

N° Ordre...../FHC/UMBB/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Présenté par

ABADOU Mohamed Fouad

AYADI Mohamed Raid

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique : Electricité Industrielle

Thème

Etude Et Simulation Des Onduleurs Multicellulaires Séries
Associes Au Système PV

Devant le jury :

Kifouche Rezki	MAA	UMBB	Président
HAMADACHE Mohammed	MCB	UMBB	Examineur
KHELIFI Fateh	MAA	UMBB	Encadreur

Année universitaire 2022/

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie

Département : Automatisation et Electrification des procédés

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique : Electricité Industrielle

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**Etude Et Simulation Des Onduleurs Multicellulaires Séries
Associes Au Système PV**

Présenté par :

- ABADOU Mohamed Fouad
- AYADI Mohamed Raid

Avis favorable de l'encadreur :

Signature

Avis favorable du Président du jury

Nom Prénom

Signature

Cachet et signature

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier ALLAH, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail. Nous tenons à remercier très sincèrement notre encadrant : Mr, **KHELIFI Fateh**, pour ses orientations, qu'elles trouvent ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect. Nos précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger ce travail. Et tous ceux qui ont contribué, à ce que ce travail prenne forme. Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont soutenu de près ou de loin, pour élaborer ce travail.

Merci à tous et à toutes.

DEDECASE

Je dédie ce mémoire à mon père, ma mère, mes sœurs, ma famille et tous mes amis. Leur soutien inconditionnel, leur amour et leur encouragement ont été des sources d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours académique. Leur présence et leur soutien indéfectibles ont été des piliers essentiels pour atteindre mes objectifs. Je leur suis profondément reconnaissant pour leur soutien constant et leur confiance en moi.

: ملخص

تركز هذه أطروحة الماستر على تصميم ونمذجة ومراقبة محولات الخلايا المتعددة المتسلسلة المتصلة بأنظمة الطاقة الشمسية. ويطور نموذجًا كهربائيًا (MPPT) يستكشف البحث تحسين إنتاج الطاقة باستخدام خوارزميات تتبع نقطة الطاقة القصوى بدقة لمولدات الطاقة الشمسية. يتناول الدراسة استراتيجيات مختلفة للتحكم في تحويل الطاقة بكفاءة واستقرار في محولات الخلايا المتعددة المتسلسلة. تُستخدم تقنيات المحاكاة لتقييم أداء هذه المحولات تحت ظروف مختلفة. كما يدرس هذا البحث تطبيق التحكم الخطي بتعديل عرض النبض على تكوين محول خلايا متعددة متسلسلة يتألف من 7 خلايا. بشكل عام، يساهم هذا العمل في تطوير تكنولوجيا الطاقة المتجددة من خلال توفير رؤى حول تكامل أنظمة الطاقة الشمسية وتحسين الأداء.

:الكلمات المفتاحية

إنتاج الطاقة، تحويل الطاقة، (MPPT) أنظمة الطاقة الشمسية، المحولات المتعددة المتسلسلة، تتبع نقطة الطاقة القصوى، استراتيجيات التحكم، النمذجة الكهربائية، تقنيات المحاكاة، الطاقة المتجددة، التكامل، تحسين الأداء، وحدة الطاقة الشمسية،

Abstract:

This master thesis focuses on the design, modeling, and control of series multicellular inverters connected to photovoltaic (PV) systems. It explores the optimization of power generation using maximum power point tracking (MPPT) algorithms and develops an accurate electrical model for PV generators. The study investigates various control strategies for efficient and stable power conversion in series multicellular inverters. Simulation techniques are employed to evaluate their performance under different conditions. The thesis also examines the application of linear control with pulse width modulation to a 7-cell multicellular inverter configuration. Overall, this work contributes to the advancement of renewable energy technologies by providing insights into PV system integration and performance optimization.

Key words:

Photovoltaic systems, series multicellular inverters, maximum power point tracking (MPPT), energy generation, power conversion, control strategies, electrical modeling, simulation techniques, renewable energy, integration, performance optimization, PV module, linear control, pulse width modulation, energy efficiency.

Résumé :

Ce mémoire de master se concentre sur la conception, la modélisation et le contrôle d'onduleurs multicellulaires en série connectés à des systèmes photovoltaïques. Il explore l'optimisation de la production d'énergie en utilisant des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et développe un modèle électrique précis pour les générateurs photovoltaïques. L'étude examine différentes stratégies de contrôle pour une conversion de puissance efficace et stable dans les onduleurs multicellulaires en série. Des techniques de simulation sont utilisées pour évaluer leurs performances dans différentes conditions. Le mémoire examine également l'application du contrôle linéaire avec modulation de largeur d'impulsion à une configuration d'ondeur multicellulaire en série à 7 cellules. Dans l'ensemble, ce travail contribue à l'avancement des technologies d'énergie renouvelable en fournissant des perspectives sur l'intégration des systèmes photovoltaïques et l'optimisation des performances. Mots-clés, Systèmes photovoltaïques, onduleurs multicellulaires en série, suivi du point de puissance maximale (MPPT), production d'énergie, conversion de puissance, stratégies

Mots-clés : Systèmes photovoltaïques, onduleurs multicellulaires en série, suivi du point de puissance maximale (MPPT), production d'énergie, conversion de puissance, stratégie

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I: Les systèmes photovoltaïques.....	3
I.1 Introduction :.....	4
I.2 La production de l'énergie électrique à travers les panneaux photovoltaïque :	4
I.2.1 Jonction P-N.....	4
I.2.2 Les différents types des cellules solaires :.....	5
I.2.3 Paramètres d'une cellule solaire	6
I.2.4 Spectre solaire	8
I.2.5 Rayonnement solaire :.....	9
I.2.6 Générateur photovoltaïque :.....	10
I.2.7 Etages d'adaptations :.....	12
I.2.8 Différents systèmes photovoltaïques :.....	13
I.2.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	15
I.3 Module PV contrôlé par une commande MPPT :.....	15
I.3.1 La commande MPPT :.....	15
I.3.2 Méthode perturbation et observation 'P&O' :.....	16
I.4 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque	17
I.4.1 Modèle à une diode	17
I.4.2 Modèle à deux diodes.....	19
I.4.3 Modèles Mathématiques :	19
I.5 Conclusion.....	19
Chapitre II: Les convertisseurs statiques.....	20
II.1 Introduction	21
II.2 Généralités sur les convertisseurs statiques :.....	21
II.3 Les Composants Semi-Conducteurs :.....	21
II.3.1 La Diode :.....	21
II.3.2 Le Transistor :	22
II.3.3 Les Thyristors :.....	23
II.3.4 Utilisation des composants semi-conducteurs selon leur puissance et fréquence de commutation :.....	24
II.4 Les hacheurs :	24

II.5	Les onduleurs :	26
II.5.1	Classification des onduleurs :.....	26
II.5.1.1	Les onduleurs non autonomes :.....	26
II.5.1.2	Les onduleurs autonomes :.....	26
II.5.1.2.1	Onduleur de tension	26
II.5.1.2.2	Onduleur de courant.....	26
II.5.2	Types d'onduleurs de tension :.....	27
II.5.2.1	Onduleurs monophasés	27
II.5.2.1.1	L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif	27
II.5.2.1.2	Un onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu..	27
II.5.2.1.3	Un onduleur monophasé en pont	28
II.5.2.2	Onduleur triphasé.....	28
II.6	Les Onduleurs Multi-Niveaux :	29
II.6.1	Intérêt des onduleurs multiniveaux :	30
II.6.2	Onduleur NPC (Neutral Point Clamped) :	30
II.6.3	Onduleur à Condensateur flottant (FCC) :	30
II.6.4	Onduleur en Cascade A Ponts En H (CHB) :.....	31
II.6.5	Les Onduleurs Multicellulaires :.....	31
II.6.5.1	Onduleurs multicellulaires superposés SMC (Stacked Multicellular Converters):.....	31
II.6.5.2	Onduleurs multicellulaires parallèles PMC (Parallel Multicellular Converter) :	32
II.6.5.3	Onduleur multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters) :.....	33
II.6.6	Comparaison des onduleurs multiniveaux	35
II.7	Modélisation d'onduleur multicellulaire série [22]	35
II.7.1	Modèle aux valeurs moyennes	35
II.7.1.1	Hypothèses :.....	35
II.7.1.2	Modèle moyen d'un bras multicellulaire	36
II.8	Les stratégies de commande des onduleurs multicellulaires :.....	39
II.8.1	Commande en boucle ouverte :.....	39
II.8.1.1	Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) :	39

II.8.1.1.1	Les paramètres de performance :	41
II.8.2	Commande en boucle fermée :	42
II.8.2.1	Théorie de la commande linéaire par modulation des rapports cycliques [22]: 42	
II.9	Conclusion :	46
Chapitre III: Simulation des onduleurs multicellulaires série.....		47
III.1	Introduction	48
III.2	Simulation des onduleurs de tension :	48
III.2.1	Onduleur multicellulaire série à 2 cellules :	48
III.2.1.1	Structure :	48
III.2.1.2	Séquences de fonctionnement :	48
III.2.1.3	Simulation d'onduleur multicellulaire a 2 cellules et les résultats obtenus : 50	
III.2.2	Onduleur multicellulaire série à 4 cellules	52
III.2.2.1	Structure	52
III.2.2.2	Séquence de fonctionnement :	52
III.2.2.3	Simulation d'onduleurs multicellulaire a 4 cellules et les résultats obtenus 55	
III.2.3	Interprétations des résultats	56
III.3	Conclusion :	57
Chapitre IV: Simulation de l'ensemble onduleur multicellulaire et GPV		58
IV.1	Introduction :	59
IV.2	Simulation de module photovoltaïque :	59
IV.2.1	Module photovoltaïque :	59
IV.2.2	Simulation de la commande MPPT « P&O » + hacheur survolteur :	61
IV.2.3	Interprétation des résultats de la simulation PV avec la commande MPPT :	61
IV.3	Simulation de l'ensemble GPV et onduleurs Multicellulaire :	61
IV.4	Simulation de l'ensemble GPV et onduleur alimentant une charge RL :	62
IV.4.1	Simulation de l'onduleur Multicellulaire à 2 cellules :	62
IV.4.2	Simulation de l'onduleur Multicellulaire à 4 cellules :	66
IV.4.2.1	Influence du taux de modulation M_a et le rapport de fréquence M_f sur le THD :	66

SOMMAIRE

IV.4.2.2	Interprétations des résultats de la simulation :.....	69
IV.5	Simulation de l'onduleur multicellulaire série à 7 cellules :.....	69
IV.5.1	La commande MLI-ST :.....	69
IV.5.1.1	Interprétations des résultats de la simulation :.....	72
IV.5.2	La commande linéaire par modulation des rapports cycliques à un onduleur multicellulaire 7 cellules :.....	72
IV.5.2.1	Interprétations des résultats des simulations :.....	75
IV.6	Conclusion :	75
CONCLUSION GENERALE	76
BIBLIOGRAPHIE	78
Bibliographie	79

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 Cellules solaires : (a) monocristallines, (b) polys cristallins, (c) amorphes	6
Figure I.2 Les caractéristiques I-V d'une cellule PV	6
Figure I.3 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire	8
Figure I.4 Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G) [3]	9
Figure I.5 Rayonnement réfléchi, Rayonnement direct Et Rayonnement diffus	9
Figure I.6 Connexion en série des cellules (N_s).....	10
Figure I.7 Connexion en parallèle des cellules (N_p) et son caractéristique I-V [4]	11
Figure I.8 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V. [5]	11
Figure I.9 L'influence de la température sur la caractéristique P-V. [5].....	12
Figure I.10 étage d'adaptation entre un GPV et une charge.	13
Figure I.11 Schéma d'un système autonome (hors-réseau).	13
Figure I.12 Système de Pompage PV.....	14
Figure I.13 Injection partielle / Injection totale.....	15
Figure I.14 Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.....	16
Figure I.15 caractéristique puissance - tension d'un panneau photovoltaïque.....	16
Figure I.16 Algorithme de la méthode perturbation et observation.	17
Figure I.17 schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode	17
Figure I.18 schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes	19

CHAPITRE II

Figure II. 1 Familles de convertisseurs statiques.	21
Figure II. 2 Symbole et caractéristiques de Diode	22
Figure II.3 Symbole de Transistor.....	22
Figure II. 4 Symbole et caractéristiques de transistor MOS.....	22
Figure II.5 Symbole de transistor bipolaire.....	23
Figure II.6 Symbole et caractéristiques de l'IGBT	23
Figure II.7 Symbole de thyristor SCR.....	23
Figure II.8 Symbole de thyristor GTO	23
Figure II. 9 Répartition des différents types de composants en fonction de la puissance et de la fréquence de commutation	24
Figure II. 10 Schéma d'un hacheur abaisseur.	25
Figure II. 11 Hacheur abaisseur-élevateur.	25
Figure II. 12 Schéma d'un hacheur élevateur (boost).	25
Figure II. 13 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	26
Figure II. 14 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif.....	27
Figure II. 15 Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure II. 16 Onduleur monophasé en pont.....	28
Figure II. 17 Schéma de principe d'un onduleur triphasé	29
Figure II. 18 Schéma de classification des onduleurs multiniveaux	29
Figure II. 19 Bras d'un onduleur NPC multi niveaux.	30
Figure II. 20 Onduleur multi niveaux à condensateur flottant	31
Figure II. 21 Onduleur en pont H en Cascade.....	31
Figure II. 22 Onduleur multicellulaire superposé Px2.	32
Figure II. 23 Onduleur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation.....	33
Figure II. 24 Bras d'un onduleur multicellulaire à P cellules de commutation.....	33
Figure II. 25 Bras d'un onduleur multicellulaire série à deux cellules de commutation.	34
Figure II. 26 Bras d'onduleur multicellulaire série à P cellules de commutations.	34
Figure II. 27 Structure d'un bras multicellulaire p-cellules	36
Figure II. 28 Evolution des grandeurs électriques au sein d'une cellule i.....	36
Figure II. 29 Représentation du modèle moyen d'un bras multicellulaire.....	37
Figure II. 30 Principe de la MLI-ST pour un onduleur multicellulaire série.	40
Figure II. 31 Commande en boucle ouverte par MLI-ST d'un onduleur multicellulaire série.41	
Figure II. 32 Formes d'ondes obtenues à l'échelle de la période de découpage.	43
D'après la figure II. 33, nous remarquons que si les rapports cycliques des cellules $i+1$ et i sont différents, le courant moyen I_{Ci} qui traverse le condensateur C_i n'est pas nul et, par conséquent, la tension V_{Ci} évolue [25].....	43
Figure II. 34 Boucle de régulation de la tension condensateur V_{Ci}	44

