL) dans la figure(3.2)

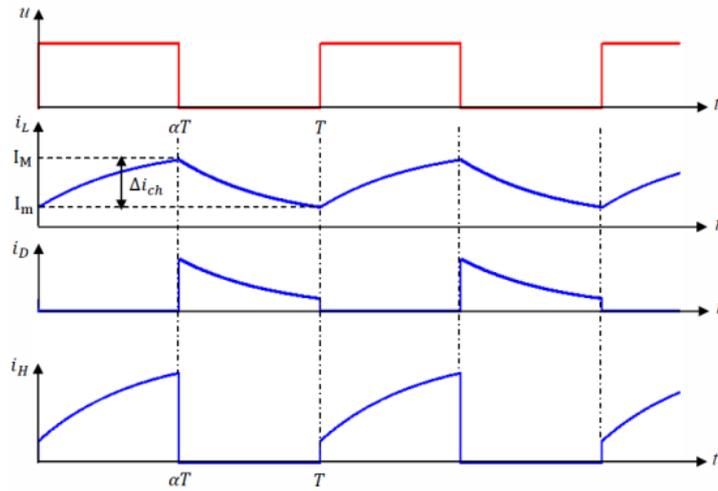


FIGURE 3.2 – Forme d’ondes d’Hacheur BUCK charge RL en conduction continue

Et l’allure des Tensions et courants en **conduction discontinue** (charge RL avec DRL) À la figure(3.3)

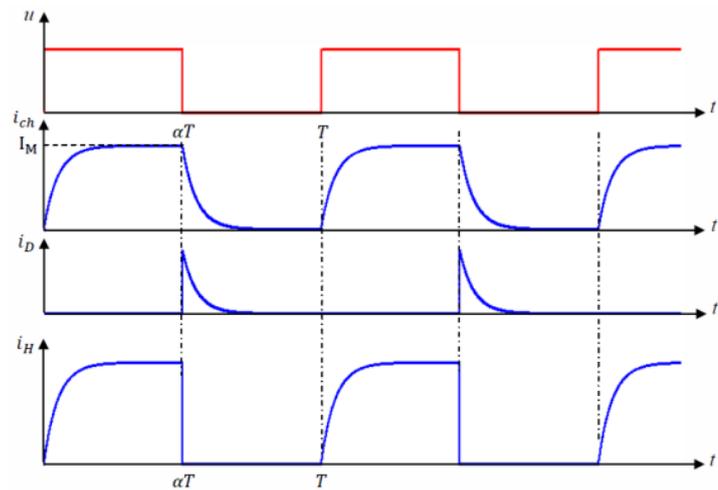


FIGURE 3.3 – Forme d’ondes d’Hacheur BUCK charge RL en conduction discontinue

### 3.3 Hacheurs Buck entrelacés

Dans le but d'accroître la densité de puissance, une option serait d'augmenter la fréquence de découpage du hacheur Buck. Cela permettrait de réduire la valeur de l'inductance, et donc son encombrement, sans augmenter les ondulations de courant. Cependant, cette approche entraînerait une augmentation des pertes par commutation dans les semi-conducteurs. De nombreuses recherches ont conclu que la solution la mieux adaptée pour les applications à faibles tensions et forts courants est l'utilisation de convertisseurs multicellulaires entrelacés. La figure 3.4 illustre la structure d'un hacheur Buck entrelacé à  $N$  phases.

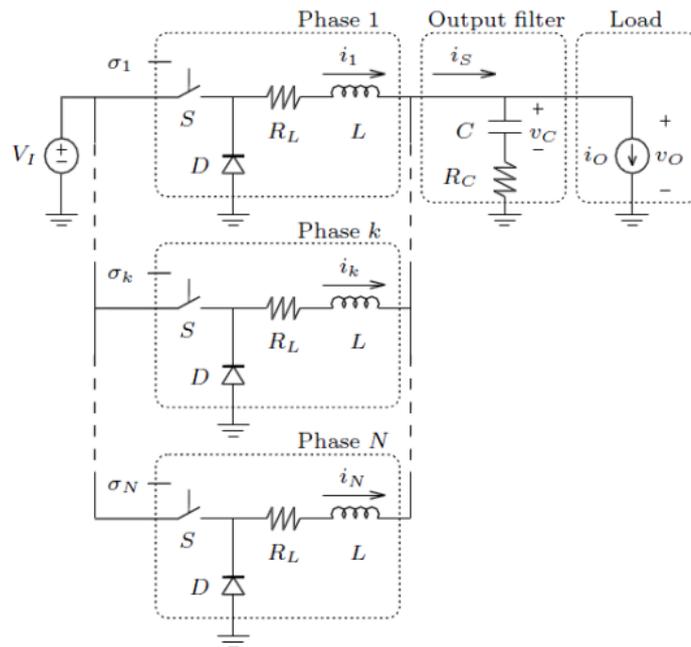


FIGURE 3.4 – Topologie d'un hacheur Buck entrelacé

Cette configuration consiste en  $N$  hacheurs série élémentaires interconnectés en parallèle par le biais d'inductances identiques ( $L_1 = L_2 = \dots = L_N = L$ ) et partageant le même condensateur de sortie. Le courant de sortie du convertisseur,  $I_s$ , est réparti sur les  $N$  phases, théoriquement traversées par le même courant moyen,  $\frac{I_s}{N}$ . Par rapport à la structure classique, cette topologie offre plusieurs avantages :

- Elle permet d'atteindre des niveaux élevés de puissance tout en utilisant des composants standards de plus faible calibre.
- L'amélioration de la forme d'onde à l'entrée et à la sortie du convertisseur est observée.
- La modularité du convertisseur assure la continuité du fonctionnement même en présence de défauts (Tolérance aux défauts).

Les signaux de commande des différents interrupteurs  $S$  ont le même rapport cyclique et sont déphasés de  $\frac{2\pi}{N}$ . Les tensions délivrées par les  $N$  phases forment un système de tensions équilibrées (même fréquence fondamentale et même contenu harmonique). La fréquence de découpage apparente en sortie du convertisseur est égale à  $N$  fois la fréquence de découpage des semi-conducteurs, comme illustré sur la figure 3.5.

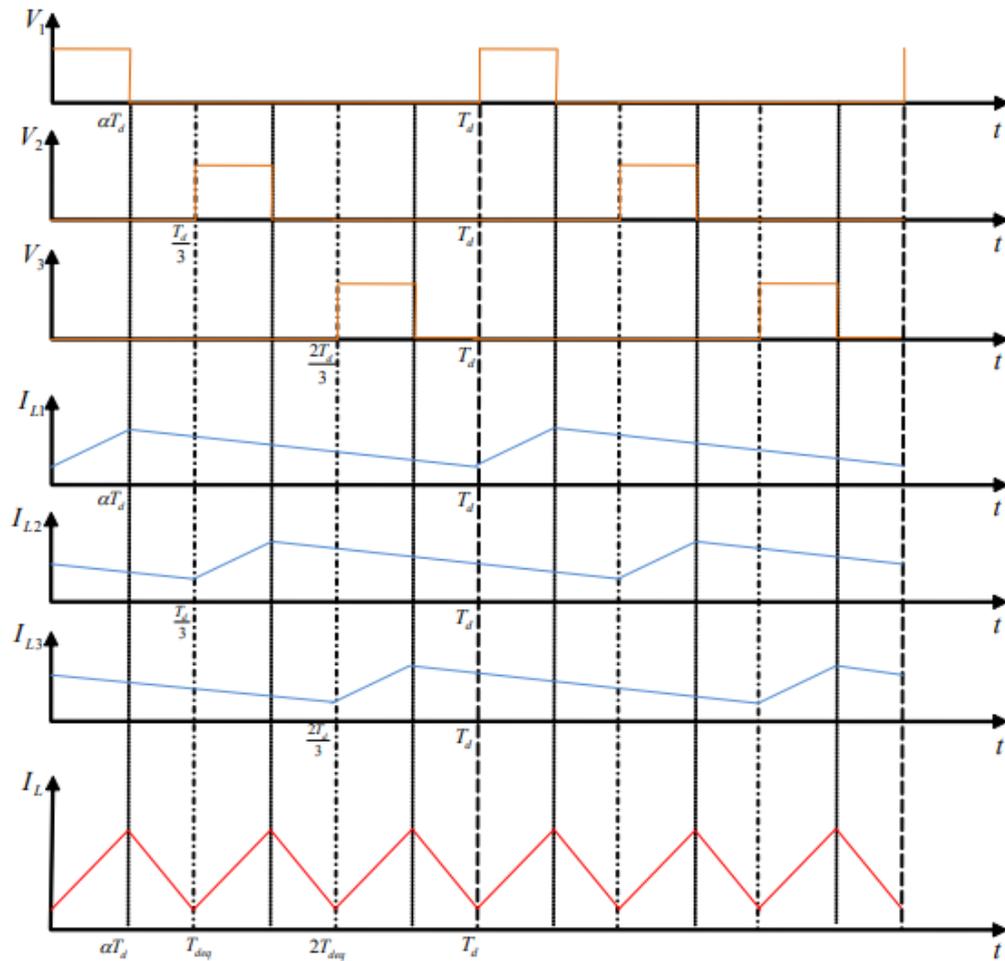


FIGURE 3.5 – Formes d’ondes pour un convertisseur 3 cellules

Un autre avantage de l’entrelacement est la diminution de l’ondulation du courant de sortie à mesure que le nombre de cellules en parallèle augmente.

## 3.4 Simulation des Hacheurs dans Matlab/Simulink

### 3.4.1 Simulation d Hacheur série charge inductive RL

Le shema et les paramètres de simulation est donnée respectivement par la figure 3.7 et le tableau 3.1.

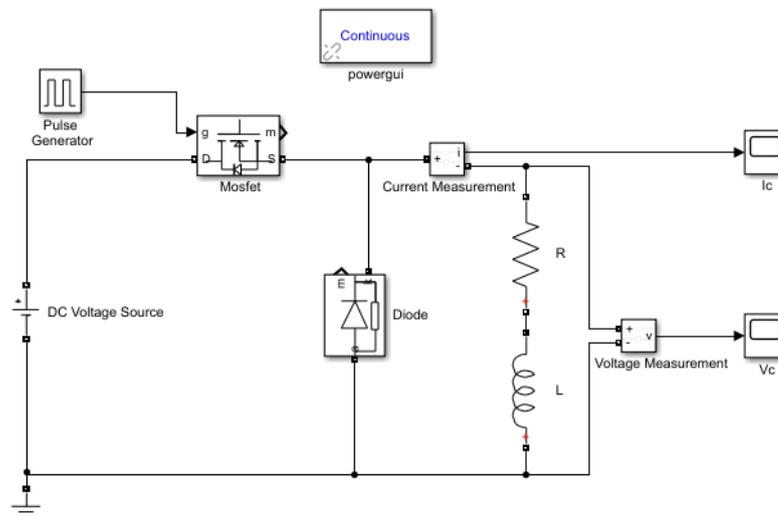


FIGURE 3.6 – Schéma bloc de simulation du hacheur BUCK charge RL

Paramètre	La Valeur
Résistance	50 $\Omega$
Inductance	0.02 H
Fréquence	2000 , 5000 Hz
La période	0.0005 , 0.0002 S
Le rapport cyclique $\alpha$	0.5
La tension de la source	30 V

TABLE 3.1 – Les paramètres de simulation du hacheur série avec charge RL

. Résultats de simulation :

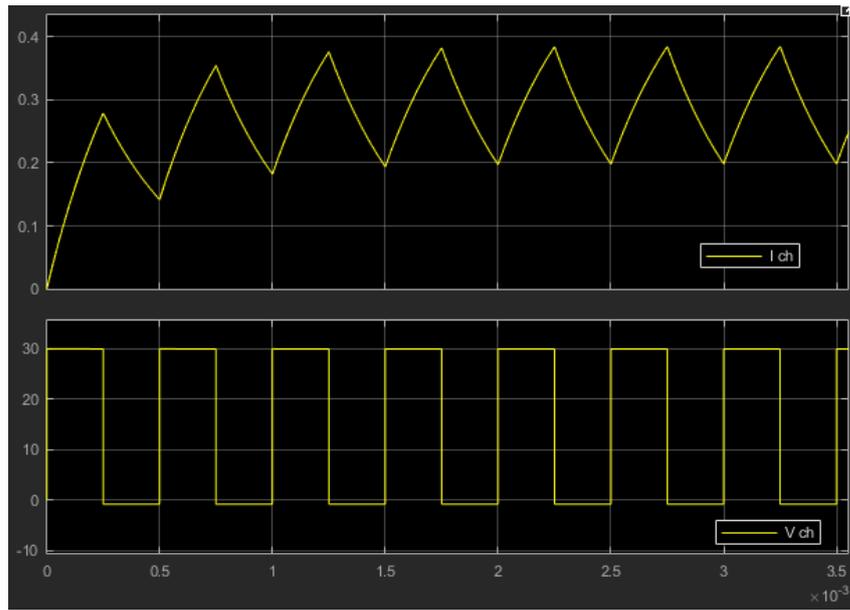


FIGURE 3.7 – Ondes de  $I_{ch}$  et  $V_{ch}$  pour le hacheur BUCK charge RL a  $F = 2000$  Hz

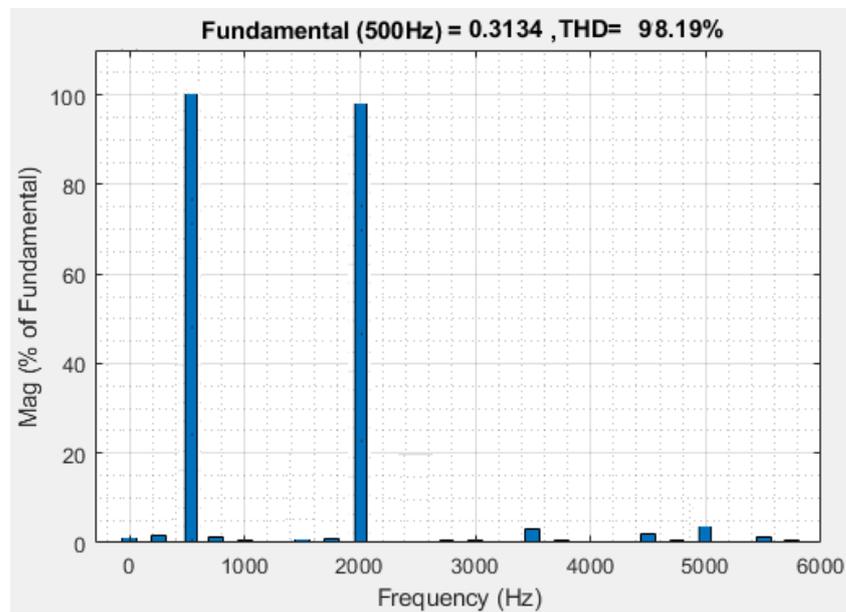


FIGURE 3.8 – spectre d harmoniques du  $I_{ch}$  pour le hacheur BUCK charge RL a une  $F = 2000$  Hz

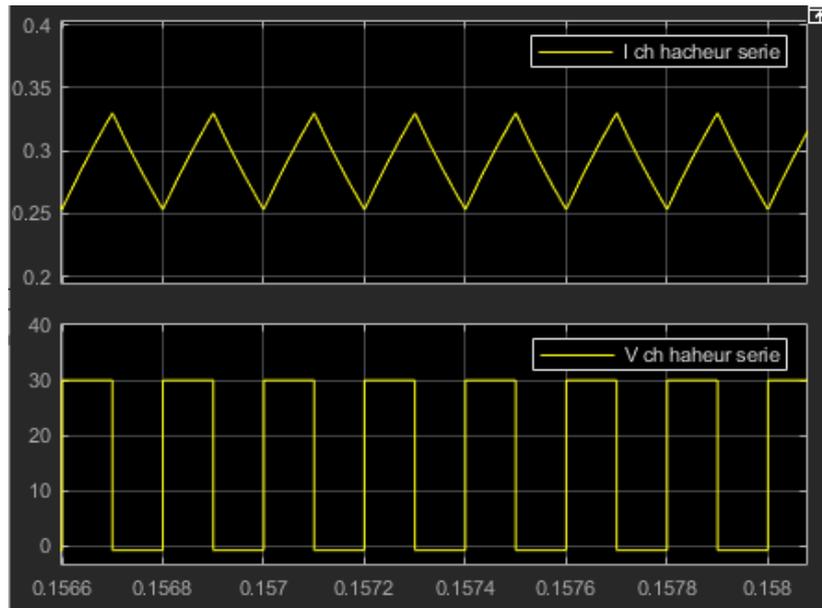


FIGURE 3.9 – Ondes de  $I_{ch}$  et  $V_{ch}$  pour le hacheur BUCK charge RL a une  $F = 5000$  Hz

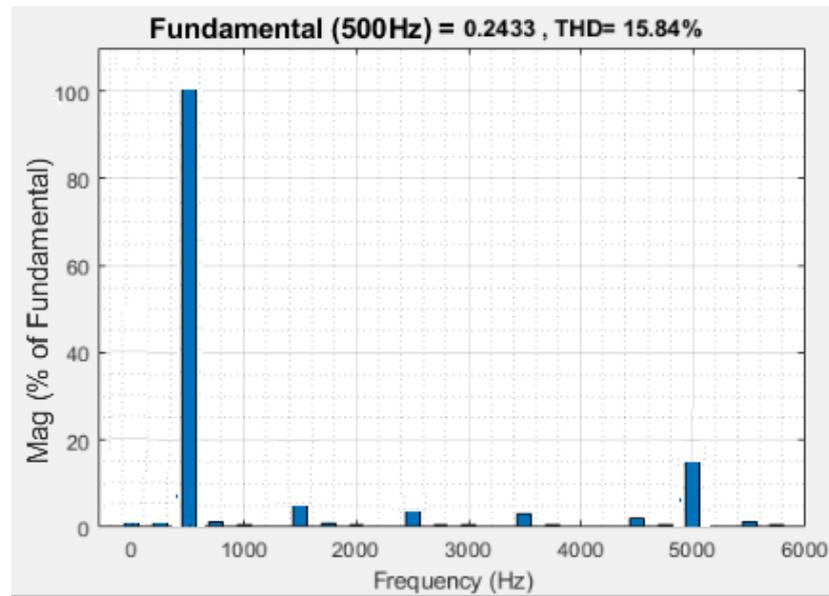


FIGURE 3.10 – spectre d harmoniques du  $I_{ch}$  hacheur BUCK charge RL a une  $F = 5000$  Hz

## Interprétation des résultats :

Les graphiques 3.7 et 3.9 présentent le tension et le courant de charge d un hacheur buck simple pour différentes valeurs du fréquence 2000 et 5000 Hz. Une observation importante à noter est que :

- . Ondulation de courant plus faible :
  - A mesure que la fréquence de commutation augmente, l'ondulation de courant à travers l'inductance de la charge diminue, grâce à une réduction du temps de commutation. Cela permet une réponse plus rapide du courant et limite les variations à travers l'inductance.
- . En ce qui concerne le mode de fonctionnement :
  - À des fréquences plus élevées, le hacheur a tendance à opérer en mode continu, car le temps disponible pour la variation du courant dans l'inductance est réduit. Cela favorise la circulation continue du courant dans l'inductance pendant toute la période de commutation.
  - À des fréquences plus basses, le temps disponible pour la variation du courant dans l'inductance est plus long. Cela peut conduire à des périodes où le courant dans l'inductance atteint zéro avant la prochaine commutation, entraînant ainsi un fonctionnement en mode discontinu.

### 3.4.2 Simulation Hacheur entrelacé

le schéma et les paramètres de simulation est donnée respectivement par la figure 3.10 et le tableau 3.10.

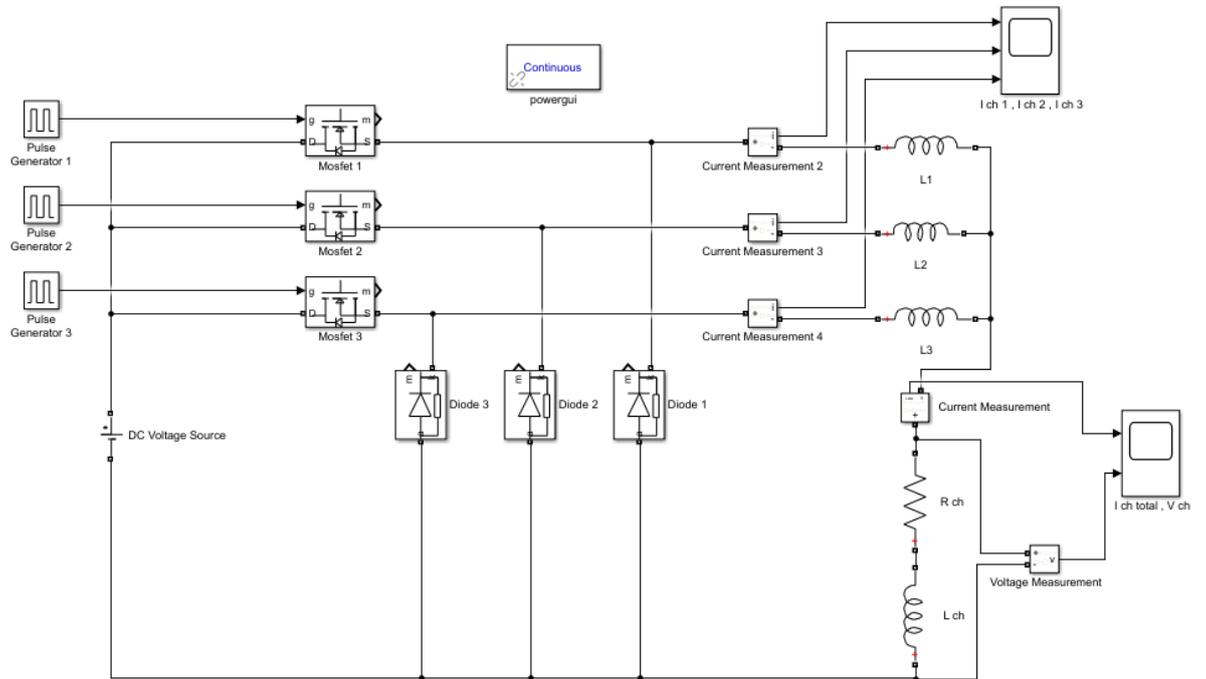


FIGURE 3.11 – Schéma bloc de simulation du hacheur BUCK entrelacé

Paramètre	La Valeur
Résistance	50 $\Omega$
Inductance	0.02 H
Fréquence	2000 , 5000 Hz
La période	0.0005 , 0.0002 S
Le rapport cyclique $\alpha$	0.33
La tension de la source	30 V

TABLE 3.2 – Les paramètres de simulation du hacheur entrelacé

. Résultats de simulation :

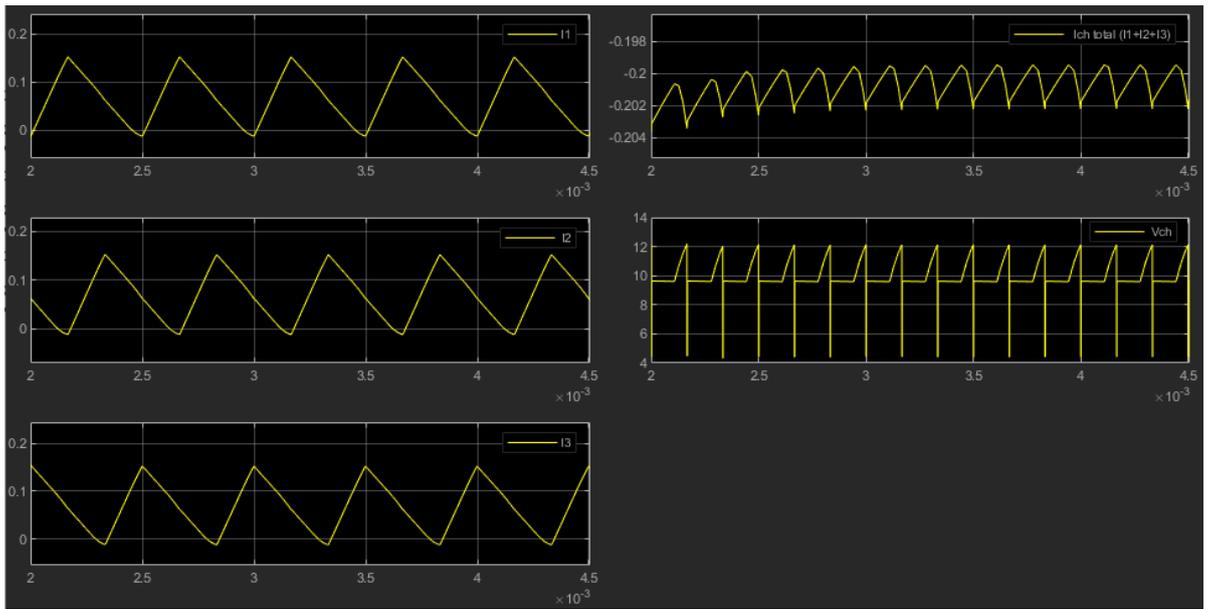


FIGURE 3.12 – Ondes de  $I_1, I_2, I_3, I_{ch\ total}$  et  $V_{ch}$  d hacheur BUCK entrelacé a  $F = 2000\text{ Hz}$

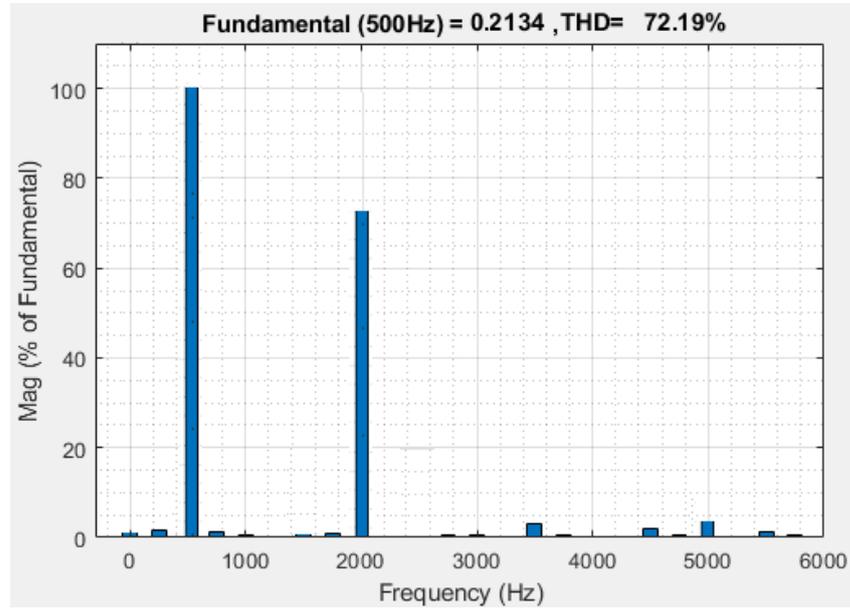


FIGURE 3.13 – spectre d harmoniques du  $I_{ch}$  hacheur BUCK entrelacé a une  $F = 2000\text{ Hz}$

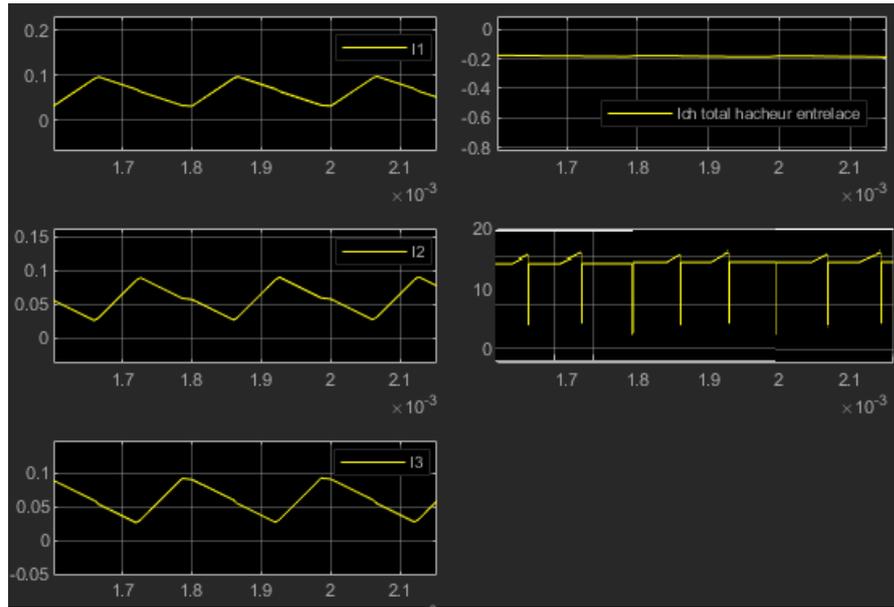


FIGURE 3.14 – Ondes de  $I_1, I_2, I_3, I_{ch\ total}$  et  $V_{ch}$  d hacheur BUCK entrelacé a une  $F = 5000\text{ Hz}$

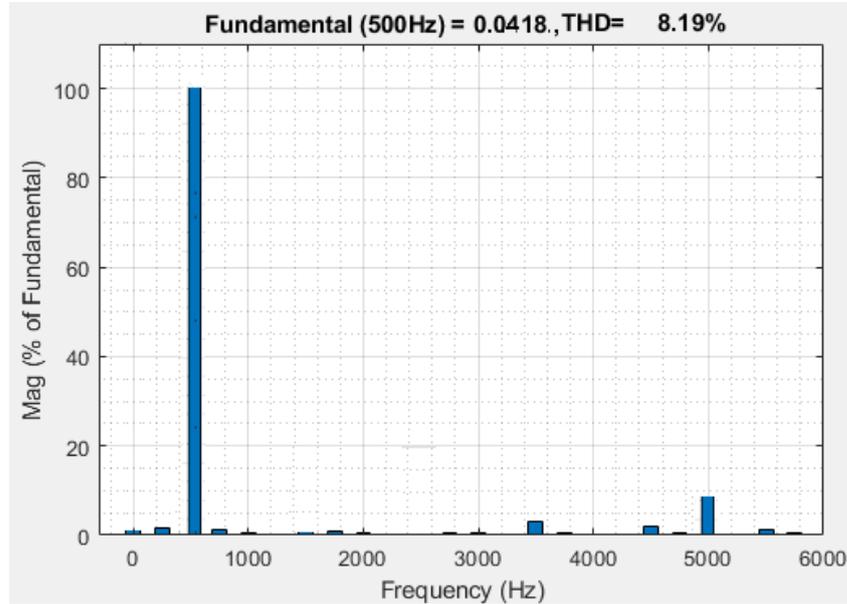


FIGURE 3.15 – spectre d harmoniques du  $I_{ch}$  hacheur BUCK entrelacé a une  $F = 5000\text{ Hz}$

## Interprétation de résultats :

Les courbes 3.12 et 3.14 représentent l'évolution du comportement des courants ( $I_1, I_2, I_3, I_{ch\ total}$ ) et La tensions  $V_{ch}$  de le hacheur buck entrelacé pour les valeurs de fréquence 2000 et 5000 HZ. Avec l'augmentation de la fréquence, on constate les points suivants :

- . Réduction des ondulations de courant et de tension grâce à des temps de commutation plus courts, améliorant ainsi la régulation du courant et de la tension.
- . Amélioration de la répartition de la charge entre les voies de commutation, ce qui réduit les variations de courant et de tension entre les voies et augmente l'efficacité globale du système.
- . Lissage de la forme d'onde de courant : à des fréquences plus élevées, la forme d'onde de courant devient plus régulière et continue en raison de périodes de commutation plus courtes.
- . Tendence à une forme d'onde de tension plus carrée : à mesure que la fréquence de commutation augmente, la forme d'onde de tension peut tendre vers une forme plus carrée, passent moins de temps dans les états transitoires des MOSFET de commutation.
- . Les résultats de simulation montrent que le hacheur entrelacé réduit davantage les harmoniques que le hacheur série simple comme mentre les figures 3.8 , 3.10 , 3.13 et 3.15, améliorant ainsi la qualité du signal électrique.
- . La distorsion harmonique totale (THD) est significativement diminuée avec le hacheur entrelacé, pour  $F = 5000$  HZ le hacheur serie simple  $THD = 15.84$  % et pour la meme fréquence le hacheur entrelacé  $THD = 8.19$  %.

## 3.5 Conclusion

En comparant les résultats de simulation entre le hacheur BUCK et le hacheur BUCK entrelacé, nous constatons que :

Pour le hacheur BUCK, une hausse de la fréquence de commutation peut ne pas modifier beaucoup la tension de sortie, ce qui suggère que certains composants pourraient être saturés ou limités.

D'autre part, pour le hacheur BUCK entrelacé, la tension de sortie diminue avec une fréquence de commutation plus élevée. Cela pourrait être dû à une meilleure régulation du système : à des fréquences plus élevées, le hacheur BUCK entrelacé réagit plus vite, maintenant ainsi une tension de sortie plus stable et moins sujette aux variations.

Concernant les ondulations de courant, nous observons une élimination totale des ondulations et une courbe de courant globale lisse avec l'augmentation de la fréquence de commutation pour le hacheur entrelacé par rapport au hacheur série.

Après avoir exploré en détail les types de hacheur BUCK, notamment le hacheur BUCK et le hacheur BUCK entrelacé, et analysé leurs performances via des simulations, dans le chapitre qui suit nous allons utiliser un hacheur entrelacé dans l'optimisation de la puissance extraite des panneaux photovoltaïques.

# Chapitre 4

## Optimisation du fonctionnement des Systèmes photovoltaïque

### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous pencherons sur l'optimisation de la puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques (PV). L'optimisation de la puissance maximale, souvent désignée par l'acronyme MPPT (Maximum Power Point Tracking), est une étape cruciale pour maximiser l'efficacité des systèmes PV. Elle consiste à ajuster en temps réel le point de fonctionnement des panneaux solaires afin de capturer le maximum de puissance disponible du rayonnement solaire. Notre étude se concentrera principalement sur l'algorithme PO (Perturb and Observe), l'un des algorithmes les plus couramment utilisés pour cette optimisation, en explorant ses principes de fonctionnement, ses avantages et ses limitations. Nous mettrons également en œuvre des simulations pour analyser et comparer les performances de l'algorithme PO dans diverses conditions opérationnelles, illustrant ainsi son efficacité et ses impacts sur la stabilité des systèmes PV.

### 4.2 Algorithme de la perturbation et observation (P&O)

L'approche Hill Climbing implique une perturbation du rapport cyclique du convertisseur de puissance, tandis que la méthode Perturb and Observe (P&O) perturbe la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque.