CHAPITRE III

Figure III. 1 Structure d'un bras d'onduleur à 2 cellules.....	48
Figure III. 2 Structure de la commande MLI à 2 porteuses	48
Figure III. 3 Signale de référence et porteuses	49
Figure III. 4 Signal de commande des interrupteurs supérieurs.....	49
Figure III. 5 Signal de commande des interrupteurs inférieurs.....	50
Figure III. 6 Tension simple à 5KHz.....	50
Figure III. 7 Tension composée à 5KHz	51
Figure III. 8 Tension simple à 10KHz.....	51
Figure III. 9 Tension composée à 10KHz	52
Figure III. 10 Structure de la commande MLI dans SIMULINK	52
Figure III. 11 Signaux de référence et porteuses	53
Figure III. 12 Signal de commande des interrupteurs supérieures.....	54
Figure III. 13 Signal de commande des interrupteurs inférieurs.....	54
Figure III. 14 Tension simple à 5KHz.....	55
Figure III. 15 Tension composé à 10KHz	55
Figure III. 16 Tension simple à 10KHz.....	56
Figure III. 17 Tension composé à 10KHz	56

CHAPITRE IV

Figure IV. 1	Block SIMULINK du module SunPower SPR-315E-WHT-D	60
Figure IV. 2	Caractéristique I(V) et P(V) du module pour différentes valeurs de l'éclairement	60
Figure IV. 3	Caractéristique I(V) et P(V) du module pour différentes valeurs de la température	60
Figure IV. 4	Simulation de la commande MPPT « P&O » +hacheur	61
Figure IV. 5	La tension maximale à la sortie du PV après l'application de l'MPPT	61
Figure IV. 6	La puissance maximale à la sortie du PV après l'application de l'MPPT	61
Figure IV. 7	Circuit de l'onduleur Multicellulaire (P=2)	62
Figure IV. 8	Variations de courant en fonction de Ma.....	63
Figure IV. 9	Variations de THD% en fonction de Ma	64
Figure IV. 10	Variations de courant en fonction de Ma.....	64
Figure IV. 11	Variations de THD% en fonction de Ma	65
Figure IV. 12	Circuit de l'onduleur Multicellulaire (P=5)	66
Figure IV. 13	Variations de courant en fonction de Ma.....	66
Figure IV. 14	Variations de THD% en fonction de Ma	67
Figure IV. 15	Variations de courant en fonction de Ma.....	68
Figure IV. 16	Variations de THD% en fonction de Ma	68
Figure IV. 17	Bloc de la commande MLI-ST du bras d'onduleur FCMC 7 cellules.....	70
Figure IV. 18	Bras d'onduleur FCMC 7 cellules alimentant une charge R-L	70
Figure IV. 19	Evolution des tensions flottante.....	71
Figure IV. 20	Evolution de la tension de sortie.....	71
Figure IV. 21	THD de la tension de sortie	71
Figure IV. 22	Evolution du courant de charge	72
Figure IV. 23	THD de courant de charge.....	72
Figure IV. 24	Commande linéaire par modulation des rapports cycliques d'un bras d'onduleur multicellulaire série.	73
Figure IV. 25	Evolution des tensions flottantes	73
Figure IV. 26	Evolution de la tension de sortie.....	74
Figure IV. 27	THD de la tension de sortie.	74
Figure IV. 28	Evolution du courant de charge	74
Figure IV. 29	THD du courant de charge.....	75

LISTE DES SYMBOLES

LISTE DES SYMBOLES

a : Le facteur d'idéalité de la jonction
A_{ref} : Amplitude du signal de référence
A_p : Amplitude du signal de la porteuse
c : La vitesse de la lumière [m. s⁻¹].
C : Condensateur de filtre (F)
CHB : Cascade H-bridge (CHB)
E_{inc} : l'intensité lumineuse incidente (W.m⁻²)
E : La tension continue d'entrée de l'onduleur(V)
F_F : Facteur de forme
F_r : Fréquence du signal de référence (Hz)
F_p : Fréquence du signal de la porteuse (Hz)
FCC : Flying capacitor converter
G: L'éclairement (W/m²)
G_{ref} : L'insolation de référence de la cellule (= 1000W / m²)
h: La constante de Planck [j. s⁻¹].
I : Courant de la cellule photovoltaïque(A)
I_{ph} : Le photo-courant (A)
I_d : Courant de diode (A)
I_g : Courant du générateur(A)
I_{sc} : Courant de court-circuit (A)
I_s : Le courant de saturation de la diode (A)
IGBT : Insulated-Gate-Bipolar-Transistor
K : Constant de boltzman (1.38 10⁻²³ JK)
KI : Le coefficient de courant en fonction de température A/C°
KV : Le coefficient de tension en fonction de température V/C°
L : Inductance de filtre (H)
Ma : Le taux de modulation d`amplitude
Mf : Taux de modulation de fréquence
Ns : Le nombre de module en série
Np : Le nombre de module en parallèle
n : Le nombre de niveau de tension de sortie
Pm : Puissance maximale(W)
Q : La charge d'un électron (1.6 10⁻¹⁹(C)
RS : Résistance série de la cellule (Ω)
Rsh : Résistance parallèle de la cellule (Ω)
T : Température (C°)
THD : Total Harmonic Distortion
Voc : La tension du circuit ouvert (V)
Vth : La tension thermique (V)
W : Pulsation (rad/s)

LISTE DES SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est largement utilisée pour alimenter en électricité divers équipements industriels et appareils domestiques. Elle est mise en œuvre dans des projets photovoltaïques autonomes à faible consommation ainsi que dans la construction de centrales électro-solaires adaptées aux sites isolés ou connectées au réseau électrique local.

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et toujours en courant continu : il faut souvent la stocker et parfois la transformer. Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en deux catégories : les systèmes autonomes et les systèmes hybrides connectés au réseau. L'association des centrales PV connectées au réseau électrique se fait à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (DC/AC)

Durant ces dernières années, la technologie des convertisseurs de puissance a connu un développement fabuleux grâce au développement des technologies des semi-conducteurs et des techniques numériques. Ce développement a donné naissance de nouveaux convertisseurs de puissance dit « multi-niveaux » qui sont utilisés principalement pour l'alimentation à fréquence variable des machines alternatives de forte puissance.

Plusieurs structures de ces convertisseurs multi-niveaux ont été proposées tel que les convertisseurs multicellulaires, qui sont basés sur l'association en série des cellules élémentaires de commutation, constituent des systèmes hybrides. Apparue au début des années 1990, cette topologie permet d'assurer la répartition des contraintes en tension sur les différents composants semi-conducteurs basses tensions connectés en série, et d'améliorer les formes d'ondes en sortie.

Afin de conserver un fonctionnement correct du convertisseur au cours du temps, sa commande doit assurer la régulation des tensions de condensateurs. Ainsi, la régulation permet d'une part de répartir équitablement les contraintes sur chaque interrupteur, et d'autre part de conserver les mêmes caractéristiques de point de vue des niveaux de tension de sortie.

Le travail effectué est une étude et simulation d'onduleurs multicellulaire série destinés à convertir la tension continue délivrée par un panneau photovoltaïque afin d'alimenter les charges en tension alternative.

Notre travail sera organisé de la manière suivante :

La première partie présente les notions de base sur la production d'électricité par l'effet photovoltaïque, le principe de la cellule photovoltaïque et les différents types de panneaux photovoltaïques existants, la méthode de commande MPPT.

La deuxième partie est une étude théorique sur les convertisseurs statiques utilisés dans ces systèmes, leurs principes de fonctionnement et leurs stratégies de commande.

La troisième partie est consacrée à la simulation des onduleurs multicellulaires à 2 et 4 cellules en utilisant MLI-ST, et présenter les résultats de la simulation pour chaque onduleur

La quatrième partie chapitre nous réalisons une association de générateur photovoltaïque avec un onduleur multicellulaires série et la variation des différents paramètres de la commande. Et nous allons simuler l'onduleur multicellulaire série à 7 cellules commandé par la commande linéaire par modulation des rapports cycliques.

En terminant avec une conclusion générale.

Chapitre I: Les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque découvert par **Alexandre Edmont Becquerel** en 1839. Dans ce chapitre nous allons présenter les notions de base sur la production d'électricité par l'effet photovoltaïque, le principe de la cellule photovoltaïque et les différents types de panneaux photovoltaïques existants, la méthode de commande MPPT, ensuite nous allons exposer les modèles électriques d'un générateur photovoltaïque.

I.2 La production de l'énergie électrique à travers les panneaux photovoltaïque :

Le but des panneaux solaires est de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs. Ceux-ci sont capables de transformer l'énergie fournie par le soleil en charge électrique donc en électricité car la lumière du soleil excite les électrons de ces matériaux. Le silicium est le principal composant d'une cellule photovoltaïque. Le silicium a été choisi pour réaliser les cellules solaires photovoltaïques pour ses propriétés électroniques, caractérisées par la présence de quatre électrons sur sa couche périphérique (colonne IV du tableau de Mendeleïev).

La cellule est composée de deux types de cristaux de silicium, dits « dopés » :

- Une zone dite dopée « **n** »
- Une zone dite dopée « **p** »

Le dopage permet de créer un déséquilibre d'électrons entre les deux couches. L'une sera en déficit et l'autre en excédent. Les électrons en excédent seront alors amenés à circuler entre les 2 couches pour « trouver une place ».

Lorsque les photons (l'énergie solaire) traversent la cellule, ils provoquent le déplacement d'électrons des deux couches n et p. Les électrons n et p quittent alors leur zone respective et naviguent entre les zones : **cette agitation d'électrons est la définition même de l'électricité**. L'addition des réactions de toutes les cellules du panneau solaire constituent donc l'électricité brute fournie par le panneau.

I.2.1 Jonction P-N

La jonction P-N est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction. Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées.

Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction N-P joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps τ appelé durée de vie des porteurs minoritaires [1].

I.2.2 Les différents types des cellules solaires :

Il existe trois types principaux de cellules : (A) les cellules monocristallines, (B) les cellules poly-cristallines et (C) les cellules amorphes.

A. Les cellules monocristallines

La cellule monocristalline est celle qui s'approche le plus du modèle théorique. Cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 % [9].

Ces cellules présentent néanmoins des inconvénients [10], [11] qui sont résumés comme suit :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

B. Les cellules poly-cristallines

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles proviennent aussi du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [9].

Les cellules poly-cristallines sont caractérisées par [10], [11] :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

C. Les cellules amorphes

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible) [10], [11].

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie des nouveaux matériaux le tellure de cadmium (Cd-Te), L'arséniure de gallium (Ga-As) ainsi que le sélénure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis

d'obtenir des photopiles ayant des rendements de 38 % au laboratoire. La figure I.1 représente les trois types de cellules.

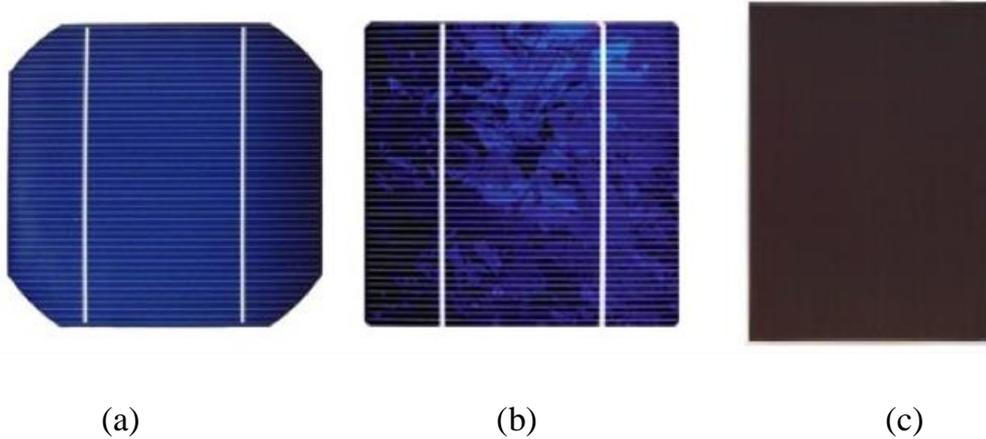


Figure I.1 Cellules solaires :(a) monocristallines, (b) polys cristallins, (c) amorphes

I.2.3 Paramètres d'une cellule solaire

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. La caractéristique I(V) représente les trois zones essentielles [2]

- **La zone (1):** où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- **La zone (2):** représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **La zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

La figure (I.2) montre les trois zones essentielles dans caractéristique I-V.

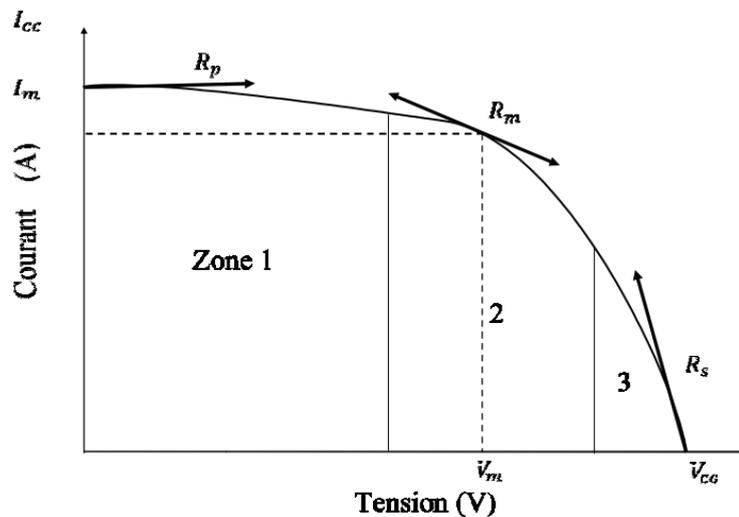


Figure I.2 Les caractéristiques I-V d'une cellule PV

Deux grandeurs physiques définissent cette courbe sont le courant du court-circuit et la tension en circuit ouvert.

Les grandeurs caractéristiques principales des cellules solaires sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension en circuit ouvert V_{co}
- Le facteur de forme FF
- Le rendement de conversion d'énergie
- La réponse spectrale RS

1) Courant de court-circuit, I_{cc}

Ce courant est obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule, il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement et de la température.

2) Tension de circuit ouvert, V_{co}

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

3) Facteur de forme, FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement P_{max} (I_{max}, V_{max}) de la courbe courant-tension (Figure I.3). Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad I-1$$

4) Rendement de conversion η

Le rendement η , des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in}

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF \cdot \frac{V_{co} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \quad I-2$$

P_{in} : la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 100 \text{ mW/cm}^2$).

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty, I = 0, V = V_{co}$) ou en court-circuit ($R_c = 0, I = I_{cc}, V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée P_{max}

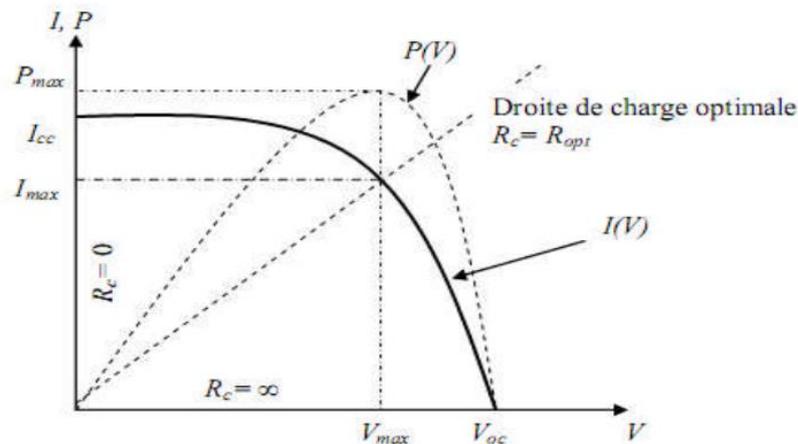


Figure I.3 Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule solaire

5) Réponse spectrale d'une cellule photovoltaïque

La réponse spectrale RS d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente, en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante :

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad \text{I-3}$$

I.2.4 Spectre solaire

La lumière solaire est composée de toutes sortes de rayonnements, de couleurs différentes, caractérisées par différentes longueurs d'onde. Des photons grains de lumière composent ce rayonnement électromagnétique. En 1924, Louis de Broglie a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules (photons) et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Le rayonnement émis par le soleil correspond à celui du corps noir à la température de 6000 °C. L'intensité du rayonnement au-dessus de l'atmosphère est de 1.35 kW/m², avec un spectre centré au voisinage de $\lambda = 0.48 \mu\text{m}$. A la surface du sol, la densité de puissance n'est plus que de 0.9 kW/m² en raison de l'absorption essentiellement par l'ozone, l'eau et le gaz carbonique.

En outre, le spectre n'est plus continu mais présente des bandes d'absorption. Pour mesurer l'effet de l'atmosphère on utilise l'air masse, défini par $AM = 1/\cos \alpha$ ou α représente l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale. AM0 est utilisé pour préciser les conditions au-dessus de l'atmosphère. AM 1.5 étant celui atteignant le sol par temps clair (surface d'un mètre carré faisant un angle de 48° avec l'équateur).

De plus, on distingue les spectres AM1.5D et AM1.5G qui correspondent respectivement au flux direct et au flux global (direct et diffus). La figure I.4 donne ces spectres. Elle indique quelques semi-conducteurs utilisés pour les applications photovoltaïques ainsi que leurs énergies de gap E_g correspondantes [3]

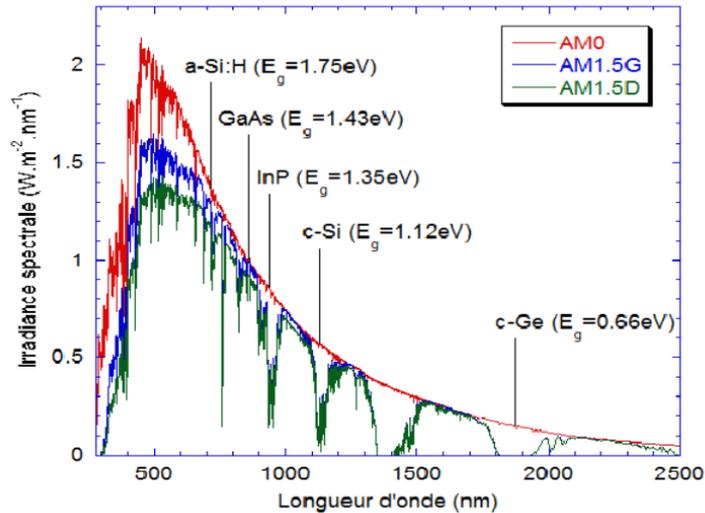


Figure I.4 Irradiance ou spectre solaire à la surface de l'atmosphère terrestre (AM0) et au sol (AM1.5D et AM1.5G) [3]

I.2.5 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire (ou insolation) est émis par le soleil, est modifié lors de son passage dans l'atmosphère, subit d'autres changements causés par les topographies et surfaces, puis est intercepté à la surface de la Terre sous la forme de composants directs, diffus et réfléchis. Le rayonnement direct est intercepté tel quel, en une ligne directe provenant du soleil. Le rayonnement diffus est dispersé par des composants atmosphériques, comme les nuages et des particules de poussière. Le rayonnement réfléchi est réfléchi à partir des entités de surface. La somme du rayonnement direct, diffus et réfléchi est appelée "rayonnement solaire total" ou "global".

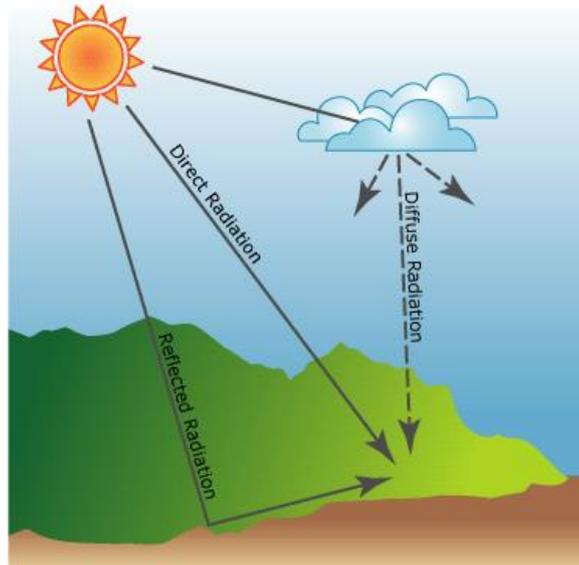


Figure I.5 Rayonnement réfléchi, Rayonnement direct Et Rayonnement diffus

I.2.6 Générateur photovoltaïque :

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules.

- **Influence de l'association série des cellules PV :**

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 ; 25°C), la tension pour une puissance maximale délivrée par une cellule en silicium est d'environ (0.47 V) sous un courant de (4.35 A).

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. Une association de (N_s) cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. [4]

Donc Le courant de générateur PV est équivalent au courant d'une cellule unique, mais la tension de sortie a augmenté (une addition des tensions de toutes les cellules)

$$V_{PV} = N_s * V_{cell} \quad I-4$$

$$I_{PV} = I_{cell} \quad I-5$$

La caractéristique d'un groupement de N modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

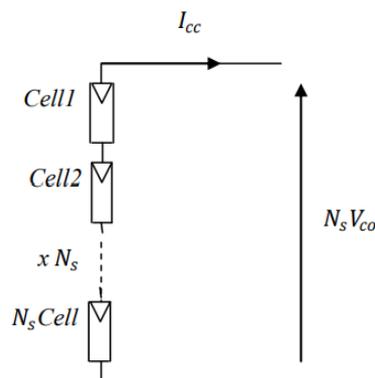


Figure I.6 Connexion en série des cellules (N_s).

- **Influence de l'association parallèle des cellules PV :**

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du

groupement est obtenue par addition des courants. Les équations (I.7-I.7) et la figure (I.7) résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules. [4]

$$IPV = NP * I_{cell} \tag{I-6}$$

$$VPV = V_{cell} \tag{I-7}$$

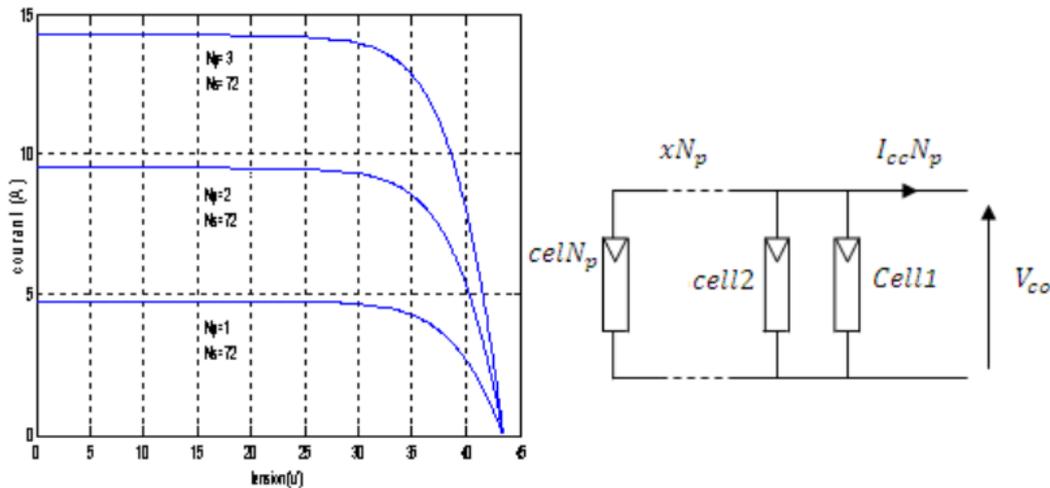


Figure I.7 Connexion en parallèle des cellules (N_p) et son caractéristique I-V [4]

• **Influence de l'éclairement :**

La figure (I.8) montre l'effet de l'éclairement sur les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ a une température constante.

Nous remarquons que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement, la puissance augmente et chaque courbe a un point de puissance maximale PPM qui est le point de fonctionnement maximal.

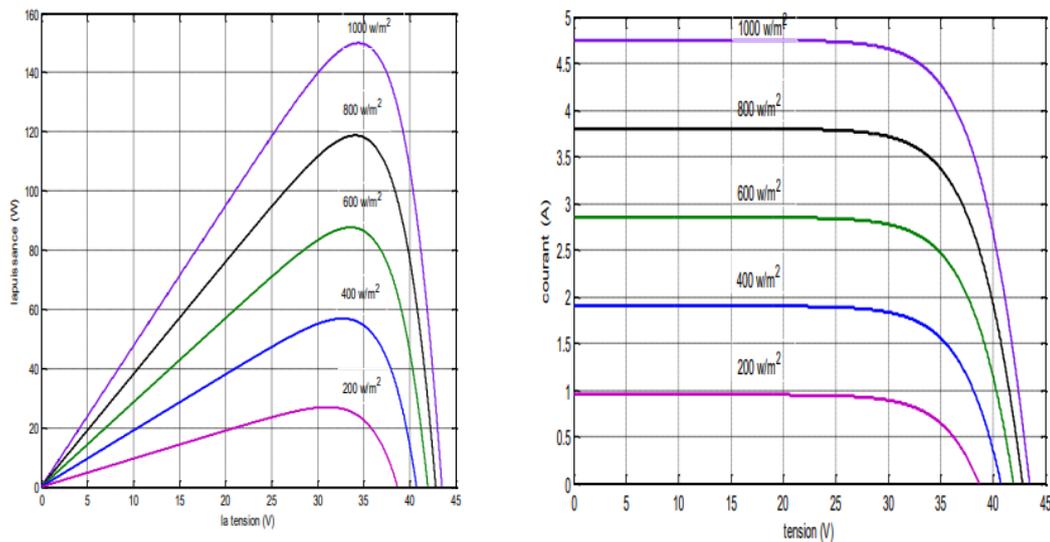


Figure I.8 L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V. [5]

• **Influence de la température :**

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

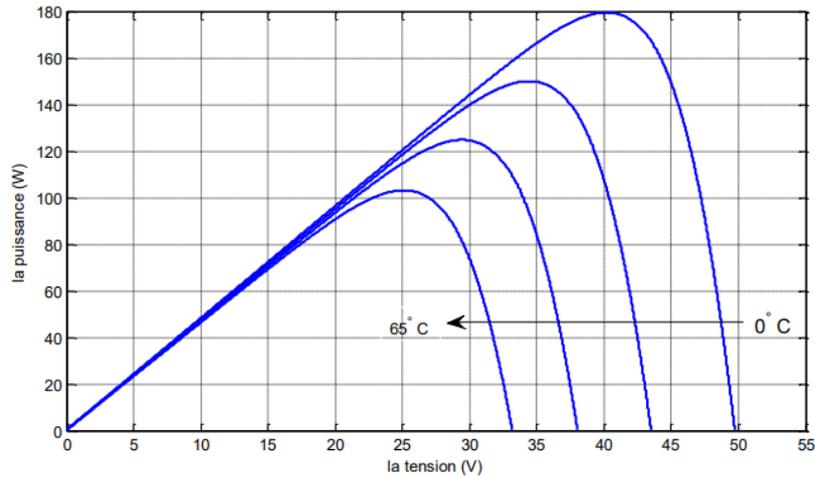


Figure I.9 L'influence de la température sur la caractéristique P-V. [5]

La figure (I.9) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [5]

1.2.7 Etages d'adaptations :

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques non linéaires avec un point de puissance maximum MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur photovoltaïque et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge comme présenté dans la figure (I.10).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de puissance maximale disponible.