Dans le cas d'un générateur PV connecté à un convertisseur de puissance, la perturbation du rapport cyclique du convertisseur de puissance affecte le courant du générateur PV, influençant ainsi sa tension.

Bien que distinctes dans leur approche, l'escalade et la méthode P&O poursuivent

le même objectif fondamental. L'algorithme P&O est généralement le plus appliqué dans le contrôle de l'algorithme MPPT pour les panneaux PV (Selmi, Abdul-Niby et al. 2014). Ce système présente des avantages significatifs : une structure simple, un coût réduit, une mise en œuvre aisée, et peu de paramètres à ajuster.

L'organigramme de la méthode P&O est illustré à la figure 4.1, montrant sa procédure de perturbation périodique de la tension PV et la comparaison subséquente de la puissance de sortie PV avec le cycle de perturbation précédent.

Comme illustré dans la Figure 4.2, lorsqu'il y a une augmentation simultanée de la puissance et de la tension PV, ou une diminution simultanée, une taille de pas de perturbation,  $\Delta D$ , est ajoutée ou soustraite au rapport cyclique,  $D$ , pour générer le prochain cycle de perturbation.

L'objectif est de contraindre le point de fonctionnement vers le MPP. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le MPP soit atteint.

Cependant, cela entraîne des oscillations continues autour du MPP, conduisant à des pertes d'énergie. Réduire la taille du pas de perturbation peut atténuer ces oscillations, mais cela ralentit également le processus de suivi du MPP.

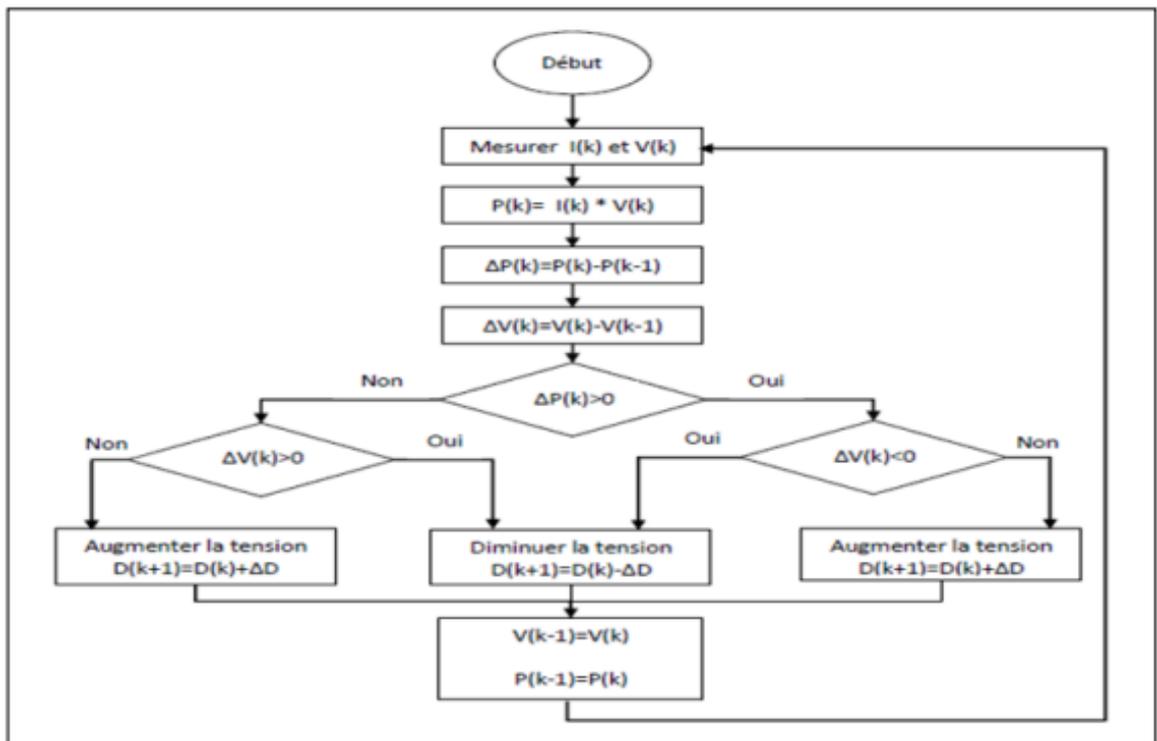


FIGURE 4.1 – Schéma bloc de l'algorithme P&O

L'algorithme Perturbation et Observation (PO) fonctionne de manière élémentaire comme suit :

Dans un premier temps, la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque est perturbée par un petit incrément. Ensuite, la variation de puissance résultante,  $P$ , est mesurée. Si  $P$  est positif, cela signifie que la perturbation a rapproché le point de fonctionnement du MPP, donc d'autres perturbations dans la même direction devraient encore améliorer cette approche. En revanche, si  $P$  est négatif, cela indique que le point de fonctionnement s'est éloigné du MPP, et il faut inverser le signe de la perturbation pour revenir vers le MPP comme montre la figure(4.2).

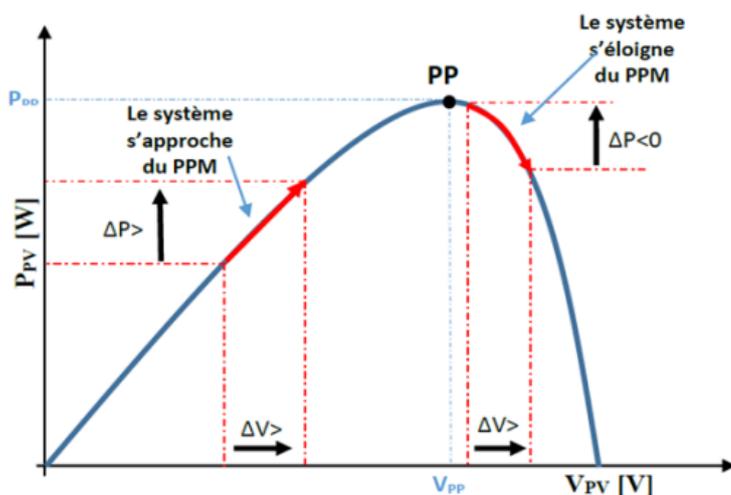


FIGURE 4.2 – Recherche du PPM par la méthode (P&O)

L'augmentation (ou la diminution) de la tension conduit à une augmentation (ou une diminution) de la puissance lorsqu'on se situe à gauche (ou à droite) du Point de Puissance Maximale (MPP). Ainsi, si une augmentation de puissance est observée, la perturbation suivante doit être maintenue pour atteindre le MPP, tandis que si une diminution de puissance est constatée, la perturbation doit être inversée. Ces principes sont récapitulés dans le tableau 4.1.

Perturbation	Charge en puissance	Prochaine perturbation
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

TABLE 4.1 – Résumé des algorithmes d'escalade et de P&O

L'algorithme (P&O) est largement utilisé pour (MPPT) des panneaux photovoltaïques (PV) en raison de sa simplicité et de sa mise en œuvre aisée.

## 4.3 Simulation de la méthode P&O

### 4.3.1 Simulation du PV avec un hacheur Buck entrelacé

À la figure 4.3 représente la simulation du PV par un hacheur Buck entrelacé sans commande MPPT au conditions climatique standard  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et  $T = 25^\circ\text{C}$ .

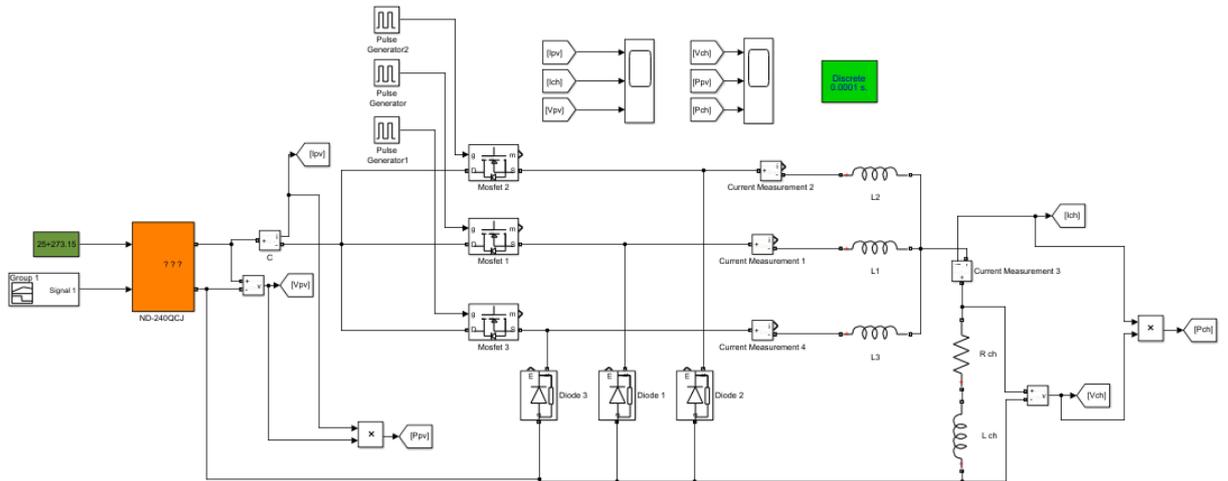


FIGURE 4.3 – Simulation du PV par un hacheur Buck entrelacé

Résultats de simulation :

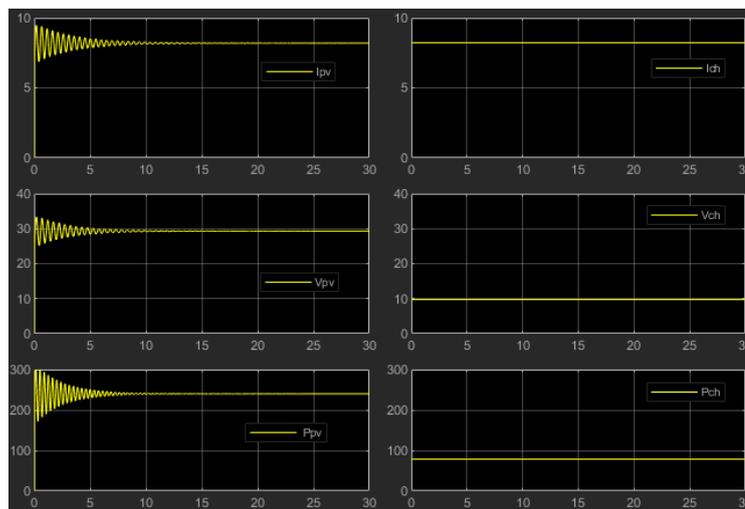


FIGURE 4.4 – Résultats de simulation de I,V et P d'un PV adapté par un hacheur buck entrelacé

## Interpretation des resultats :

Pour un hacheur entrelacé avec un rapport cyclique  $\alpha = 0.3$  :

- La tension de sortie est 30% de la tension d'entrée, la relation fondamentale pour un hacheur buck est que  $V_{out} = \alpha.V_{in}$  ou  $\alpha$  est le rapport cyclique (duty cycle).
- Grâce à l'entrelacement, les ondulations sont réduites.
- Si nous avons  $n$  phases entrelacées, le courant total est la somme des courants de chaque phase, ce qui peut permettre de maintenir un courant de sortie relativement constant et de réduire les ondulations.
- Si la tension est réduite d'un tiers et que le courant reste constant, la puissance est également réduite d'un tiers.

### 4.3.2 Simulation d un PV muni d un commande P&O avec Hacheur entrelacé

Les figures 4.5 et 4.6 illustre respectivement la configurations dans Simulink pour l'algorithme MPPT (P&O) et le schéma bloc d'un système PV avec un hacheur entrelacé équipé d'une commande MPPT :

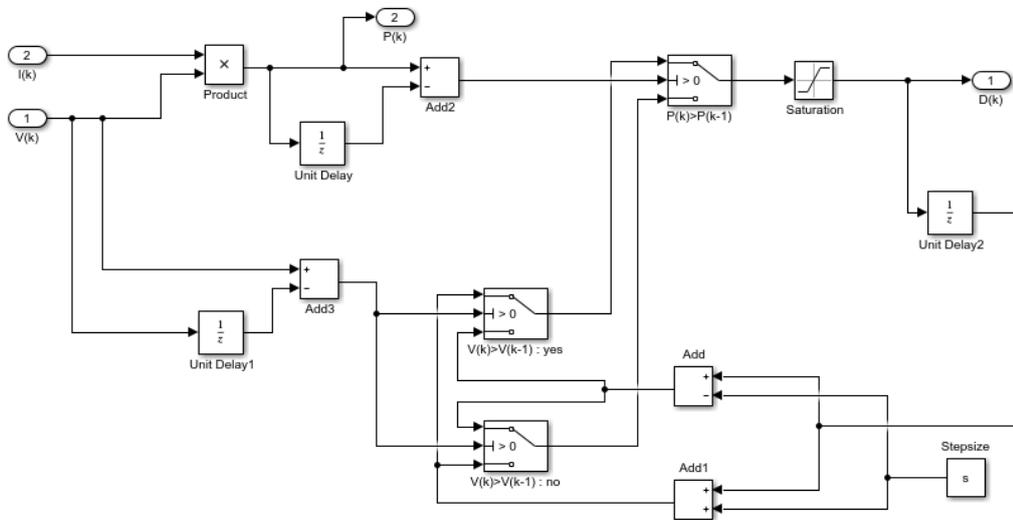


FIGURE 4.5 – Configurations dans Simulink pour l'algorithme MPPT (P&O)

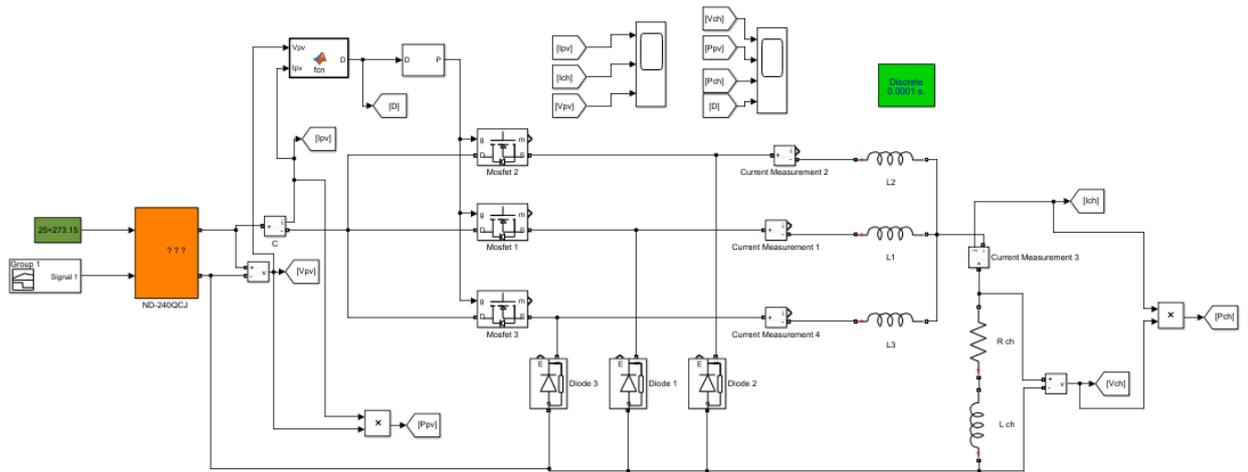


FIGURE 4.6 – Schéma bloc d'un système PV avec un hacheur entrelacé équipé d'une commande MPPT

Lorsque l'irradiance change, nous avons simulé les grandeurs électriques du système PV pour des valeurs d'irradiance de  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $G = 600 \text{ W/m}^2$  et  $G = 400 \text{ W/m}^2$  et pour température constante  $T = 25^\circ\text{C}$ , comme illustré dans les figure (4.7),(4.8),(4.9) et (4.10) :