Rôle du convertisseur DC-DC fait fonctionner les modules à leur point de puissance optimale, quel que soient l'éclairement et la charge pour délivrer cette puissance à l'utilisation [6]

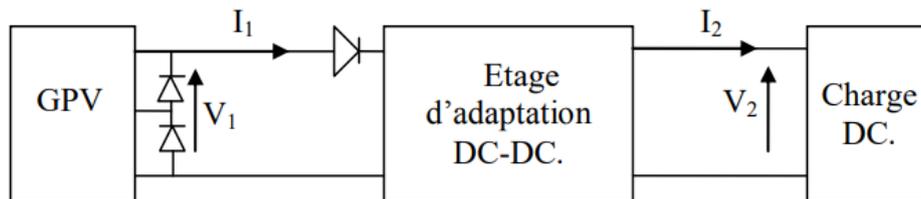


Figure I.10 étage d'adaptation entre un GPV et une charge.

I.2.8 Différents systèmes photovoltaïques :

Système isolé ou autonome :

On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs, etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure I.11). Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas).

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle.

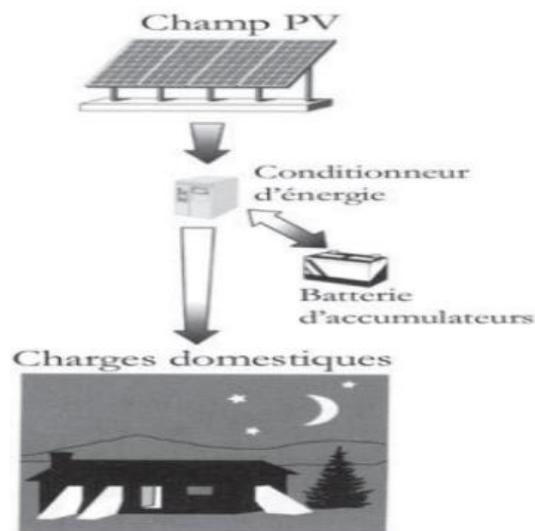


Figure I.11 Schéma d'un système autonome (hors-réseau).

Types de systèmes PV autonomes :

On distingue deux types :

- Les systèmes au fil du soleil
- Les systèmes avec stockage

A) Les systèmes au fil du soleil Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage. Ils exploitent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint. Ces systèmes sont classés, selon la nature de la charge à alimenter, en deux types systèmes à courant continu et systèmes à courant alternatif. L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque avec ses deux types : systèmes de pompage PV à courant continu et systèmes à courant alternatif. Pour le deuxième cas on doit ajouter un onduleur. La Figure I.12 montre un exemple d'un système de pompage PV où le conditionneur d'énergie peut être, selon la fonction exigée, un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC ou les deux en même temps (les conditionneurs d'énergie seront étudiés aux chapitres qui suivent). Ces systèmes sont simples mais leur inconvénient est la coupure de l'alimentation en absence du soleil. Ces systèmes utilisent, en général, un autre moyen de stockage tel que les réservoirs d'eau pour le pompage PV.

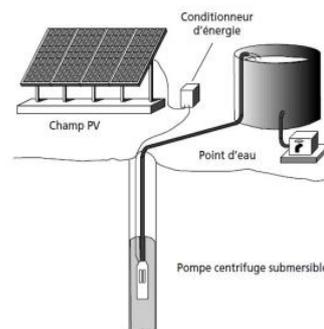


Figure I.12 Système de Pompage PV.

B) Les systèmes avec stockage Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits). Le système de stockage sert à emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie. Comme exemple, on peut citer l'alimentation des maisons en électricité dans des sites isolés.

Système raccordé au réseau :

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique. Ç à d. le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique (Figure I.13). Remarque Pour le premier cas on peut avoir un système de stockage si les lois du pays encouragent la vente d'énergie renouvelable alors que pour le deuxième cas le stockage est utilisé si on veut réduire la consommation durant les heures de pointes, plus particulièrement de nuits.

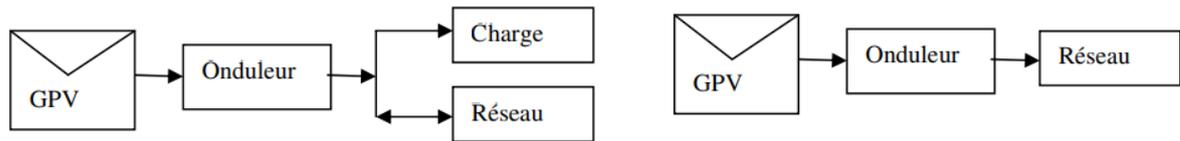


Figure I.13 Injection partielle / Injection totale

I.2.9 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont :

1) Avantages :

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages [7], [8] qui sont résumés comme suit :

- Sa gratuité.
- Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- L'installation ne produit aucun bruit.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils ne consomment aucun combustible fossile.
- Sa structure fixe.
- Ils ont une longue durée de vie.

2) Inconvénients :

Selon les références [7] et [8], les systèmes photovoltaïques présentent de nombreux inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique dans des accumulateurs qui sont les plus souvent des batteries au Plomb. Sachant que les batteries ne doivent pas se décharger à plus de 60% (70% maximum) de leur capacité maximale. En outre, les batteries ont une faible durée de vie (3 à 5ans), ce qui entraîne un surcoût au fonctionnement.

I.3 Module PV contrôlé par une commande MPPT :

I.3.1 La commande MPPT :

Le principe de cette commande est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale. La figure I.14 représente une chaîne de conversion photovoltaïque

élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge.

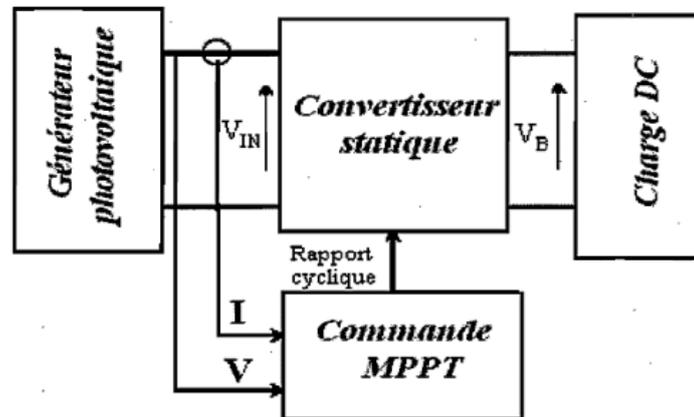


Figure I.14 Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

La technique de contrôle consiste donc à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le point de fonctionnement du générateur à sa valeur optimale quelque soient les instabilités météorologiques ou les variations brutales de la charge. [9]

I.3.2 Méthode perturbation et observation 'P&O' :

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{PV} , ce qui engendre une variation de la puissance. La figure I.15 montre que si une augmentation de la tension provoque un accroissement de la puissance, le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM, si au contraire la puissance décroît, il est à droite. De la même manière, on peut faire un raisonnement pour une diminution de la tension. En résumé, pour une perturbation de la tension, si la puissance augmente, la direction de la perturbation est maintenue. Si non, elle est inversée pour que le point de fonctionnement converge vers le PPM. [9]

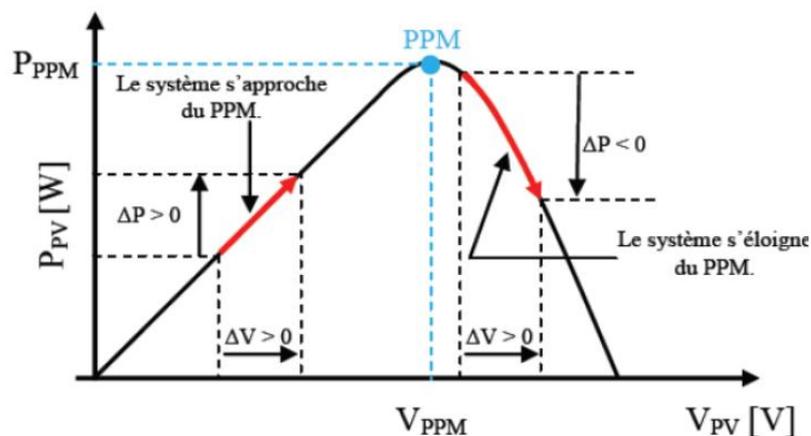


Figure I.15 caractéristique puissance - tension d'un panneau photovoltaïque

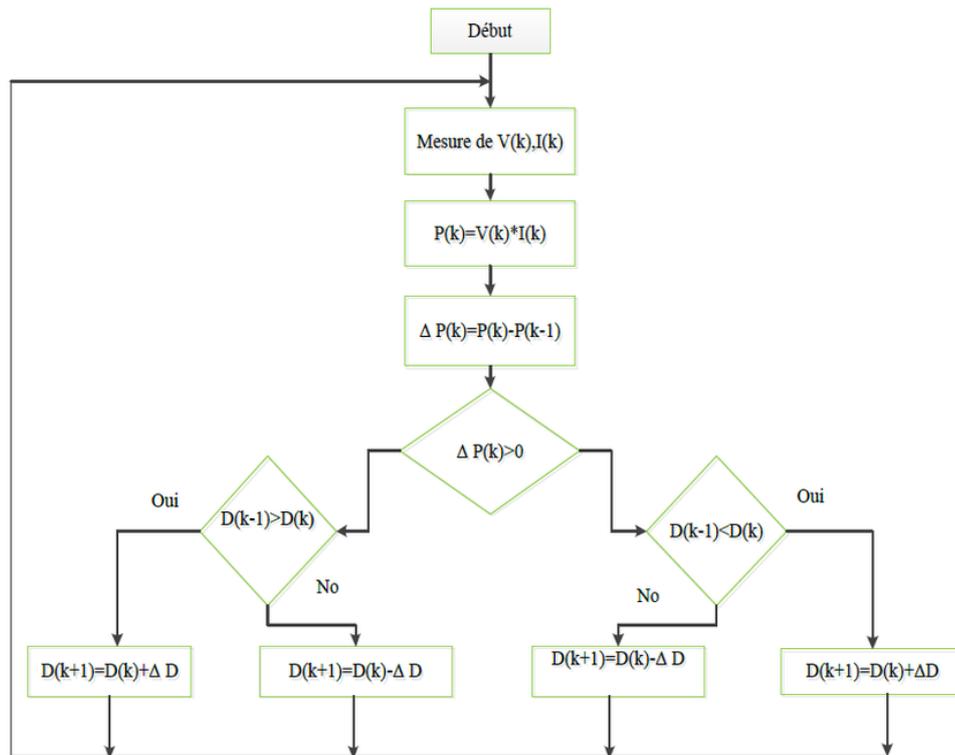


Figure I.16 Algorithme de la méthode perturbation et observation.

I.4 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. On présentera deux modèles du GPV :

- Modèle à une diode.
- Modèle à deux diodes.

I.4.1 Modèle à une diode

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

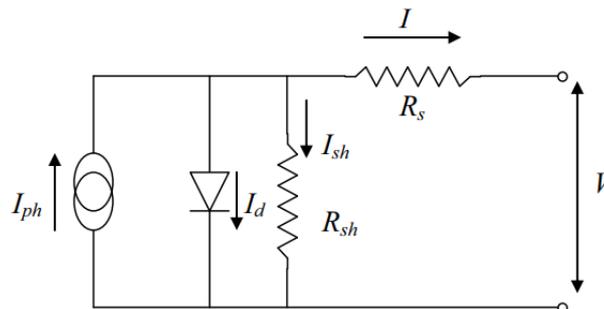


Figure I.17 schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation (II-1)

$$I = I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_s \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{A k T} \right\} - 1 \right] \quad I-8$$

Où :

I : Courant fourni par la cellule [A]

V : Tension à la borne de la cellule [V]

I_{ph} : Photocourant [A], proportionnel à l'irradiance F, avec correction selon T

I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [A]

R_s : Résistance série [W].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [W].

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

T : Température effective de la cellule [Kelvin].

Il faut noter que ces deux résistances sont liées à la technologie d'élaboration des électrodes.

Il faut minimiser R_s de telle sorte que R_{sh} soit très important.

Le photocourant I_{ph} varie avec l'irradiance, il est déterminé par rapport à des valeurs données aux conditions de référence :

$$I_{ph} = \frac{\Phi}{\Phi_{ref}} \cdot [I_{phref} + \mu_{1cs} \cdot (T - T_{ref})] \quad I-9$$

Où :

Φ et Φ_{ref} : Irradiance effective et de référence [W/m^2].

T et T_{ref} : Température effective et de référence [K].

μ_{1cs} : coefficient de température du photocourant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible.

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression:

$$I_s = I_{sref} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \right) \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad I-10$$

Où : E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_g = 1,12$ eV, Silicium amorphe $E_g = 1,7$ eV, CIS = $1,03$ eV, CdTe = $1,5$ eV).

Les conditions de référence Φ et Φ_{ref} sont les conditions extérieures pour lesquelles sont spécifiées les données de base utilisées pour l'établissement du modèle (V_{co} , I_{co} , V_{max} , I_{max}), se sont soit les spécifications du fabricant, toujours données aux STC (Standard Test Conditions, $1000 W/m^2$, $25^\circ C$, spectre AM1,5), soit des valeurs issues d'une mesure du module.

I.4.2 Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure I.17 [10]

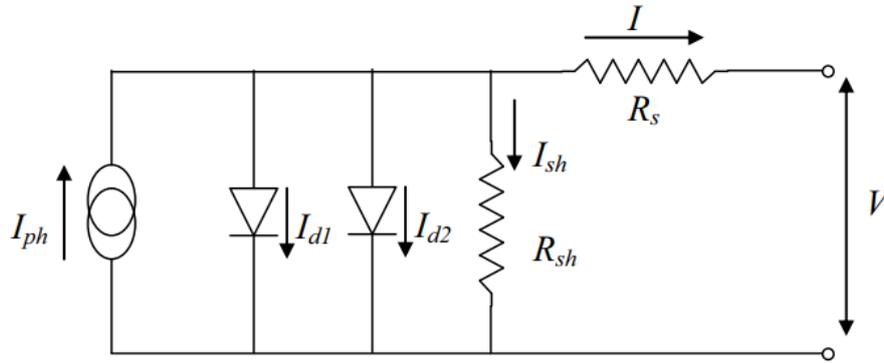


Figure I.18 schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes

Le courant fourni par la cellule est donné par la relation

$$I = -I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp \left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2AKT} \right\} - 1 \right] \quad I-11$$

I.4.3 Modèles Mathématiques :

En ce qui concerne la modélisation des capteurs PV, l'étude bibliographique a fait ressortir qu'il existe deux approches. La première nécessite d'effectuer des mesures sur le capteur PV une fois installé. C'est le cas des modèles 'Sandia' et Cenerg'. La deuxième approche consiste à se baser uniquement sur les données fournies par les constructeurs, ce qui est le cas du modèle 'Madison'.

I.5 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les bases fondamentales de la cellule solaire. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres qui influent sur leurs caractéristiques, puis la commande mppt et ensuite le modèle électrique d'un générateur photovoltaïque.

A partir de ce premier chapitre nous avons conclu que la température, l'éclairement influent sur le courant et la tension du panneau et la méthode MPPT sert à maximiser son rendement.

Chapitre II: Les convertisseurs statiques

II.1 Introduction

Après avoir exposé les systèmes PV, nous allons étudier les convertisseurs statiques utilisés dans ces systèmes (tel que les onduleurs et les hacheurs), leurs principes de fonctionnement et leurs stratégies de commande. La source initiale est continue et que l'énergie résultante sera injectée sous forme alternative AC. nous aurons besoin d'un convertisseur DC/AC. Nous allons étudier les onduleurs multiniveaux de type multicellulaires série.

II.2 Généralités sur les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge. L'étude et la conception de ces dispositifs est souvent appelée électronique de puissance [11] La figure I.1 illustre les différents convertisseurs :

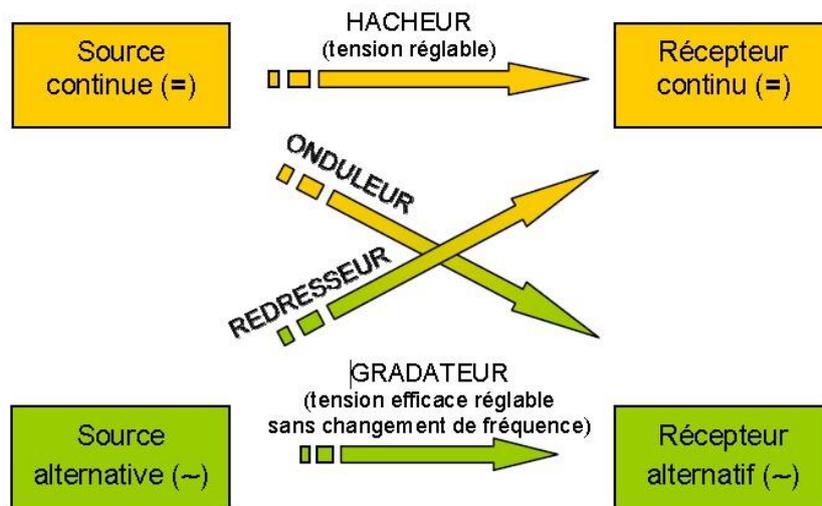


Figure II. 1 Familles de convertisseurs statiques.

II.3 Les Composants Semi-Conducteurs :

II.3.1 La Diode :

Une diode est un composant électronique de base qui permet le passage du courant électrique dans une seule direction. Elles sont souvent utilisées comme protecteurs de circuit et pour limiter la tension dans les applications électroniques. Elles peuvent être fabriquées à partir de différents matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium, le germanium et le carbure de silicium.

Les Caractéristiques Statiques D'une Diode : Ils sont donnés dans la figure II.2 avec :

V_F : tension directe

I_F : courant direct

V_{RRM} : tension inverse maximale répétitive

V_{RSM} : Tension inverse maximale non répétitive.

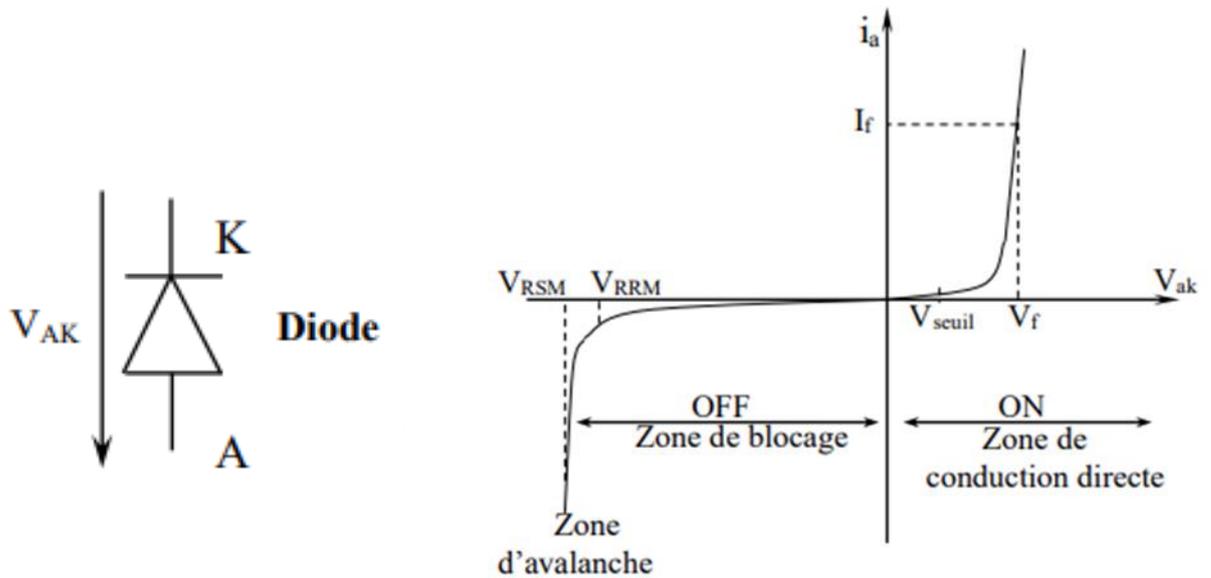


Figure II. 2 Symbole et caractéristiques de Diode

II.3.2 Le Transistor :

Le transistor est un interrupteur électronique qui est commandé pour s'ouvrir ou se fermer. Différents types de transistor peuvent être :

- a) Le Transistor bipolaire à jonction (BJT)

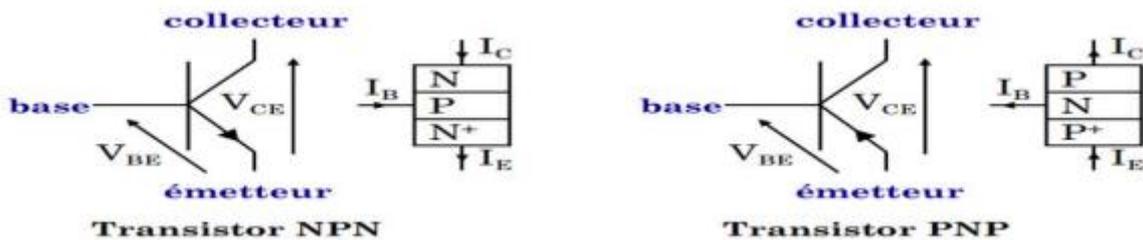


Figure II.3 Symbole de Transistor

- b) Le transistor MOS (MOSFET - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

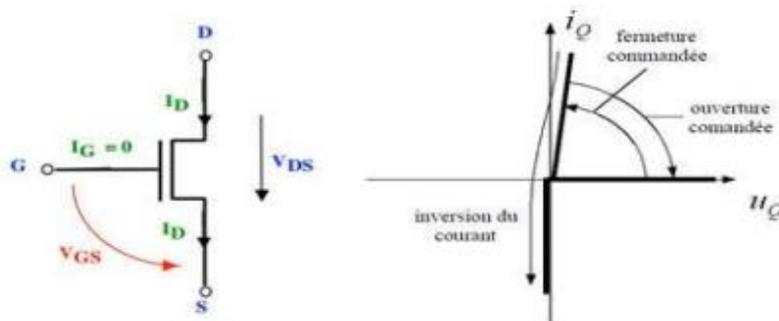


Figure II. 4 Symbole et caractéristiques de transistor MOS

- c) Le transistor bipolaire à jonction (BJT) : est un type de transistor qui est composé de trois régions dopées de silicium, formant deux jonctions P-N. Ces régions sont appelées l'émetteur, la base et le collecteur.

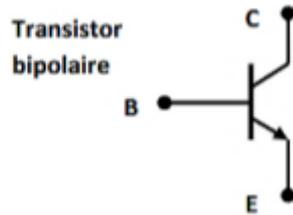


Figure II.5 Symbole de transistor bipolaire

d) L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) est un type de transistor bipolaire qui combine les avantages du MOSFET et du BJT. Il est capable de commuter de grandes quantités de puissance tout en offrant une résistance à l'état passant très faible.

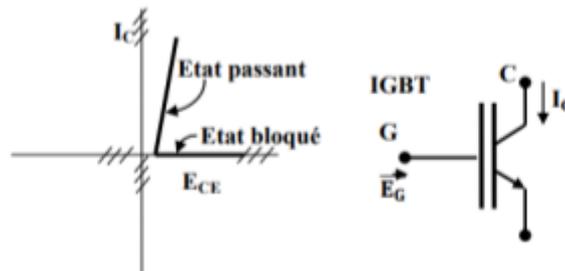


Figure II.6 Symbole et caractéristiques de l'IGBT

II.3.3 Les Thyristors :

Les Thyristors sont des dispositifs à semi-conducteur à trois couches et à quatre bornes qui peuvent être utilisés comme commutateurs ou redresseurs. Ils sont couramment utilisés dans les applications de contrôle de puissance, Différents types de thyristor peuvent être :

a) Les thyristors SCR (Silicon Controlled Rectifiers)

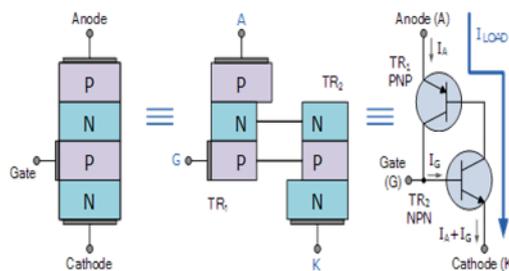


Figure II.7 Symbole de thyristor SCR

b) Les thyristors GTO (Gate Turn-Off thyristors)

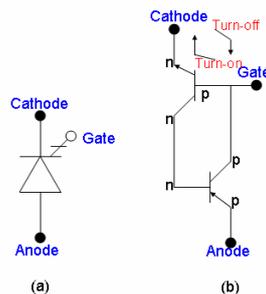


Figure II.8 Symbole de thyristor GTO

II.3.4 Utilisation des composants semi-conducteurs selon leur puissance et fréquence de commutation :

La Figure II.9 montre les différents types d'interrupteurs couramment utilisés selon la plage de puissance et la fréquence d'utilisation. L'IGBT est une structure semi-conductrice qui combine les avantages de la commande MOS et les performances de conduction d'une structure bipolaire. Pour ces raisons, les IGBT sont devenus le Composant majeur de l'électronique de puissance pour des applications jusqu'à 10 kW sous des fréquences jusqu'à 20 kHz. Pour obtenir des calibres en courant importants, on utilise des modules de puissance qui sont un ensemble de semi-conducteurs de puissance connectés entre eux dans un même boîtier. Ils sont utilisés en traction ferroviaire nécessitant un fort courant ; de plus, ils ont des pertes de commutation plus faibles que les thyristors.

Les transistors MOS sont utilisés généralement pour les faibles puissances et fortes fréquences. La conduction unipolaire du composant leur confère de faibles pertes en commutation au détriment d'une chute de tension élevée en conduction à forte tension de claquage. Néanmoins, les nouveaux concepts de structures MOS que nous verrons au permettent d'augmenter la puissance de ceux-ci et ainsi, de concurrencer les IGBT dans quelques applications.