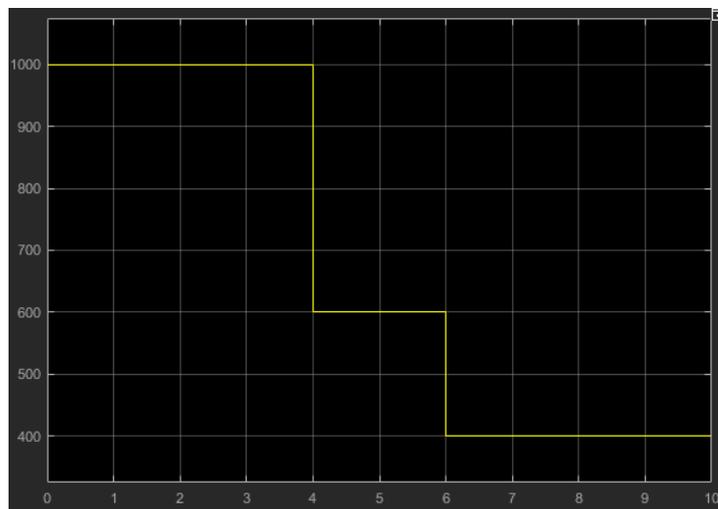


FIGURE 4.7 – Variation de l'irradiance en fonction du temps

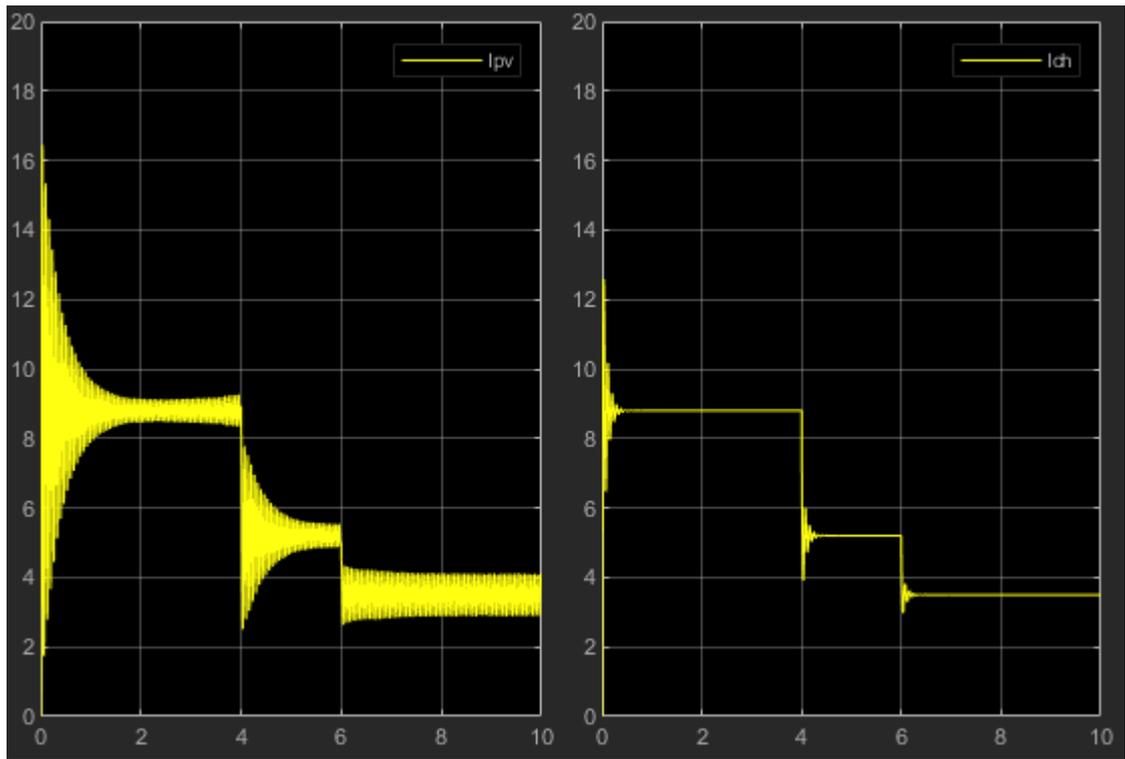


FIGURE 4.8 – L'influence du changement d'irradiance sur  $I_{pv}$  et  $I_{ch}$  dans un système PV équipé d'une commande MPPT

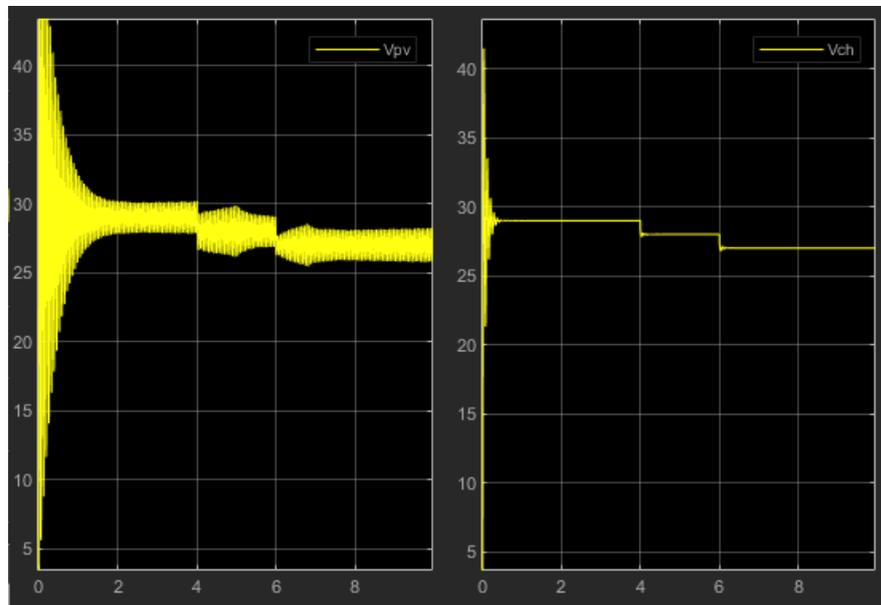


FIGURE 4.9 – L'influence du changement d'irradiance sur  $V_{pv}$  et  $V_{ch}$  dans un système PV équipé d'une commande MPPT

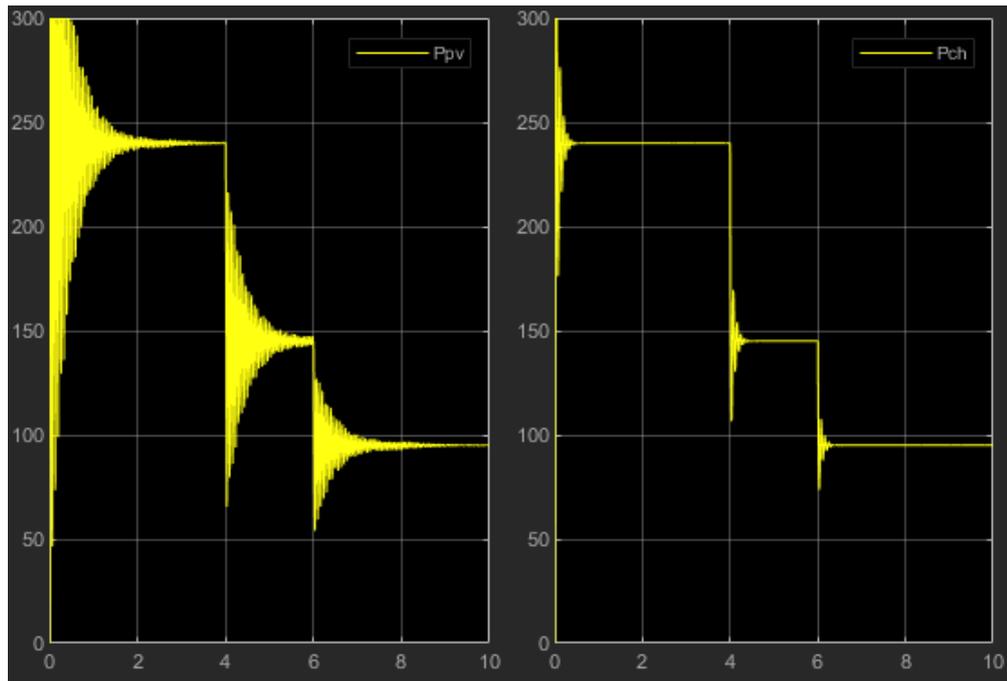


FIGURE 4.10 – L'influence du changement d'irradiance sur  $P_{pv}$  et  $P_{ch}$  dans un système PV équipé d'une commande MPPT

#### Interprétation des résultats :

- . Les résultats obtenus dans la simulation sont cohérents et confirment l'efficacité du système PV avec hacheur entrelacé et commande MPPT.
- . La capacité de la commande MPPT à suivre rapidement le nouveau point de puissance maximale en cas de changement d'éclairement est particulièrement notable.
- . De plus, l'observation de la réduction de l'amplitude des oscillations autour du point MPP est un aspect positif qui contribue à minimiser les pertes de puissance.
- . Dans l'ensemble, ces résultats valident le bon fonctionnement du système et sa capacité à optimiser la production d'énergie solaire dans des conditions variables.

## 4.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a examiné en détail les performances et les mécanismes de fonctionnement des hacheurs série et entrelacés, ainsi que l'importance des commandes MPPT dans les installations photovoltaïques.

Les résultats des simulations ont confirmé la concordance entre les principes théoriques et les observations des simulations, démontrant l'efficacité des hacheurs et des commandes MPPT pour optimiser la production d'énergie solaire.

L'exploitation de l'entrelacement dans les hacheurs a été présentée comme une approche prometteuse pour améliorer la qualité du signal et réduire les pertes de puissance.

# Chapitre 5

## Alimentation d un moteur asynchrone par un generateur PV

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous étudierons l'alimentation d'un moteur asynchrone via un générateur photovoltaïque. Ce générateur est un système complet qui produit et gère l'électricité grâce à des capteurs photovoltaïques. Comme l'électricité générée est en courant continu (CC), un convertisseur DC-AC est nécessaire pour alimenter le moteur asynchrone.

Les onduleurs, éléments clés des entraînements à vitesse variable, jouent un rôle crucial dans cette conversion. Notre objectif est d'appliquer la modulation de largeur d'impulsion (MLI) aux onduleurs triphasés, qui sont utilisés avec un moteur asynchrone à cage modélisé.

### 5.2 Présentation de la structure du système

Le schéma bloc du modèle global est donné par la figure 5.1 :

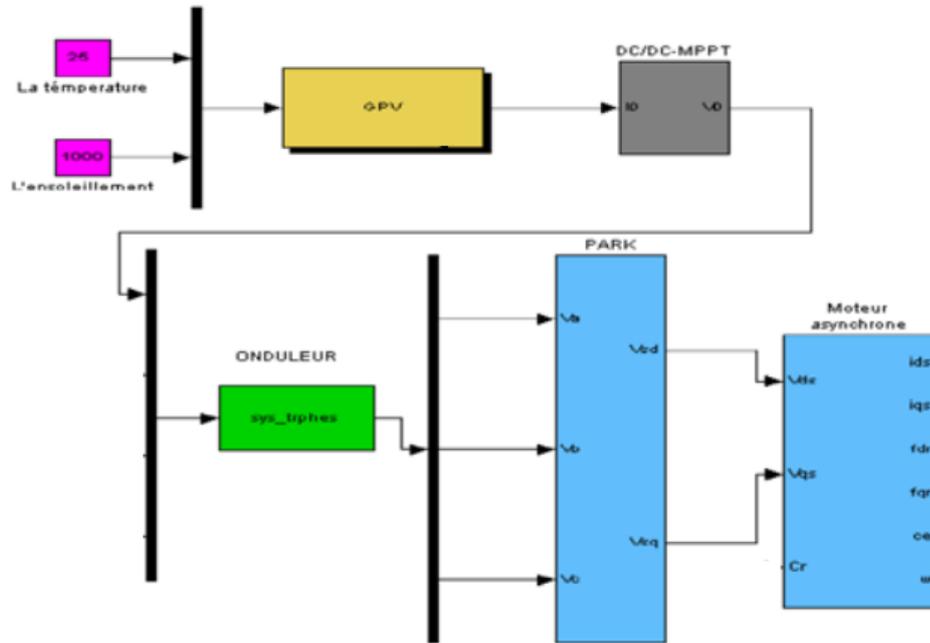


FIGURE 5.1 – Le shema bloc du model global

. **Le generateur PV** : constitué de 6 panneaux en serie etudies dans le deuxieme chapitre.

. **Un convertisseur DC-DC entrelacé.**

. **Un onduleur triphasé a MLI.**

. **Machine asynchrone** : dont les donnés sont les suivantes.

- Triangle/étoile
- 230 (V)/ 400 (V)
- $I_n=6.65$  (A)
- $P_n = 1.5$  (KW)
- $\text{Cos } \theta = 0.78$
- $N = 1440$  tr/min
- $F = 50$  HZ
- $r = 76$  %

## 5.3 Étude de l'onduleur triphasé

Les onduleurs, qui convertissent le courant continu en courant alternatif, transforment une tension continue d'entrée en une tension alternative de sortie (figure 5.2) avec l'amplitude et la fréquence souhaitées. Pour obtenir une tension de sortie variable, on peut soit ajuster la tension continue d'entrée en maintenant constant le gain de l'onduleur, soit modifier le gain de l'onduleur si la tension d'entrée est fixe et non contrôlable.

Le gain de l'onduleur se définit comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée. Pour les applications de faibles et moyennes puissances, des formes d'onde carrées ou quasi carrées sont acceptables. En revanche, pour les applications de fortes puissances, une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion harmonique est requise. L'utilisation de dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse permet de réduire significativement le contenu harmonique de la tension de sortie grâce à des techniques de commande avancées.

Les onduleurs trouvent de nombreuses applications industrielles, notamment dans les variateurs de vitesse pour moteurs à courant alternatif, le chauffage par induction, les alimentations de secours et les alimentations sans interruption. L'entrée d'un onduleur peut provenir d'une batterie, de panneaux solaires ou d'autres sources de courant continu obtenues par redressement monophasé ou triphasé. Le principe de fonctionnement d'un onduleur repose sur l'électronique de commutation, permettant de générer une onde de tension alternative à partir d'une tension continue.

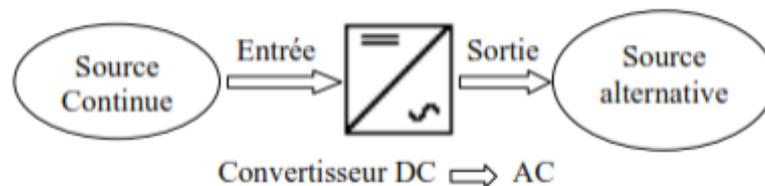


FIGURE 5.2 – Principe de fonctionnement de l' onduleur

### 5.3.1 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs configurations d'onduleurs, chacune adaptée à un type d'application spécifique ou permettant d'atteindre les performances souhaitées. En général, les onduleurs sont classés en fonction des modes de commutation de leurs interrupteurs.

### 5.3.1.1 Onduleur autonome

Il s'agit d'un système nécessitant des composants commandés aussi bien pour la fermeture que pour l'ouverture, avec une fréquence variable, et dont les instants de commutation sont déterminés par des circuits externes. La charge peut être de n'importe quel type. Cet onduleur n'est pas réversible.

### 5.3.1.2 Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture, et la commutation se fait de manière "naturelle", contrairement à l'onduleur autonome. Ce type d'onduleur est principalement utilisé dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance, où les thyristors sont souvent les seuls composants adaptés.

## 5.4 Modélisation de l'onduleur triphasé

L'onduleur triphasé à deux niveaux, illustré par le circuit de puissance de la figure (5.3), se caractérise par les tensions de branche  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$  mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue  $V_{PV}$ . De plus, les tensions de phase  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$ , mesurées par rapport à un point neutre flottant  $n$ , représentent une charge équilibrée montée en étoile. À partir des tensions simples, on peut facilement déduire les tensions composées  $V_{AN}$ ,  $V_{BN}$  et  $V_{CN}$ .

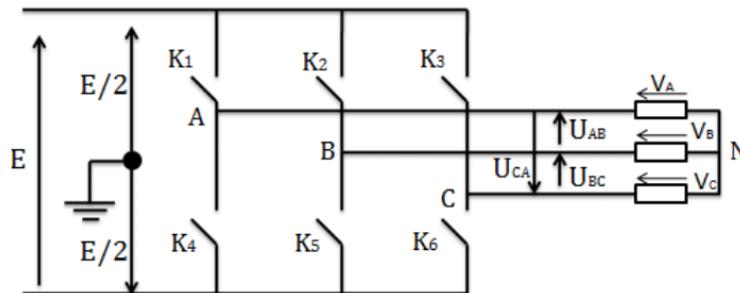


FIGURE 5.3 – Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé illustré à la figure (5.3), il est important de noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires. En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons déterminer les tensions de branche de sortie de l'onduleur, mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu, de la manière suivante :

$$\begin{aligned}
V_{AN} &= S_1 V_{PV} \\
V_{BN} &= S_2 V_{PV} \\
V_{CN} &= S_3 V_{PV}
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Où  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  représentent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Les tensions composées sont :

$$\begin{aligned}
V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AB} + V_{BN} = (S_1 - S_2) V_{PV} \\
V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} + V_{CN} = (S_2 - S_3) V_{PV} \\
V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} + V_{AN} = (S_3 - S_1) V_{PV}
\end{aligned} \tag{5.2}$$

L'équation peut être écrite sous forme matricielle :

$$\begin{vmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{vmatrix} = V_{PV} \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{vmatrix} \tag{5.3}$$

Les tensions simples sont :

$$\begin{aligned}
V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(V_{BN} + V_{CN}) \\
V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{CN}) \\
V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(V_{AN} + V_{BN})
\end{aligned} \tag{5.4}$$

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{V_{PV}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \tag{5.5}$$

## 5.5 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion consiste à utiliser une fréquence de commutation supérieure à celle des grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie avec une succession de créneaux de largeurs appropriées.

Les onduleurs de tension, principalement utilisés pour alimenter des charges alternatives à fréquence fixe ou variable, doivent produire une forme d'onde de sortie qui approximera au mieux une sinusoïde. Ce critère sera au centre de notre discussion dans ce chapitre.

## 5.6 Modélisation de la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

En utilisant la modulation de largeur d'impulsion (PWM) pour contrôler l'onduleur, il devient envisageable de produire une tension alternative avec une amplitude et une fréquence variables, tout en maintenant les niveaux d'harmoniques bas, à partir d'une alimentation présentant une fréquence et une tension fixes. Dans cette section, nous explorerons en détail la technique de commande MLI sinus-triangle.

### 5.6.1 Commande MLI sinus – triangle

La modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle est réalisée en comparant une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire comme illustre la figure 5.4.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, et la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, trois références sinusoïdales déphasées de  $(2\pi/3)$  à la même fréquence  $f_s$  sont utilisées.