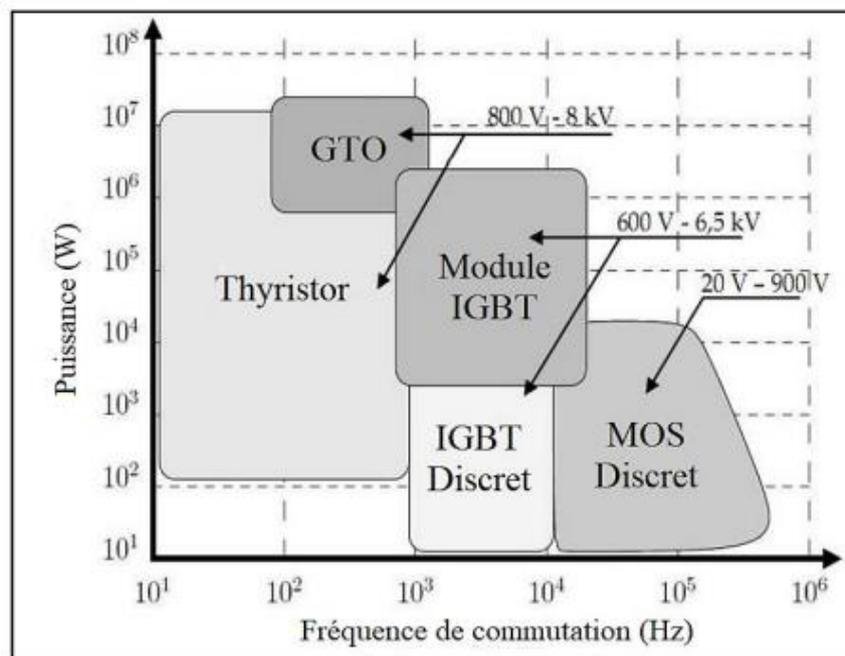


Figure II. 9 Répartition des différents types de composants en fonction de la puissance et de la fréquence de commutation

II.4 Les hacheurs :

Un hacheur, également appelé convertisseur continu-continu, est un dispositif électronique qui permet de convertir une tension continue d'une valeur donnée en une autre tension continue de valeur différente. Le principe de fonctionnement d'un hacheur repose sur la commutation rapide d'un interrupteur électronique qui permet de modifier la valeur moyenne de la tension d'entrée. Les hacheurs sont largement utilisés dans les systèmes d'alimentation électrique pour

réguler la tension et le courant fournis à une charge, et sont également utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie renouvelable tels que les panneaux solaires et les éoliennes.

Différents types d'hacheurs :

L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Les différences structures de hacheurs dépendent du cahier des charges imposé au système pour choisir le type d'hacheur prendre en compte la nature des réseaux d'entrée et de sortie, différents types de convertisseurs de tension peuvent être :

- Hacheur abaisseur (ou Buck),
- Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost),
- Hacheur élévateur (ou Boost),

1. Hacheur abaisseur

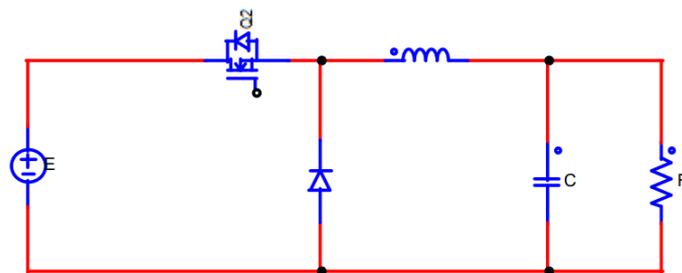


Figure II. 10 Schéma d'un hacheur abaisseur.

2. Hacheur abaisseur-élévateur :

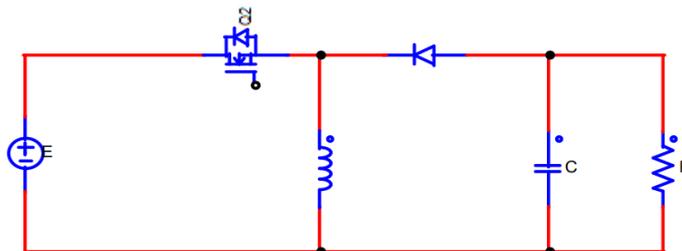


Figure II. 11 Hacheur abaisseur-élévateur.

3. Hacheur élévateur :

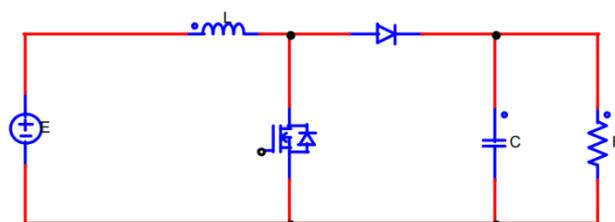


Figure II. 12 Schéma d'un hacheur élévateur (boost).

II.5 Les onduleurs :

Les onduleurs sont des dispositifs électroniques qui permettent de convertir une source de courant continu en une tension alternative de fréquence variable, souvent utilisée pour alimenter des moteurs ou des équipements électriques nécessitant une alimentation alternative.

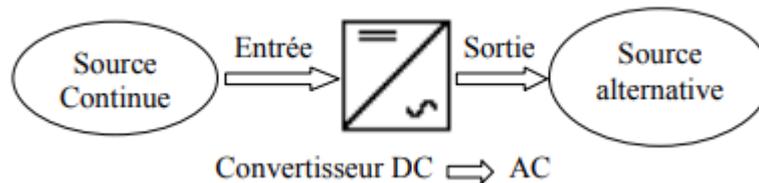


Figure II. 13 Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, dont chacun correspond à un type d'application déterminée ou permettant des performances recherchées, on distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance

II.5.1 Classification des onduleurs :

II.5.1.1 Les onduleurs non autonomes :

Les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

II.5.1.2 Les onduleurs autonomes :

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible. On distingue deux types d'onduleurs autonomes :

II.5.1.2.1 Onduleur de tension

Un onduleur de tension est un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, la tension « U_{dc} » n'est pas affecté par les variations du courant « i_{dc} » qui la traverse, la source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie. Le courant à la sortie « i_{ch} » et donc le courant à l'entrée « i_{dc} » dépendent de la charge placée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque à la seule condition qu'il ne s'agisse pas d'une autre source de tension (capacité ou f.e.m alternative) directement branchée entre les bornes de sortie [12]

II.5.1.2.2 Onduleur de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant « i_{dc} » qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension « U_{dc} » à ses bornes. [12]

II.5.2 Types d'onduleurs de tension :

II.5.2.1 Onduleurs monophasés

Les onduleurs monophasés sont des dispositifs qui convertissent l'énergie électrique continue en énergie électrique alternative monophasée. Ils sont utilisés dans une variété d'applications telles que l'alimentation des équipements électroménagers, des outils électriques, des équipements de bureau, des équipements médicaux et des systèmes de climatisation.

II.5.2.1.1 L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif

Est un type d'onduleur utilise un diviseur capacitif pour diviser la tension d'entrée et produire une tension de sortie alternative. C'est une solution simple et peu coûteuse pour les applications nécessitant une faible puissance, telles que les alimentations électriques de faible puissance pour les équipements électroniques.

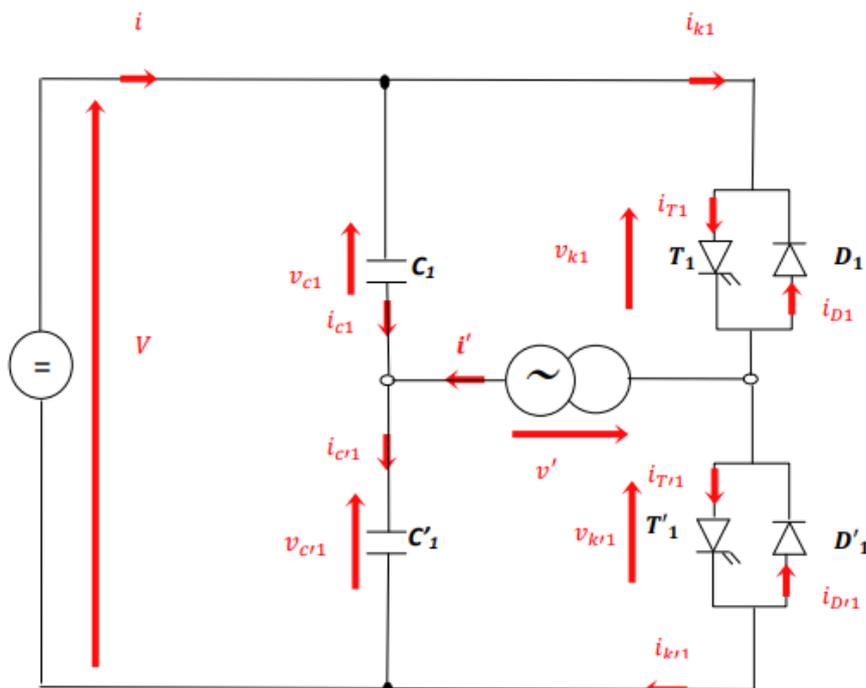


Figure II. 14 Onduleur monophasé avec diviseur capacitif

II.5.2.1.2 Un onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu

Est un type d'onduleur qui utilise un transformateur pour isoler la charge du circuit de commande. Le transformateur a un enroulement central qui est relié à la charge, et les deux côtés de l'enroulement sont alimentés en alternance par des signaux de tension qui sont déphasés de 180 degrés. Cela permet de créer une tension alternative sinusoïdale à la sortie de l'onduleur. Ce type d'onduleur est couramment utilisé dans les applications industrielles où une tension alternative stable et isolée est requise.

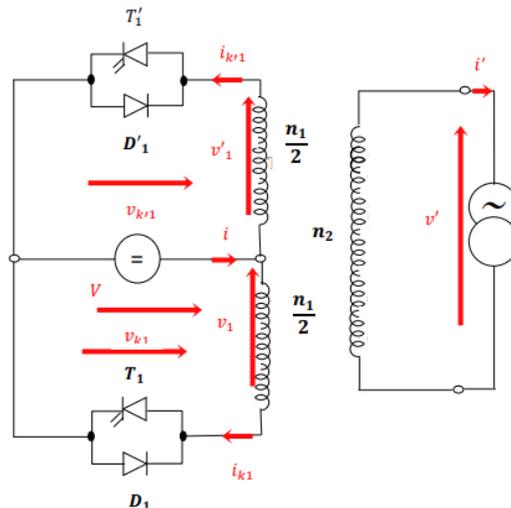


Figure II. 15 Onduleur monphasé avec transformateur de sortie à point milieu

II.5.2.1.3 Un onduleur monphasé en pont

Est un type d'onduleur qui utilise quatre interrupteurs électroniques pour inverser la polarité de la tension continue et la transformer en une tension alternative sinusoïdale. Les interrupteurs sont contrôlés par un circuit de commande pour générer la forme d'onde de sortie souhaitée. Ce type d'onduleur est couramment utilisé dans les applications de conversion d'énergie et de commande de moteurs électriques.

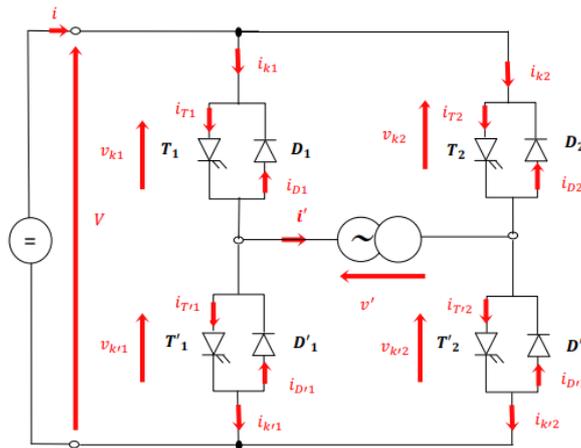


Figure II. 16 Onduleur monphasé en pont

II.5.2.2 Onduleur triphasé

Un onduleur triphasé est un dispositif électronique qui transforme une alimentation électrique triphasée fixe en une tension triphasée variable de fréquence variable

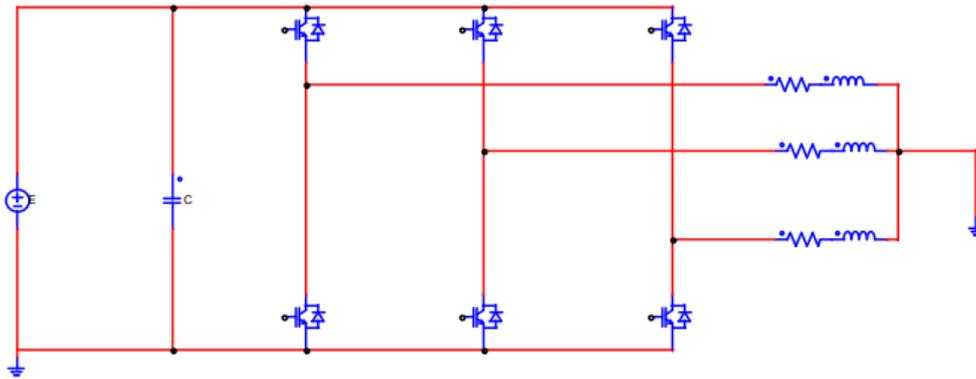


Figure II. 17 Schéma de principe d'un onduleur triphasé

II.6 Les Onduleurs Multi-Niveaux :

Les onduleurs multi-niveaux sont des types d'onduleurs qui utilisent plusieurs niveaux de tension pour générer un signal de sortie sinusoïdal. Contrairement aux onduleurs conventionnels qui utilisent des interrupteurs à deux états (fermé ou ouvert), les onduleurs multi-niveaux utilisent plusieurs interrupteurs à plusieurs états pour produire un signal de sortie avec une forme d'onde plus précise. Les onduleurs multi-niveaux sont utilisés dans des applications telles que les réseaux électriques, les moteurs électriques, les éoliennes et les systèmes solaires. Ils sont appréciés pour leur haute efficacité, leur faible distorsion harmonique et leur capacité à gérer de grandes puissances.