Les tensions de référence sinusoïdales sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} v_{ref-as} = v_m \sin(2.\pi.f_s.t) \\ v_{ref-bs} = v_m \sin(2.\pi.f_s.t) - \frac{2\pi}{3} \\ v_{ref-cs} = v_m \sin(2.\pi.f_s.t) + \frac{2\pi}{3} \end{cases} \quad (5.6)$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} [ 4 (\frac{t}{T_p}) - 1 ] & si \ 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_{pm} [ -4 (\frac{t}{T_p}) + 3 ] & si \ \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (5.7)$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence de modulation  $f_p$  sur la fréquence de référence  $f_r$ ,  $m = f_p/f_r$ .
- Le coefficient de réglage en tension  $r$  égal au rapport de l'amplitude de la tension de Référence  $V_r$  à la valeur crête de l'onde de modulation  $V_{pm}$ ,  
 $r = V_r/V_{pm}$ .

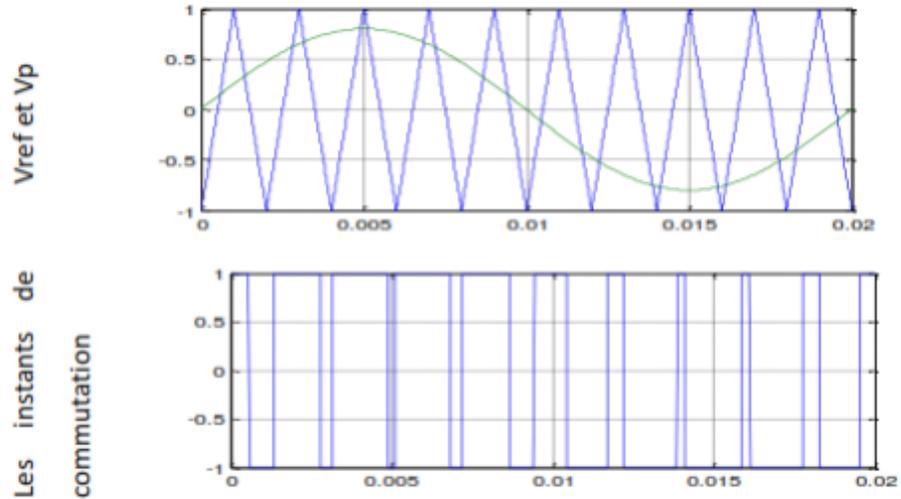


FIGURE 5.4 – Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

Le mode de fonctionnement de cette technique est le suivant :

- Si  $V_{ref}(t) > V_p(t)$ , le transistor supérieur du bras de pont est conducteur.'
- Si  $V_{ref}(t) < V_p(t)$ , le transistor inférieur du bras de pont est conducteur.

Le réglage se fait en ajustant les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs ainsi que les séquences de fonctionnement. La figure (5.5) illustre le principe de la commande MLI avec modulation sinus-triangle.

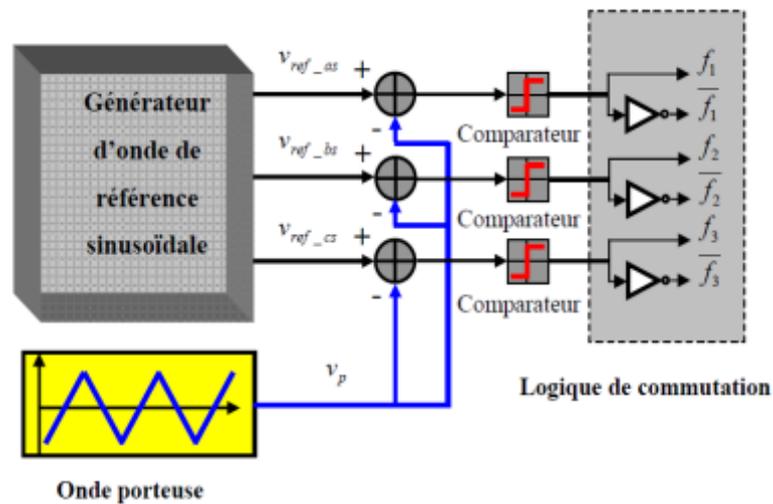


FIGURE 5.5 – Schéma de principe de la technique M.L.I triangle– sinusoidale

## 5.6.2 Avantages de la commande MLI

La modulation de largeur d'impulsion offre les avantages suivants :

- Une meilleure neutralisation des harmoniques par rapport aux onduleurs à onde carrée ou à simple créneau.
- Le déplacement des harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées, facilitant ainsi le filtrage.
- La possibilité de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.
- La capacité d'alimenter plusieurs ensembles onduleurs et moteurs asynchrones à partir d'une même source continue.

## 5.7 Représentation de la simulation Commande MLI sinus-triangle de l'onduleur

Dans les figures 5.6, 5.7 et 5.8, nous voyons respectivement Schéma bloc du Commande MLI sinus-triangle, Schéma bloc d'onduleur et Bloc de simulation du modèle global.

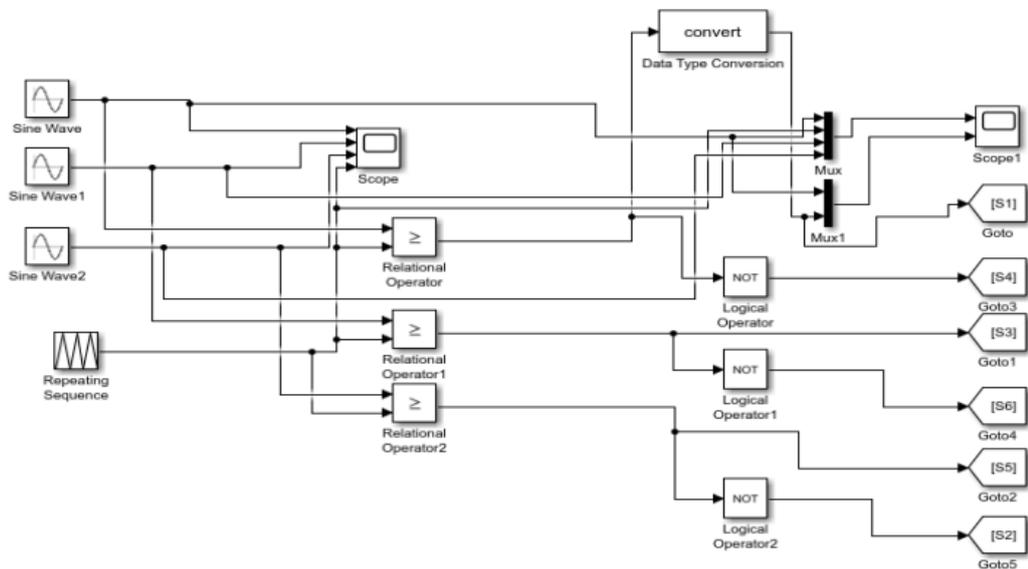


FIGURE 5.6 – Schéma bloc du Commande MLI sinus-triangle

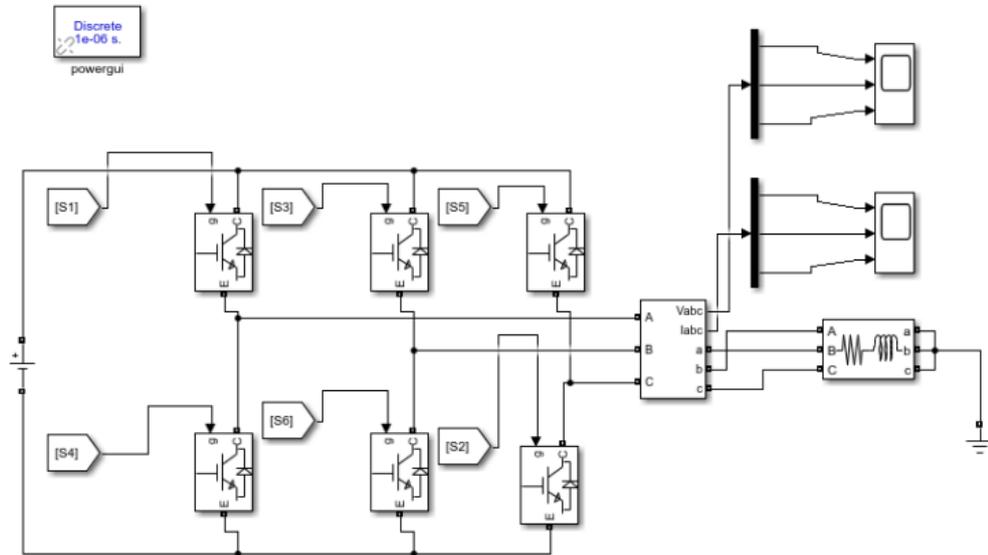


FIGURE 5.7 – Schéma bloc d'onduleur

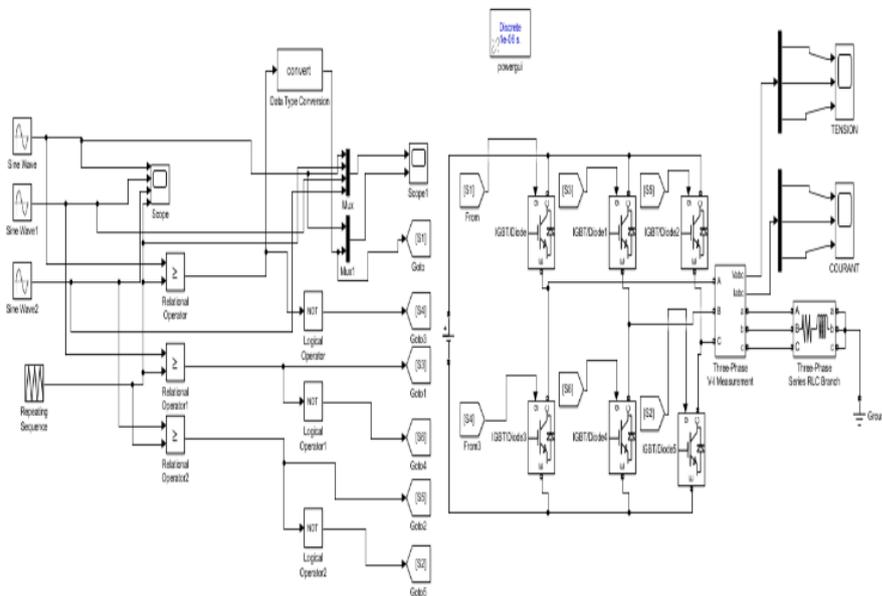


FIGURE 5.8 – Bloc de simulation du modèle global

Pour obtenir une tension de sortie proche d'une sinusoïde, nous avons employé la commande MLI sinus-triangle comme montre la figure 5.9 :

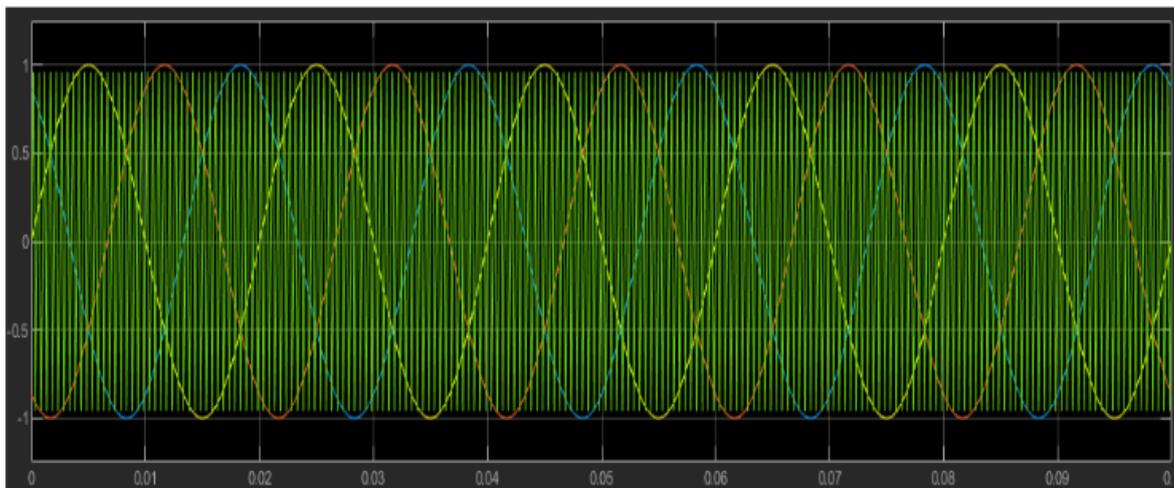


FIGURE 5.9 – Illustration de la MLI sinus-triangle

Après la simulation, les signaux des trois phases obtenus à la sortie de l'onduleur (figure 5.10 pour la tension) sont les suivants :

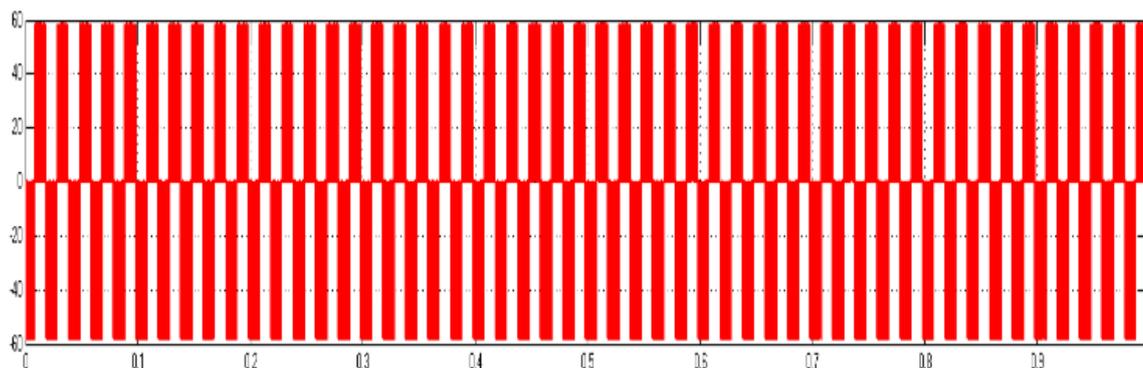


FIGURE 5.10 – Les tensions de sortie de l'onduleur

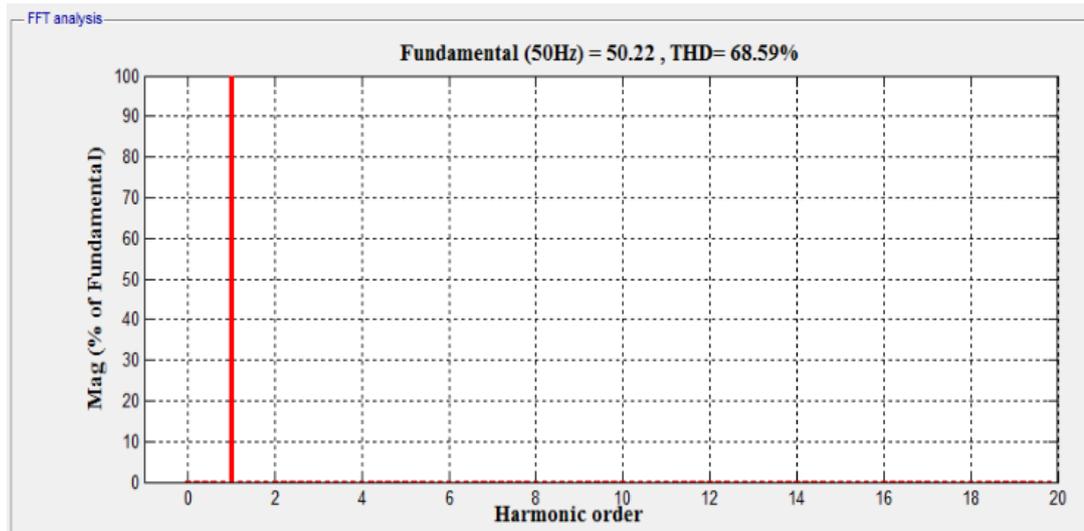


FIGURE 5.11 – Spectre d’harmonique de la tension composée à la sortie de l’onduleur (m=45)

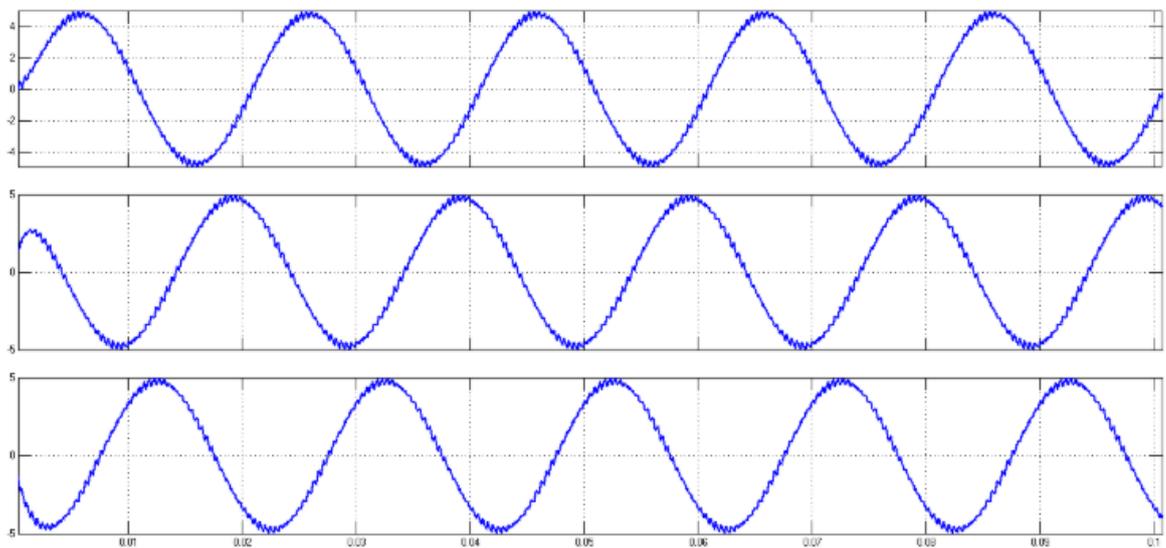


FIGURE 5.12 – Les courants de sortie de l’onduleur (m=45)