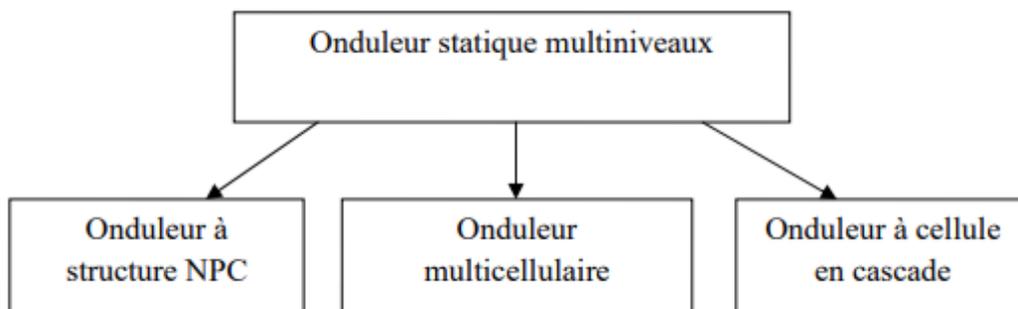


Figure II. 18 Schéma de classification des onduleurs multiniveaux

II.6.1 Intérêt des onduleurs multiniveaux :

Ces structures mentionnées présentent des avantages énergétiques parmi lesquels on peut citer :

- Générer des tensions proches de la forme sinusoïdale,
- Une qualité améliorée du courant par la diminution des harmoniques,
- Souplesse de la partie contrôle/commande grâce aux nombreuses stratégies de modulations permettant d'optimiser l'utilisation de ces onduleurs,
- La fréquence de commutation peut être élevée à faible puissance et peut atteindre plusieurs dizaines de kHz pour les applications nécessitant un contrôle rapide du courant. [13]

II.6.2 Onduleur NPC (Neutral Point Clamped) :

Cette structure est configurée pour obtenir un nombre élevé de niveaux et de meilleur qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé, et de réduire les harmoniques injectés dans la charge. [14]. Elle est la plus ancienne connue sous le nom d'onduleur clampé par le neutre, la répartition de la tension d'entrée continue sur les différents interrupteurs en série est assurée par les diodes (clamps) connectées à des points milieu capacitifs [14]

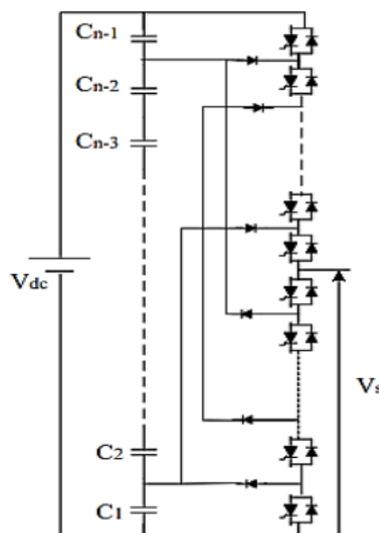


Figure II. 19 Bras d'un onduleur NPC multi niveaux.

II.6.3 Onduleur à Condensateur flottant (FCC) :

Onduleur à condensateur flottant (FCC) est similaire à l'onduleur NPC en ce qu'il ne nécessite pas d'alimentations CC isolées pour fonctionner. Les condensateurs C1 et C2 sont utilisés pour créer une tension de liaison DC divisée comme dans l'onduleur NPC. Le FCC utilise des condensateurs flottants au lieu des diodes pour créer des niveaux de tension de sortie supplémentaires. Une topologie en FCC est illustrée dans la Figure II.20

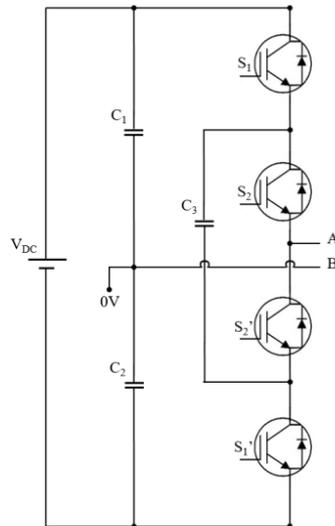


Figure II. 20 Onduleur multi niveaux à condensateur flottant

II.6.4 Onduleur en Cascade A Ponts En H (CHB) :

L'onduleur en cascade à ponts en H (CHB) nécessite un certain nombre d'onduleur en pont complet (pont en H) connectés en série. Chaque pont en H nécessite une source DC isolée, donc lorsque les niveaux de tension de sortie sont augmentés, des ponts en H supplémentaires et des sources DC indépendantes sont nécessaires. Une topologie en pont en H est illustrée dans la Figure II.21.

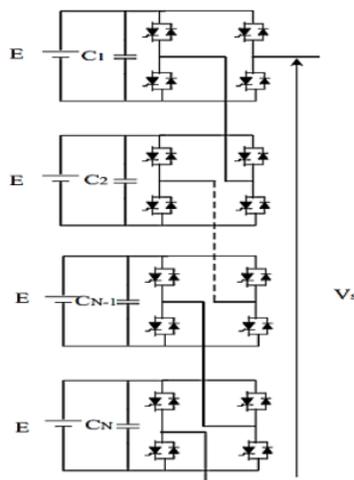


Figure II. 21 Onduleur en pont H en Cascade

II.6.5 Les Onduleurs Multicellulaires :

II.6.5.1 Onduleurs multicellulaires superposés SMC (Stacked Multicellular Converters):

L'onduleur multicellulaire superposé (SMC) est apparu au début des années 2000. Il est constitué de n étages. Chaque étage est formé par la connexion en série de P cellules de commutation séparées entre elles de $P-1$ condensateurs flottants (Figure II.22) [15] Un onduleur

multicellulaire superposé de n étages et de P cellules est noté SMC $P \times n$. Cet onduleur permet de générer $(P \times n) + 1$ niveaux.

Cette nouvelle topologie hybride permet de répartir les contraintes en tension de l'onduleur entre plusieurs cellules de commutation. Elle permet également de diviser la tension d'entrée en plusieurs fractions de manière à abaisser le nombre de commutation des semi-conducteurs de puissance. Comparativement aux topologies concurrentes dans ce domaine d'application, l'onduleur SMC a d'excellentes performances dynamiques grâce à la multiplication de la fréquence de tension découpée et l'augmentation du nombre de niveaux [16] [17]. De plus, cette topologie permet de réduire considérablement l'énergie stockée dans les condensateurs flottants par le convertisseur, ainsi que les pertes dans les semi-conducteurs de puissance [18]. La structure multicellulaire superposée peut être adaptée à toutes les configurations : montage en hacheur ou en onduleur.

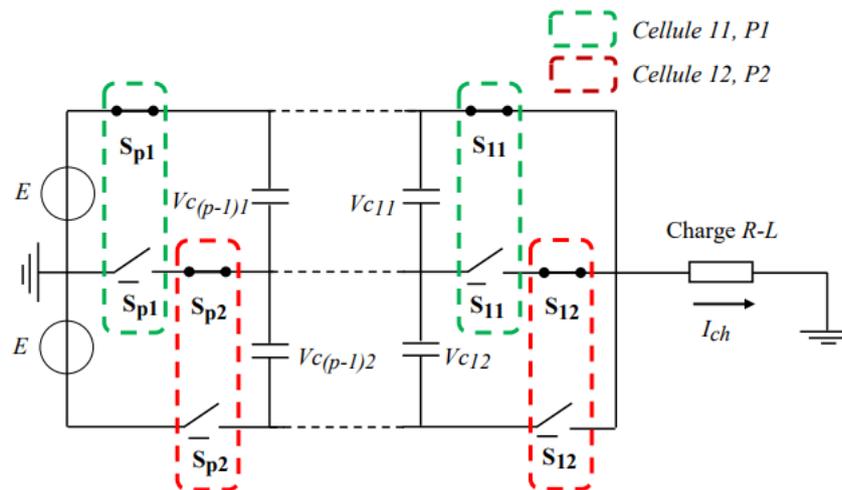


Figure II. 22 Onduleur multicellulaire superposé $P \times 2$.

II.6.5.2 Onduleurs multicellulaires parallèles PMC (Parallel Multicellular Converter) :

L'onduleur multicellulaire parallèle est apparu au début des années 1990. Cette structure repose sur une association de P cellules de commutation interconnectées par l'intermédiaire d'inductances indépendantes, appelées aussi inductances de liaison. Cette topologie permet de diminuer les contraintes en courant sur les interrupteurs d'électronique de puissance car chaque cellule est sous une contrainte qui est égale à IE/P puisque les cellules sont connectées en parallèle. La figure II.23 représente un onduleur multicellulaire parallèle de P cellules de commutation.

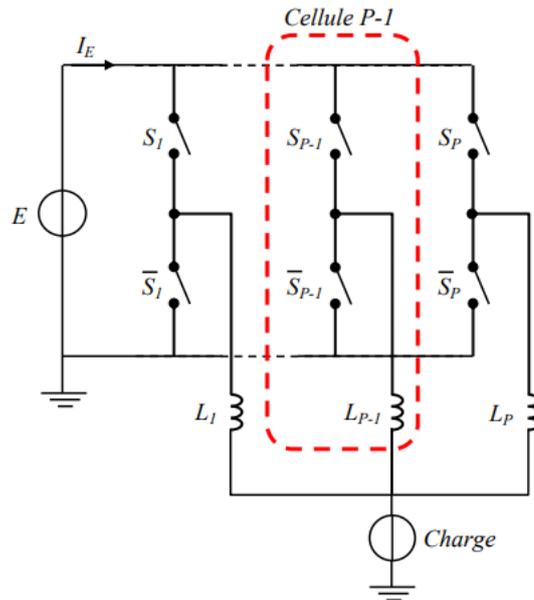


Figure II. 23 Onduleur multicellulaire parallèle à P cellules de commutation.

II.6.5.3 Onduleur multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters) :

Les onduleurs multicellulaires ont été imaginés dans le double but de générer une tension de sortie multiniveaux, et de réduire les contraintes en tension sur les composants de puissance [19]. La topologie présentée dans la figure II.24 représente une structure multicellulaire à P cellules de commutation séparées les unes des autres par (P-1) condensateurs flottants [20]. Cette structure peut être adaptée à toutes les configurations (montage en hacheur ou en onduleur, en demi-pont ou en pont complet) [21].

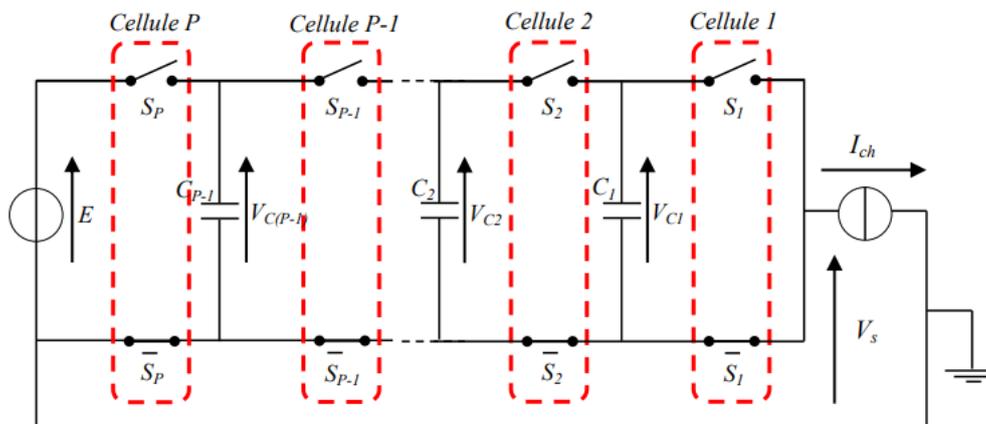


Figure II. 24 Bras d'ondeur multicellulaire à P cellules de commutation.

- **Principe de base d'un onduleur multicellulaire série [22]:**

Il est nécessaire, lors d'une association en série de composants semi-conducteurs, d'assurer une répartition équilibrée de la tension d'alimentation sur les différents interrupteurs. Si nous considérons deux interrupteurs de tenue en tension $E/2$ à la place d'un seul capable de supporter

E, il est nécessaire de faire en sorte que la tension appliquée sur ces interrupteurs soit équilibrée à $E/2$. Une solution consiste à insérer une source de tension, comme indiqué sur la figure II.25.

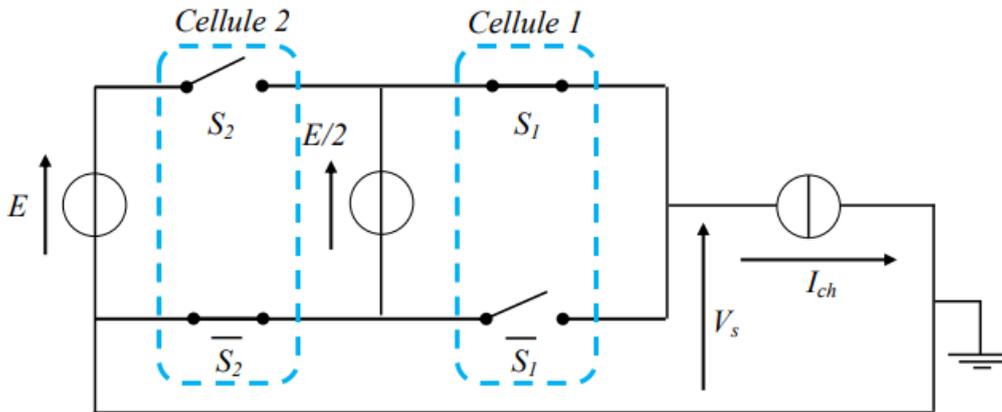


Figure II. 25 Bras d'un onduleur multicellulaire série à deux cellules de commutation.

Si la source de tension flottante délivre une tension égale à $E/2$, alors la répartition est équilibrée.

En effet, $V_{cell1} = E/2$, $V_{cell2} = (E - (E/2)) = E/2$. Ce type d'onduleur est facilement généralisable à P cellules de commutation (figure II.26).