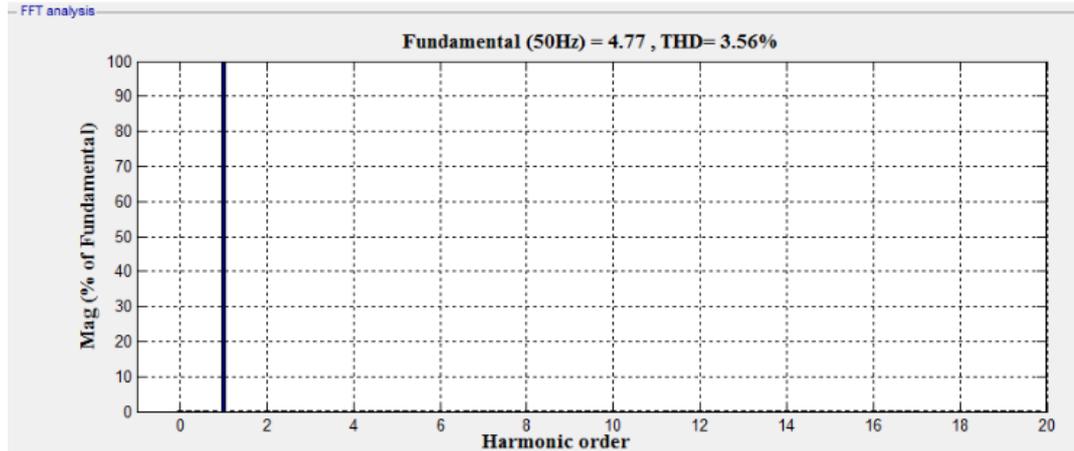


FIGURE 5.13 – Spectre d’harmonique du courant à la sortie de l’onduleur (m=45)

### Interprétation des résultats :

Selon les résultats de la simulation, plusieurs observations sont notables :

1. Bien que la modulation de largeur d’impulsion sinus-triangle soit utilisée, la tension de ligne à la sortie de l’onduleur ne présente pas une forme d’onde sinusoïdale pure.
2. L’augmentation de l’indice de modulation "m" entraîne une augmentation des harmoniques dans la tension de phase à des fréquences très élevées (figure 5.11).
3. Avec m=45, la forme du courant est considérablement améliorée et les harmoniques sont nettement réduits (figure 5.12).
4. Pour m=45, une amélioration significative de la forme de la du courant, le niveau de nettoyage satisfaisant, repoussant les harmoniques vers des rangs supérieurs avec un THD de 3,56 % (courant) et 68.59% (tension)(figure 5.13).

## 5.8 Modélisation de la Machine asynchrone

### 5.8.1 introduction

L'étude de tout système physique nécessite une modélisation, qui permet de simuler le comportement du système face à différentes sollicitations et de comprendre les mécanismes régissant son fonctionnement. La machine asynchrone peut être modélisée par différentes méthodes, en fonction des objectifs recherchés. Dans ce chapitre, nous développons les modèles suivants :

- . Les modèles en abc, dérivés des équations différentielles régissant le fonctionnement de la machine. Ils sont principalement utilisés pour l'étude des régimes permanents.
- . Les modèles basés sur la transformation de Park, couramment utilisés pour l'étude des régimes transitoires.

### 5.8.2 Les hypothèses simplificatrices

Les méthodes de modélisation reposent sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Pour notre étude, nous considérerons les hypothèses suivantes :

- La saturation du circuit magnétique et les courants de Foucault sont négligeables.
- L'entrefer est constant.
- Les pertes magnétiques sont négligeables.
- La résistance de l'enroulement est considérée comme constante et ne varie pas avec la température.
- La densité de courant dans la section transversale du conducteur est uniforme.

### 5.8.3 Représentation de la machine asynchrone dans l'espace électrique

Pour déduire le modèle de la MAS triphasée, nous commençons par illustrer son schéma à l'aide de la figure (5.14). Les cadres statoriques et rotoriques sont chacun équipés d'un enroulement triphasé. Les trois enroulements du stator sont nommés  $S_A$ ,  $S_B$  et  $S_C$ , tandis que ceux du rotor sont nommés  $R_a$ ,  $R_b$  et  $R_c$ . L'angle  $\theta$  représente l'angle entre l'axe de la phase statorique ( $S_a$ ) et celui de la phase rotorique ( $R_a$ ).

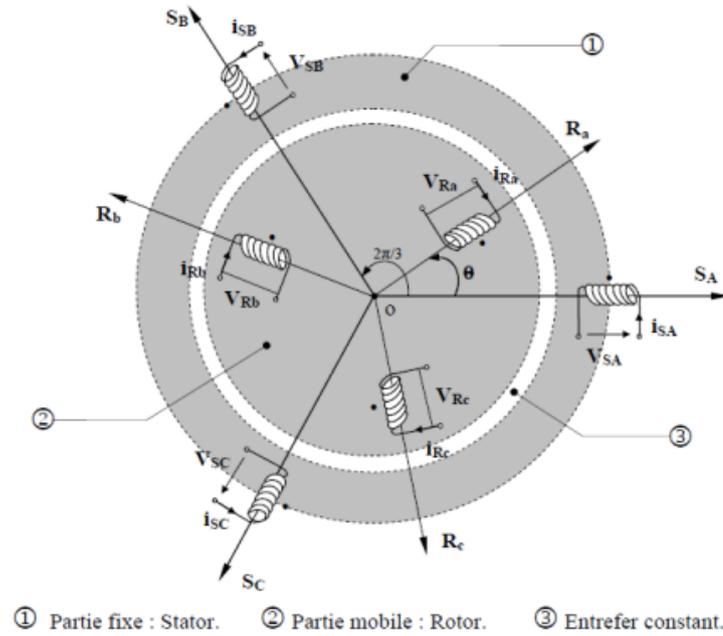


FIGURE 5.14 – Schéma d'une machine asynchrone triphasée

## 5.8.4 Mise en équations de la machine asynchrone

Le comportement des machines asynchrones peut être décrit par trois équations :

### 5.8.4.1 Equations électriques

Les équations électriques du modèle de la MAS triphasée sont les suivantes :

Pour le stator :

$$[V_s \text{ ABC}] = [R_s] \times [i_s \text{ ABC}] + \frac{d}{dt}[\phi_s \text{ ABC}] \quad (5.8)$$

Pour le rotor :

$$[V_r \text{ abc}] = [R_r] \times [i_r \text{ abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_r \text{ abc}] \quad (5.9)$$

Où :

$[R_s]$  : Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$  : Matrice des résistances rotoriques.

$[V_s \text{ ABC}]$  :  $[V_{sA} \ V_{sB} \ V_{sC}]^T$  : Vecteur des tensions statoriques.

$[V_r \text{ abc}]$  :  $[V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$  : Vecteur de tensions rotorique.

$[i_s \text{ ABC}]$  :  $[i_{sA} \ i_{sB} \ i_{sC}]^T$  : Vecteur des courants statorique.

$[i_r \text{ abc}]$  :  $[i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$  : Vecteur des courants rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Ainsi que pour les vecteurs des flux :

$[\phi_s \text{ ABC}]$  :  $[\phi_{sA} \ \phi_{sB} \ \phi_{sC}]^T$  : Vecteur des flux statoriques.

$[\phi_r \text{ abc}]$  :  $[\phi_{ra} \ \phi_{rb} \ \phi_{rc}]^T$  : Vecteur de flux rotorique.

#### 5.8.4.2 Équations magnétiques

Les relations entre les flux et les courants du stator et du rotor s'expriment comme suit :

Pour le stator :

$$[\phi_s \text{ ABC}] = [L_s] \times [i_s \text{ ABC}] + [M_{sr}] \times [i_r \text{ abc}] \quad (5.11)$$

Pour le rotor :

$$[\phi_r \text{ abc}] = [L_r] \times [i_r \text{ abc}] + [M_{rs}] \times [i_s \text{ ABC}] \quad (5.12)$$

Où :

$[L_s]$  : Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$  : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$  : Matrice d'inductance mutuelle du couplage entre stator-rotor.

Alors :

$$\begin{bmatrix} [\phi_s] \\ [\phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_s] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Où :

$l_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$l_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$M_0$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor.

### 5.8.4.3 Équations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone implique la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux), mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

$$C_e = [P] \times [i_s \ ABC]^T + [M_{sr}] \times [i_r \ abc] \quad (5.16)$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$j \frac{d}{dt} \Omega = C_e - C_r - k_f \Omega \quad (5.17)$$

La relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\omega}{dt} + f \Omega \quad (5.18)$$

Ou :

$C_e$  ( $C_{em}$ ) : représente le couple moteur appliqué.

$C_r$  : représente le couple résistant.

$J$  : le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

$f$  : le coefficient de frottement.

## 5.9 Modélisation diphasée de la Machine asynchrone

### 5.9.1 Transformation de Park

Cette conversion, souvent appelée transformation des axes, consiste à remplacer les trois enroulements de la machine originale par des enroulements équivalents sur les plans électrique et magnétique. Cette transformation implique de substituer le repère rotorique tournant par un repère fictif équivalent fixe, tout en conservant la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

L'objectif de cette transformation est de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation. Le but de cette transformation est de passer d'un système triphasé [abc] à un système biphasé (d, q) (figure 5.15) avec une composante homopolaire, comme indiqué dans l'équation suivante :

$$[X_{dqo}] = [P] [X_{abc}]$$

Le passage inverse est donné par :

$$[X_{abc}] = [P]^{-1} [X_{dqo}]$$

Tel que :

$[X]$  : peut-être le vecteur tension, courant ou flux.

$[P]$  : est la matrice de transformation directe de Park.

$[P]^{-1}$  : est la matrice de transformation inverse de Park.

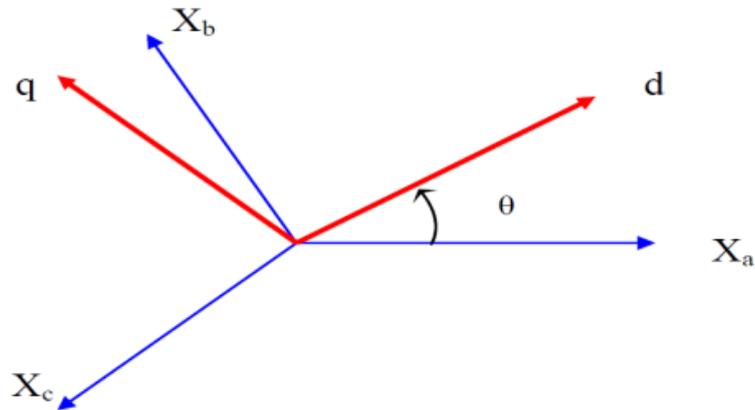


FIGURE 5.15 – Passage du repère triphasé au repère biphasé

Les avantages de cette transformation sont les suivants :

- Simplification de la machine en réduisant le nombre de phases.
- Dans une armature diphasée, les axes des bobines sont perpendiculaires, ce qui annule les inductances mutuelles entre les enroulements  $d$ ,  $q$  et  $o$ .
- Le choix de l'angle  $\varphi$  offre un degré de liberté permettant de simplifier les équations.

### 5.9.2 Application de la transformation de Park au modèle de la MAS

Il s'agit de transformer les enroulements de la MAS triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes  $(d-q)$  lié au champ tournant, voir la figure (5.16) suivante :

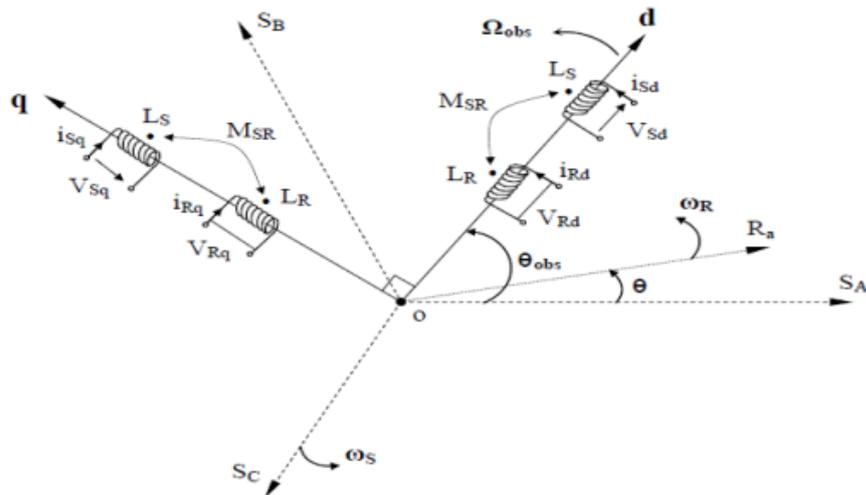


FIGURE 5.16 – Référentiel tournant des axes (d- q)

Les matrices de transformation de Park modifiées, directe et inverse, s'expriment par les relations suivantes :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Avec :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

### 5.9.3 Équations électriques dans le repère de PARK

Les équations statoriques et rotoriques :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \omega_{sl} \cdot \phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r \cdot i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_{sl} \cdot \phi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (5.21)$$

En appliquant la transformation de Park aux équations de flux et de courants (5-13), nous obtenons les relations électromagnétiques de la machine :

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + L_m \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + L_m \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + L_m \cdot i_{sq} \end{array} \right. \quad (5.22)$$

## 5.9.4 Choix de référentiel

Ce qui rend la transformation de Park attrayante, c'est que l'orientation du repère (d-q) peut être quelconque. Il existe trois choix importants : le repère (d-q) peut être fixé au stator, au rotor, ou au champ tournant, selon l'objectif de l'application. Pour simplifier les équations de la machine, il est nécessaire de choisir un référentiel. Les trois types possibles sont :

### 5.9.4.1 Référentiel lié au stator

Dans ce type de référentiel, les axes (d-q) par rapport aux axes statorique et rotorique sont définies par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -w_r$$

Ce type de référentiel est choisi lors des variations importantes de la vitesse du rotor.

### 5.9.4.2 Référentiel lié au rotor

Dans ce cas, la position des axes (d-q) par rapport aux axes statoriques et rotoriques est définie par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = w_r \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

Ce type de référentiel est utilisé lorsque la vitesse de rotation de la machine est constante et pour l'étude des régimes transitoires.

### 5.9.4.3 Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est noté (d, q), il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s ; \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_{gl}}{dt} = \omega = p\Omega \quad (5.23)$$

D'où :

$$\frac{d\theta_{gl}}{dt} = \omega_s - \omega = \omega_{gl} \quad \text{où} \quad \omega_{gl} \text{ est la pulsation de glissement.}$$

Donc, les équations électriques (5-14) s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ 0 = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_{gl} \cdot \phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_{gl} \cdot \phi_{rd} \end{array} \right. \quad (5.24)$$

L'avantage d'utiliser ce référentiel est qu'il maintient une quantité constante en régime permanent, ce qui simplifie la régulation.

### 5.9.5 Représentation d'état du système

Nous avons ici un système à plusieurs variables, représentable par une équation d'état. Il existe plusieurs options pour le vecteur d'état, parmi lesquelles nous considérerons le flux magnétique statorique et le flux magnétique rotorique. Le vecteur de sortie  $[X]$  peut prendre différentes formes :

$$[X] = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad W]^T$$

Avec :

$$[X] = [\phi_{dS} \quad \phi_{qS} \quad \phi_{dr} \quad \phi_{qr} \quad W]^T$$

$$[X] = [\phi_{dS} \quad \phi_{qS} \quad i_{dr} \quad i_{qr} \quad W]^T$$

$$[X] = [i_{dS} \quad i_{qS} \quad i_{dr} \quad i_{qr} \quad W]^T$$

Ainsi, nous avons opté pour le dernier vecteur.

La forme générale de l'équation d'état s'exprime comme suit :

$$[\dot{X}] = [A] [X] + [C] [U]$$

Avec :

$$\begin{cases} [X] = [i_{dS} \quad i_{qS} \quad i_{dr} \quad i_{qr} \quad W]^T \\ [U] = [V_{dS} \quad V_{qS} \quad C_r]^T \end{cases} \quad (5.25)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{dS} \\ \dot{i}_{qS} \\ \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \\ \dot{i}_W \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} i_{dS} \\ i_{qS} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ W \end{bmatrix} + B \cdot \begin{bmatrix} V_{dS} \\ V_{qS} \\ C_r \end{bmatrix} \quad (5.26)$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma T_s} & (\frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r + \omega_s) & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & \frac{M}{\sigma L_s} \omega_r & 0 \\ -(\frac{1-\sigma}{\sigma} \omega_r + \omega_s) & -\frac{1}{\sigma T_s} & -\frac{M}{\sigma L_s} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_s T_r} & 0 \\ \frac{M}{\sigma L_r T_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & -\frac{1}{\sigma T_r} & (\omega_s - \frac{\omega_r}{\sigma}) & 0 \\ \frac{M}{\sigma L_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma L_r T_s} & (-\omega_s + \frac{\omega_r}{\sigma}) & -\frac{1}{\sigma T_r} & 0 \\ \frac{-p^2 M}{J} i_{qr} & \frac{-p^2 M}{J} i_{dr} & 0 & 0 & \frac{k_f}{J} \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{-M}{\sigma L_s L_r} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_s L_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-p}{J} \end{bmatrix} \quad (5.28)$$

## 5.10 Simulation de la machine asynchrone alimenté par un générateur photovoltaïque

Le moteur asynchrone est alimenté via l'onduleur triphasé à MLI situé entre le générateur photovoltaïque et le moteur.

Les figures (5.17), (5.18) et (5.19) illustrent respectivement le schéma de simulation de la machine asynchrone, schéma bloc du modèle obtenu et le bloc de simulation du modèle global, qui seront simulés à l'aide du logiciel SIMULINK sous MATLAB. La simulation sera réalisée dans les deux référentiels (d, q) et (a, b) pour un essai en charge nominale après un démarrage à vide.

Les tensions d'alimentation sont supposées parfaitement sinusoïdales, d'amplitudes égales et constantes. Elles peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{cases} V_{Sa} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t) \\ V_{Sb} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{2}) \\ V_{Sc} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{2}) \end{cases} \quad (5.29)$$

Avec :

$V_s$  : valeur efficace de tension

$\omega_s$  : Pulsation d'alimentation

Le tableau 5.1 montre les paramètres de la machine asynchrone utilisée :

Tension nominale	<b>230 (V)</b>
Courant nominale	<b>6.65 (A)</b>
fréquence	<b>50 (Hz)</b>
Facteur de puissance	<b>0.78</b>
Puissance nominale	<b>1.5 (KW)</b>
Nombre de pair de pole	<b>2</b>
Moment d'inertie	<b>0.02 (Kg/m<sup>2</sup>)</b>
Rendement nominale	<b>0.76</b>

TABLE 5.1 – Parametres de la machine asynchrone utilisée

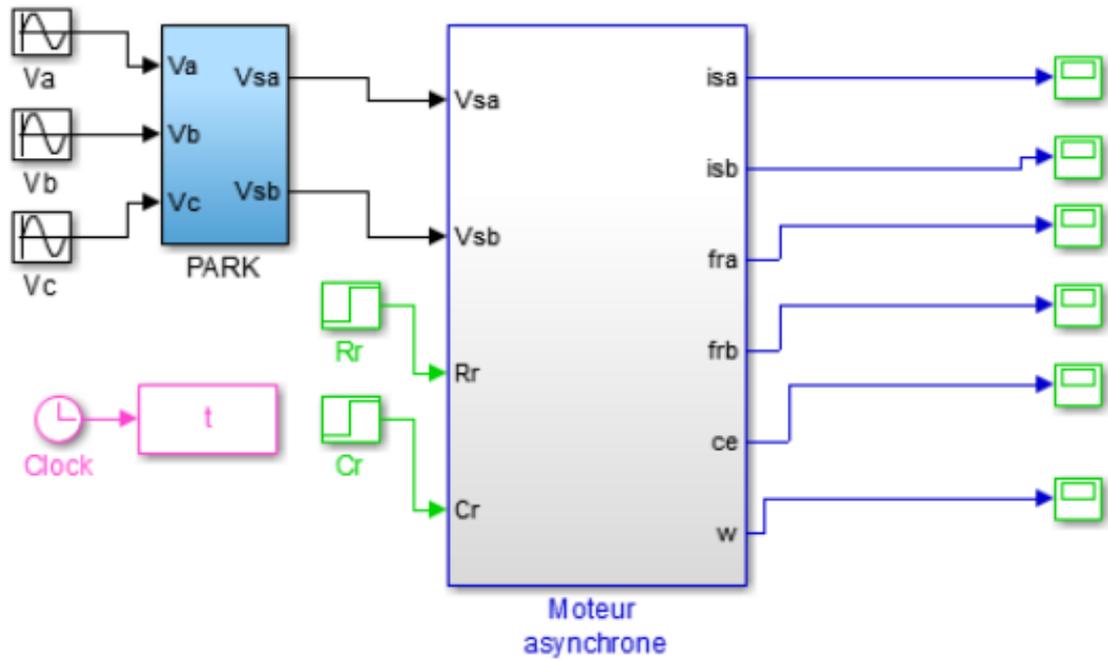


FIGURE 5.17 – Schéma de simulation de la Machine asynchrone

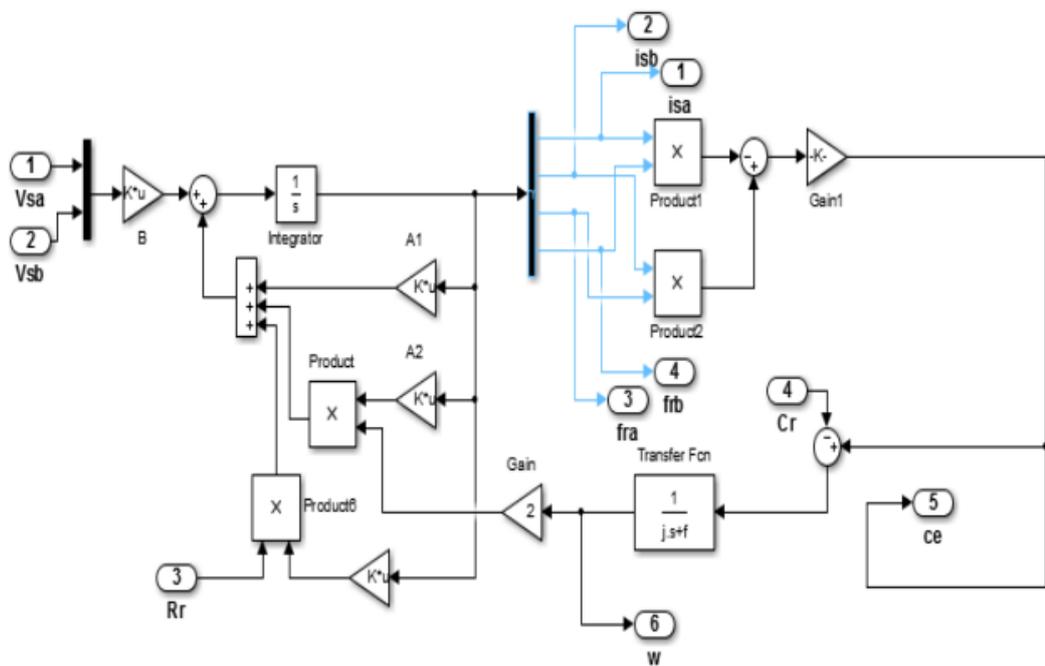


FIGURE 5.18 – schéma bloc du modèle de la machine asynchrone

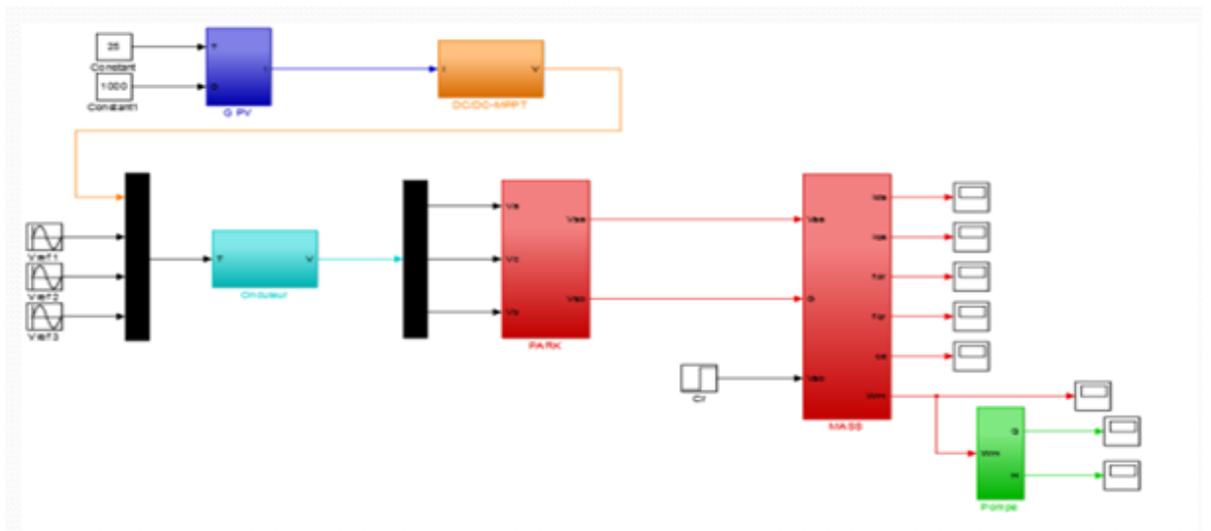


FIGURE 5.19 – Bloc de simulation du modèle global

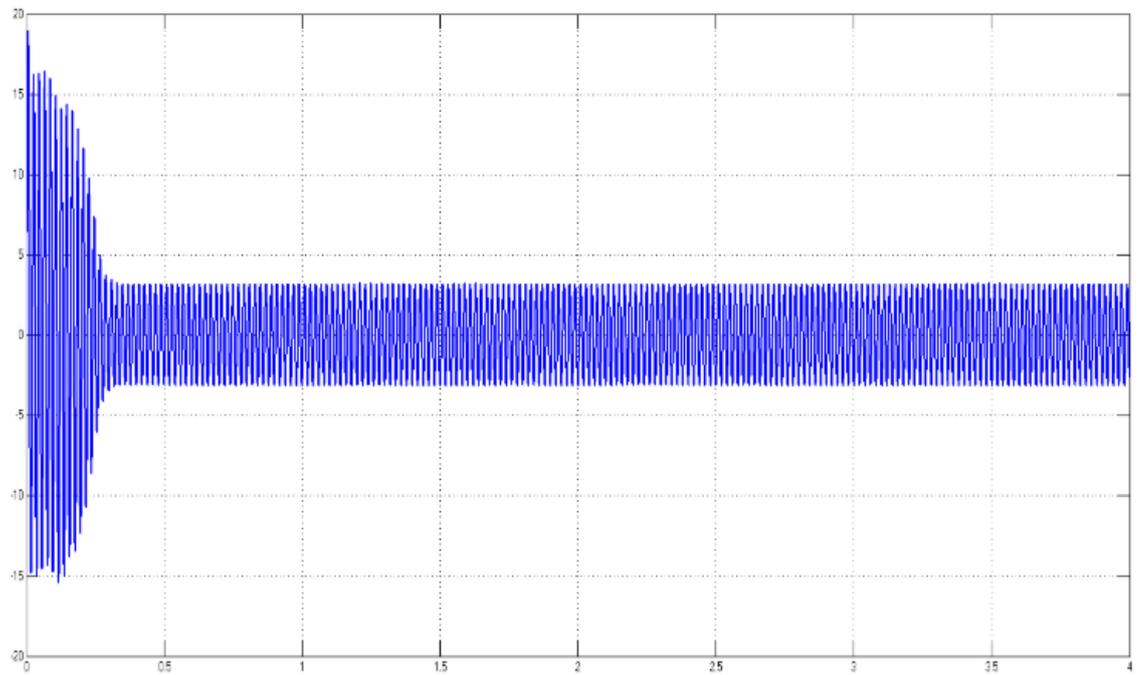


FIGURE 5.20 – le courants statoriques en fonction du temps (démarrage à vide)

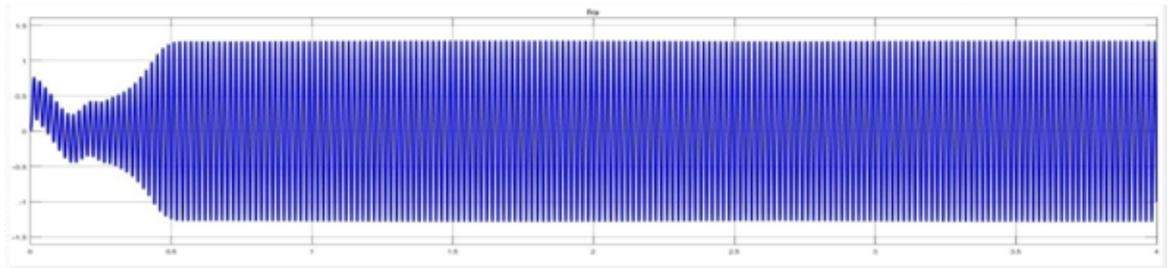


FIGURE 5.21 – le flux en fonction du temps (démarrage à vide)

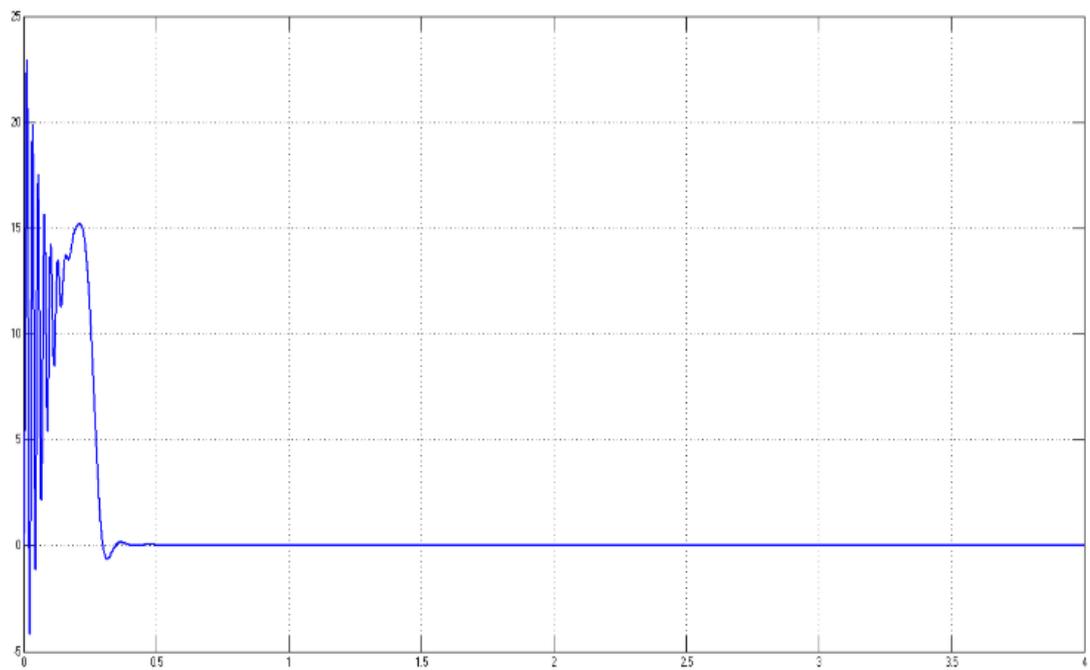


FIGURE 5.22 – le couple en fonction du temps (démarrage à vide)

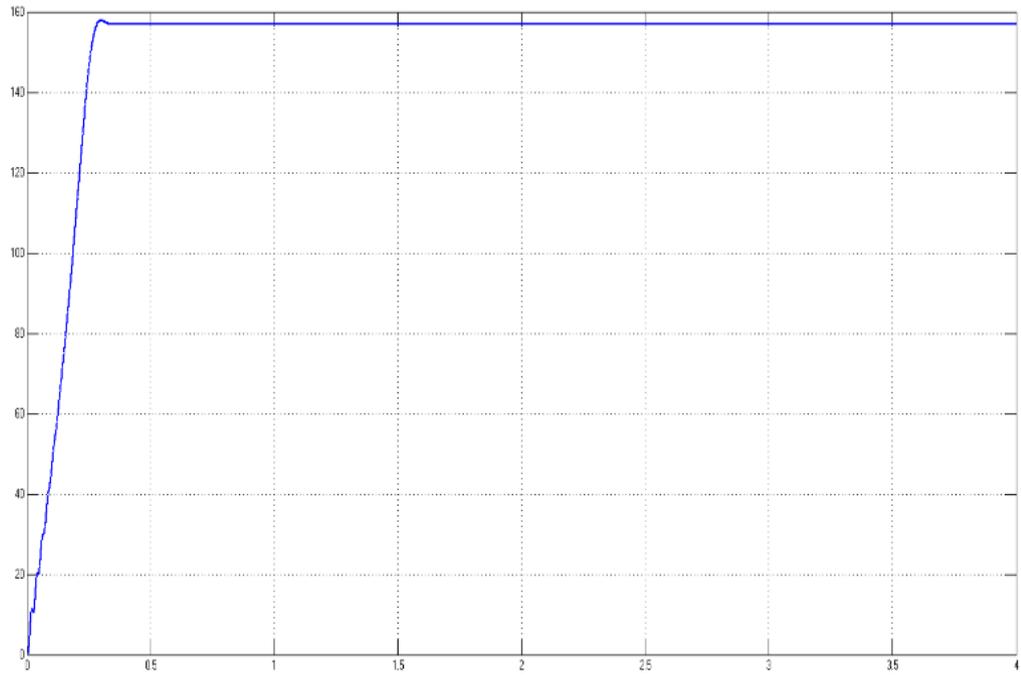


FIGURE 5.23 – la vitesse en fonction du temps (démarrage à vide)

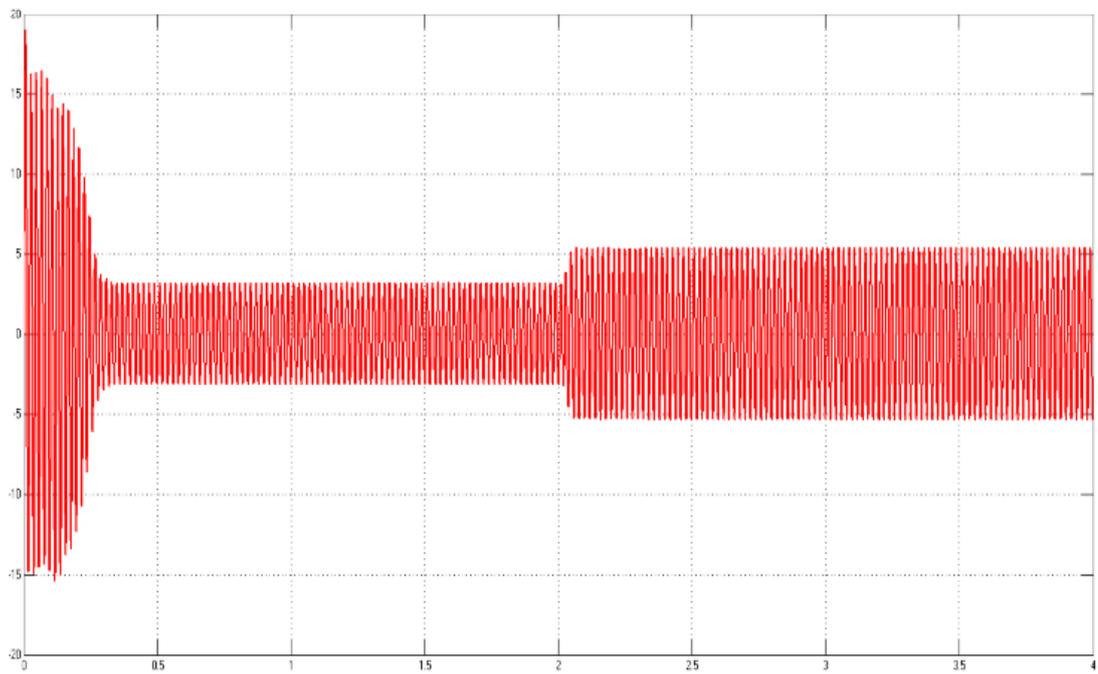


FIGURE 5.24 – le courants statoriques en fonction du temps (en charge  $C_r=10$  N.m)

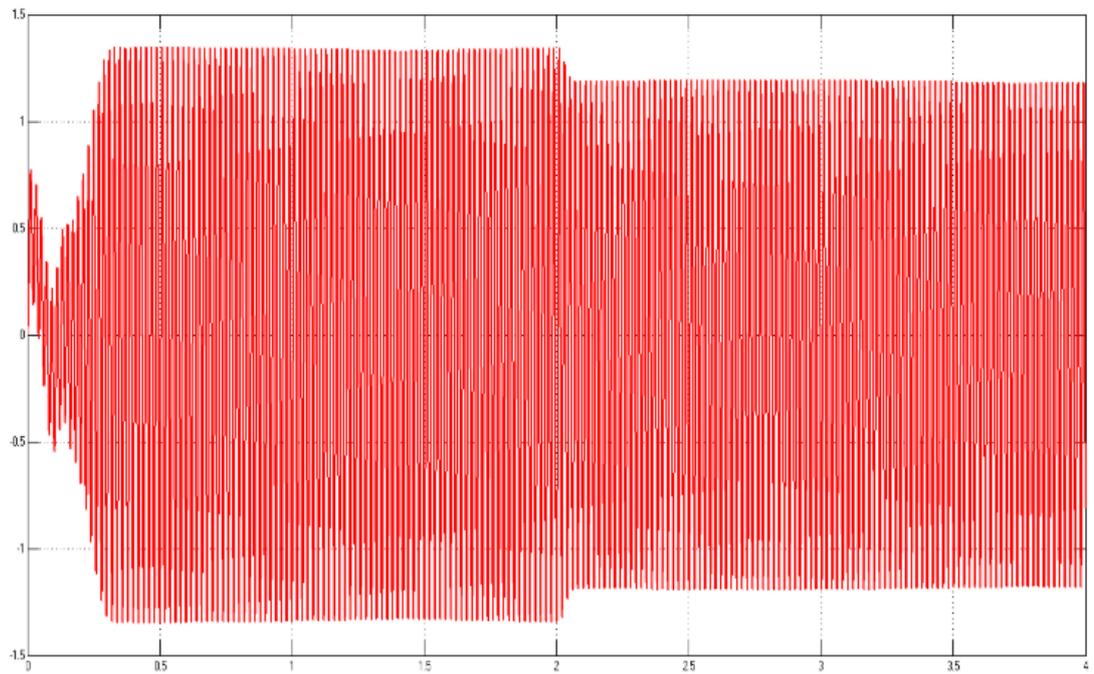


FIGURE 5.25 – le flux en fonction du temps (en charge)

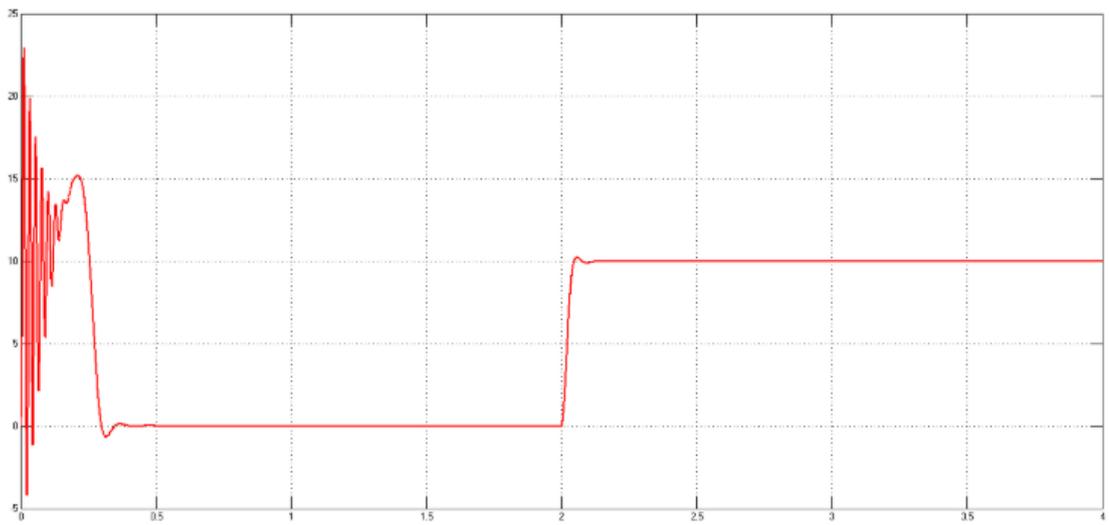


FIGURE 5.26 – le couple en fonction du temps (en charge)

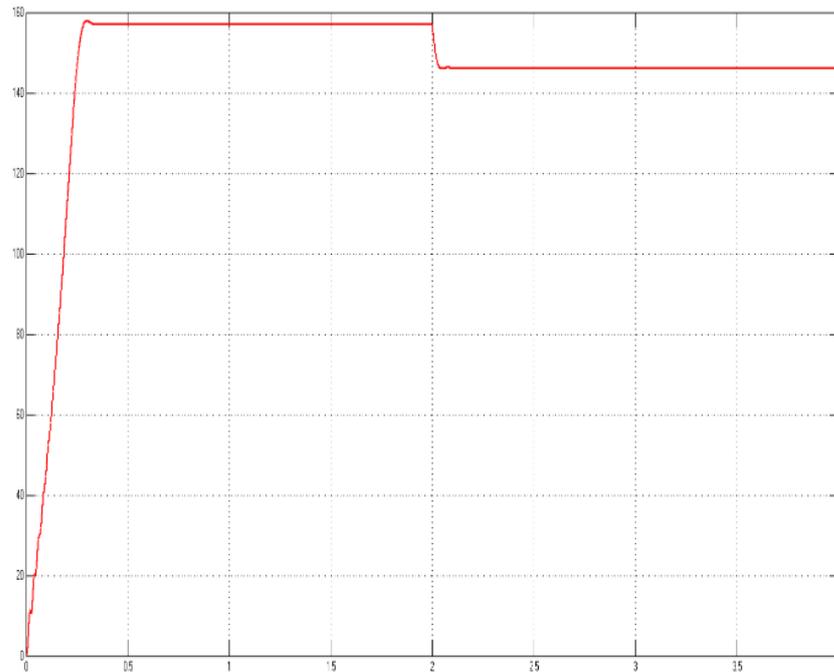


FIGURE 5.27 – la vitesse en fonction du temps (en charge)

### Interprétation des résultats de simulation :

#### démarrage à vide :

Au début, le courant du stator présente des oscillations qui disparaissent rapidement après plusieurs cycles.

Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, puis il se stabilise à zéro.

#### démarrage En charge :

Dans la deuxième étape, une perturbation du couple ( $C_r=10$  N.m) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instant  $t=2$ s, comme le montrent les résultats de simulation dans les figures (5.24), (5.25), (5.26) et (5.27).

Lorsqu'une charge est appliquée, le couple électromagnétique revient rapidement à sa valeur de référence pour compenser la contrainte instantanément. Avant de se stabiliser à la valeur du couple résistant, la vitesse du rotor diminue, provoquant un glissement important. Le courant du stator varie en fonction de la charge appliquée à l'arbre du moteur.

## 5.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'alimentation d'un moteur asynchrone à partir d'un générateur photovoltaïque (PV). L'utilisation du convertisseur DC-AC améliore les formes d'onde des tensions harmoniques, ce qui influence le bon fonctionnement de la charge. Les principales observations issues des résultats de simulation sont les suivantes :

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) déplace les harmoniques de la tension vers des fréquences plus élevées.

Pour un indice de modulation  $m = 45$  le spectre harmonique de la tension présente un THD = 3.56 %.

La combinaison de machines asynchrones et d'onduleurs de tension PWM (modulation de largeur d'impulsion) détermine l'efficacité du convertisseur et de la commande adoptée.

En conclusion, nous pouvons affirmer que grâce à la commande PWM, les caractéristiques de sortie de la machine sont équivalentes aux caractéristiques de sortie sous pleine tension, démontrant ainsi l'efficacité de ce type de contrôle dans les applications de moteurs asynchrones alimentés par des générateurs photovoltaïques.

# Conclusion générale

Dans le premier chapitre nous avons débuté par une présentation des différentes sources d'énergie renouvelable, avec une attention particulière portée à l'énergie solaire. Nous avons discuté des avantages environnementaux et économiques de l'énergie solaire, ainsi que de son potentiel pour répondre aux besoins énergétiques croissants.

Le deuxième chapitre a porté sur la modélisation des panneaux photovoltaïques. Nous avons examiné les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) des cellules solaires, ainsi que les effets des conditions environnementales telles que l'irradiation et la température sur ces caractéristiques. Une modélisation précise est essentielle pour optimiser la performance des systèmes PV.

Pour le troisième chapitre Nous avons étudié les convertisseurs DC/DC, en particulier les hacheurs série et les hacheurs Buck entrelacés. Ces dispositifs sont cruciaux pour réguler la tension et le courant issus des panneaux photovoltaïques afin de maximiser l'efficacité du transfert de puissance. Les avantages des hacheurs entrelacés, tels que la réduction des ondulations de courant et l'amélioration de l'efficacité, ont été particulièrement soulignés.

Le quatrième chapitre, a été consacré à L'extraction de la puissance maximale des panneaux photovoltaïques est essentielle pour optimiser l'efficacité du système. Nous avons exploré les différents algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking), en particulier l'algorithme de perturbation et observation (PO). Cet algorithme permet de suivre en temps réel le point de puissance maximale, même en présence de conditions environnementales changeantes.

Enfin dans le cinquième chapitre nous avons étudié l'application pratique de ces technologies pour alimenter un moteur asynchrone à partir d'un générateur photovoltaïque. Nous avons discuté de l'utilisation d'onduleurs triphasés et de la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour gérer la conversion de puissance. Les résultats de simulation ont démontré que cette configuration permet une alimentation stable et efficace du moteur asynchrone, confirmant la viabilité de l'intégration des systèmes PV dans des applications pratiques.

# Perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire ouvrent la voie à plusieurs perspectives de recherche et d'amélioration pour les systèmes d'énergie renouvelable, notamment dans le domaine de l'énergie solaire et des technologies photovoltaïques. Voici quelques axes de développement futurs :

## 1. Optimisation des Algorithmes MPPT :

- . Développement et implémentation de nouveaux algorithmes MPPT plus robustes et rapides pour améliorer encore la précision et la réactivité du suivi du point de puissance maximale sous des conditions environnementales variées et changeantes.
- . Intégration de techniques d'intelligence artificielle et de machine learning pour anticiper les variations d'irradiation et optimiser le rendement énergétique.

## 2. Amélioration des hacheurs :

- . Intégration des pertes par conduction et par commutation dans les composants semi-conducteurs.

## 3. Intégration de Systèmes de Stockage d'Énergie :

- . Intégration de systèmes de stockage d'énergie tels que les batteries ou les supercondensateurs pour assurer une alimentation stable et continue, même en l'absence de soleil ou sous des conditions météorologiques défavorables.

# Bibliographie

- [1] . Derdar, B. Nadia, A. Mohamed, N. Boutassetta, , M. S. Bouakkaz, I. Attoui, N. Fergani, A.Bouraiou “Photovoltaic energy generation systems monitoring and performance optimization using wireless sensors network and metaheuristics,” Sustainable Computing : Informatics and Systems., vol. 35, pp. 100684, 2022, doi : 10.1016/j.suscom.2022.100684
- [2] K.H. Hussein.“Maximum photovoltaic power tracking : an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions ”. In : IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution 142.1 (1995),p.59. ISSN : 13502360.DOI : 10.1049/ip-gtd :19951577. URL : [http://digitallibrary.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd\\_19951577](http://digitallibrary.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-gtd_19951577).
- [3] HAITAOUI el MOULAT, KHELIFI HOUDA, «Alimentation d’un moteur asynchrone à partir d’un générateur photovoltaïque», Mémoire Master, Université Ahmed DRAIA Adrar 2019.
- [4] ENHAMOUCHE WASSIM, CHIHEB mahdi, «étude et simulation d’un générateur photovoltaïque en site isolé», Université BADJI Mokhtar Annaba 2019/2020.
- [5] e photovoltaïque–Module 3 – Fonctionnement et Technologies. Institut Bruxellois pour la gestion de l’environnement. Novembre 2010 :1-10.
- [6] ambrini T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de Doctorat. Université Paris-Sud École doctorale : STITS, 2014.
- [7] ouchiche N. Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l’art. Rev Des Energies Renouvelables, Vol 21, N°2, 247 - 265, 2018.
- [8] . Meira Amaral da Luz, Í. Ferreira Silva, P. dos Santos Vicente, E. Moreira Vicente, F. L. Tofoli, and E. R. Ribeiro, “Maximum power point tracking technique based on sweeping the characteristic curve of the photovoltaic module,” Sustain. Comput. Informatics Syst., vol. 33, p. 100638, Jan. 2022, doi : 10.1016/j.suscom.2021.100638.

- [9] r.BELAID LALOUNI SOFIA, maitre de conférence class B."cours énergie solaire photovoltaïque".université A.Mira de béjaia.
- [10] BDESSELAM BELKHEIR ." Etude d'un hacheur entrelacé dédié aux énergies renouvelables". Université Ziane Achour de Djelfa 2016/2017.
- [11] . Touil , Z. Lammouchi,«> Modélisation et simulation d'un system photovoltaïque» Mémoire de Master en Génie Électrique ,université Echahid Hama Lakhder -D'el-oued, 2015.
- [12] ohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (2003). Power electronics : converters, applications, and design. John Wiley Sons.
- [13] iller, T. J. E. (2004). Brushless permanent magnet and reluctance motor drives. Clarendon Press.
- [14] olar Energy International. (2019). Photovoltaics : Design and Installation Manual.
- [15] ashid, M. H. (2017). Power Electronics Handbook : Devices, Circuits, and Applications. Academic Press.
- [16] rickson, R. W., Maksimovic, D. (2017). Fundamentals of power electronics. Springer Science Business Media.
- [17] ohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (2003). Power electronics : converters, applications, and design. John Wiley Sons.
- [18] ressmann, A. I., Billings, K. R., Morey, M., Dibene, J. T. (2018). Switching Power Supply Design Optimization, 2nd Edition. McGraw Hill Professional.
- [19] ldeen, M., Ahmad, S. (2018). A review on interleaved DC-DC converters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 90, 156-174.
- [20] ava, A. M., Ozdemir, K. (2013). Maximum power point tracking using fuzzy logic controller for photovoltaic systems. Expert Systems with Applications, 40(8), 2982-2988.
- [21] illiams, B. W., Lai, J. S. (2000). A comparison of five current source inverter topologies. IEEE Transactions on Industry Applications, 36(2), 520-528.
- [22] ressmann, A. I., Billings, K. R., Morey, M., Dibene, J. T. (2018). Switching Power Supply Design Optimization, 2nd Edition. McGraw Hill Professional.
- [23] ose, B. K. (2006). Power electronics and motor drives : Advances and trends. Academic Press.