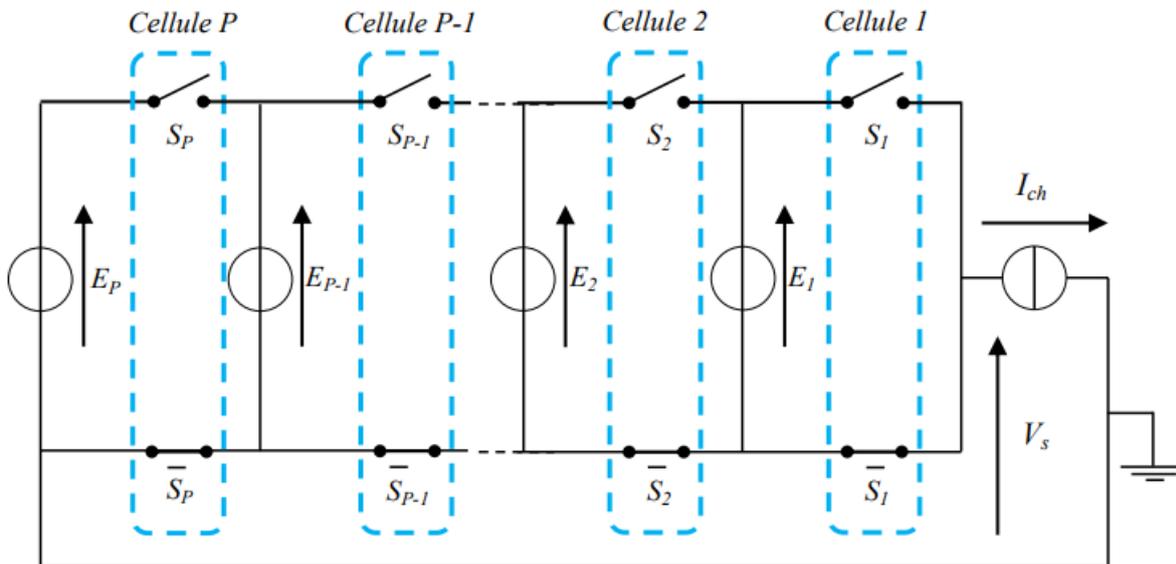


Figure II. 26 Bras d'onduleur multicellulaire série à P cellules de commutations.

L'onduleur est à P cellules. Chaque cellule est constituée de deux interrupteurs et d'une source de tension.

Les interrupteurs fonctionnent de façon complémentaire : quand l'un est passant l'autre est bloqué. La fonction de chaque cellule i est représentée par S_i . Le S_i sera également appelé état de la cellule i. La tension de sortie est notée V_s .

La commande par les S_i donne 2^P configurations différentes. La tension en régime permanent est de (P+ 1) niveaux.

Les grandeurs caractéristiques de l'association de P cellules de commutation sont définies dans le tableau II.3 :

Nombre de cellules associées	P
Nombre de condensateurs associés	P-1
Nombre d'états possibles	2^P
Nombre de niveaux de tension en sortie	P+1
Valeur de la tension principale d'alimentation	E
Valeur de la source de tension de la cellule i	$V_{Ci} = (i/p)E$

Tableau II.3

II.6.6 Comparaison des onduleurs multiniveaux

Topologie	Difficulté de commande	Complexité de commande	tolérance aux pannes	Modularité
NPC	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne
CHB	Élevée	Élevée	Élevée	Faible
FCC	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible
FCMC	Élevée	Élevée	Élevée	Élevée

Tableau II.4

II.7 Modélisation d'onduleur multicellulaire série [22]

La modélisation est une étape très importante pour étudier le comportement d'un système complexe. Pour un convertisseur statique, cette étape permet de mettre en évidence les variables continues et discontinues du système, afin de proposer une commande permettant le contrôle des différents paramètres. Il existe, essentiellement, quatre modèles différents pour modéliser un onduleur multicellulaire. Le choix du modèle est lié à l'objectif visé et le type de commande utilisée. Ces modèles sont :

- Le modèle aux valeurs instantanées.
- Le modèle aux valeurs moyennes.
- Le modèle harmonique.
- Le modèle hybride.

Dans notre recherche nous sommes intéressés par le modèle aux valeurs moyennes

II.7.1 Modèle aux valeurs moyennes

Le modèle aux valeurs moyennes utilise le rapport cyclique u_i comme seule information concernant la cellule de commutation, le déphasage ϕ du signal de commande n'étant pas pris en compte. Ceci implique que le modèle moyen ne permet pas de mettre en évidence les phénomènes harmoniques donc le phénomène d'équilibrage naturel en boucle ouverte propre à l'onduleur multicellulaire

II.7.1.1 Hypothèses :

Les hypothèses retenues pour la mise en œuvre du modèle aux valeurs moyennes d'un convertisseur multicellulaire sont :

- Les interrupteurs sont idéaux (tension de saturation, courant de fuite, temps morts et temps de commutation nuls).

- Les interrupteurs d'une même cellule de commutation fonctionnent de façons complémentaires.
- Les valeurs des condensateurs flottants C_i sont telles que les tensions à leurs bornes V_{C_i} sont constantes sur une période de découpage.
- Le courant de charge I_{ch} est constant sur une période de découpage et correspond à la valeur moyenne de celui-ci sur cette même période.
- La tension d'alimentation E est constante.

II.7.1.2 Modèle moyen d'un bras multicellulaire

Nous rappelons à la figure II.27 la structure d'un bras multicellulaire

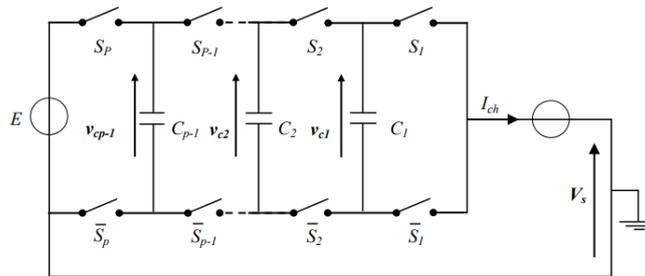


Figure II. 27 Structure d'un bras multicellulaire p-cellules

L'étude du comportement de la cellule de commutation i nous permet de mettre en évidence l'obtention du modèle moyen. L'interrupteur S_i de la cellule i est pilotée par le signal de commande s_i de fréquence de découpage f_d . Cet interrupteur est à l'état passant pendant la durée $u_i \cdot T_d$ et à l'état bloqué pendant $[1 - u_i] \cdot T_d$. Nous obtenons ainsi, à la figure II.28, les formes d'ondes de la tension S_i V aux bornes de l'interrupteur \bar{S}_i et du courant S_i i circulant dans l'interrupteur S_i :

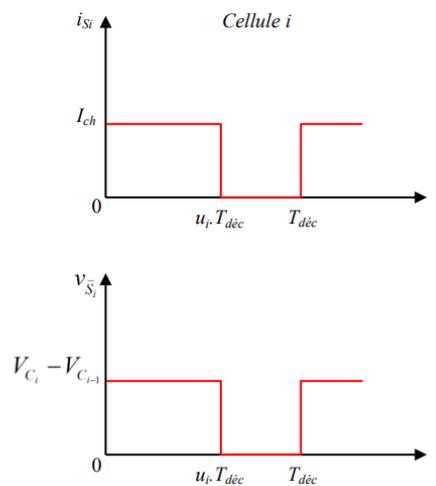


Figure II. 28 Evolution des grandeurs électriques au sein d'une cellule i .

- Pendant $(u_i \cdot T_{dec})$

$$\begin{cases} S_i = \text{ON}, \bar{S}_i = \text{OFF} \\ v_{\bar{S}_i} = V_{C_i} - V_{C_{i-1}} \text{ et } i_{S_i} = i_{ch} \end{cases} \quad \text{II-1}$$

Pendant $([1-u_i] \cdot T_{dec})$:

$$\begin{cases} S_i = \text{OFF}, \bar{S}_i = \text{ON} \\ v_{\bar{S}_i} = 0 \text{ et } i_{S_i} = 0 \end{cases} \quad \text{II-2}$$

Les valeurs moyennes du courant circulant dans l'interrupteur S_i et de la tension aux bornes de l'interrupteur S_i s'expriment par :

$$\begin{aligned} V_{S_i}^- &= \frac{1}{T_{decc}} \int_0^{T_{dicc}} v_{S_i}^- dt = u_i \cdot [V_{C_i} - V_{C_{i-1}}] \\ I_{S_i} &= \frac{1}{T_{de\bar{c}}} \int_0^{T_{decc}} i_{S_i} dt = u_i \cdot I_{ch} \end{aligned} \quad \text{II-3}$$

Ainsi, chaque interrupteur S_i peut être représenté par une source de tension de valeur $u_i \cdot [V_{C_i} - V_{C_{i-1}}]$ et chaque interrupteur S_i peut être représenté par une source de courant de valeur $u_i \cdot I_{ch}$. Ces observations nous permettent de définir le schéma équivalent moyen d'un bras multicellulaire (figure II.29)

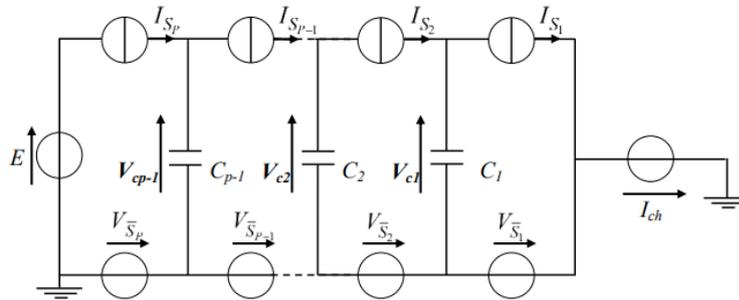


Figure II. 29 Représentation du modèle moyen d'un bras multicellulaire

L'expression de la tension de sortie moyenne du bras multicellulaire V_s est obtenue en faisant la somme des tensions moyennes $S_i V$:

$$V_s = \sum_{i=1}^p V_{S_i}^- = \sum_{i=1}^p u_i \cdot [V_{C_i} - V_{C_{i-1}}] \quad \text{II-4}$$

Où $V_{C_0} = 0$ et $V_{C_p} = E$.

Dans le cas où les rapports cycliques u_i sont identiques sur toutes les cellules et les tensions condensateurs V_{C_i} égales à $i \cdot E/p$, la tension de sortie moyenne V_s est égale à $u_i \cdot E$. La connaissance des courants moyens parcourant les interrupteurs de deux cellules adjacentes de commutation (cellules $i+1$ et i) nous permet de connaître le courant moyen parcourant le condensateur C_i :

$$I_{C_i} = I_{S_{i+1}} - I_{S_i} = [u_{i+1} - u_i] \cdot I_{ch} \quad \text{II-5}$$

A partir de l'équation de I_{C_i} , nous obtenons l'équation régissant l'évolution de la tension moyenne V_{C_i} aux bornes des condensateurs :

$$\frac{d}{dt} v_{C_i} = \frac{1}{C_i} \cdot I_{C_i} = \frac{1}{C_i} \cdot [u_{i+1} - u_i] \cdot I_{ch} \quad \text{II-6}$$

Il est possible d'écrire l'équation (II-7) en prenant en compte non plus les rapports cycliques u_i mais leur différence :

$$\alpha_i = u_{i+1} - u_i \quad \text{II-8}$$

En effet, ce sont ces différences qui nous permettent de connaître l'évolution des tensions aux bornes des condensateurs flottants :

$$\frac{d}{dt} V_{C_i} = \frac{I_{ch}}{C_i} \cdot \alpha_i \quad \text{II-9}$$

En écrivant l'équation (II.4) en fonction des grandeurs α_i , la tension de sortie du bras multicellulaire V_s devient :

$$V_s = -\sum_{i=1}^{p-1} \alpha_i \cdot V_{C_i} + u_i \cdot E \quad \text{II-10}$$

Si la charge est connectée entre le point bas de la source de tension E et la cellule de commutation 1, la tension aux bornes de la charge V_{ch} est égale à la tension de sortie du bras V_s . De plus, si la charge est de type R-L, la relation liant les grandeurs de sortie s'écrit

$$V_{ch} = V_s = R_{ch} \cdot I_{ch} + L_{ch} \frac{d}{dt} I_{ch} \quad \text{II-11}$$

Nous pouvons, à partir des équations (II.9) et (II.10), déterminer l'équation d'état représentant l'évolution du courant de charge I_{ch} en fonction des grandeurs d'état V_{C_i} , des grandeurs de commande α_i , de la tension d'alimentation E et des paramètres de la charge :

$$\frac{d}{dt} I_{ch} = -\sum_{i=1}^{p-1} \frac{\alpha_i}{L_{ch}} V_{C_i} + \frac{u_p}{L_{ch}} E - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} I_{ch} \quad \text{II-12}$$

Les équations régissant les évolutions des tensions condensateurs (II.8) et l'évolution du courant de charge (II.11) permettent de définir un système d'état d'ordre P composé de :

- $P-1$ équations représentant les évolutions des tensions aux bornes des condensateurs.
- Une équation représentant l'évolution du courant de charge, celle-ci étant de type R-L. Ce système est de la forme :

$$\dot{x} = A_1(x) + B_1(x)u$$

$$x = [V_{C_1}, V_{C_2}, \dots, V_{C_{p-1}}, I_{ch}]^T \quad U = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{p-1}, u_p]^T$$

Où : X représente le vecteur d'état et U le vecteur de commande. Les matrices A et B qui sont de dimension $P \times P$, sont définies comme suit :

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} \end{pmatrix}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} \frac{I_{ch}}{C_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \frac{I_{ch}}{C_{p-2}} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{I_{ch}}{C_{p-1}} & 0 \\ -\frac{V_{C_1}}{L_{ch}} & \dots & -\frac{V_{C_{(p-2)}}}{L_{ch}} & -\frac{V_{C_{(p-1)}}}{L_{ch}} & \frac{E}{L_{ch}} \end{pmatrix}$$

II.8 Les stratégies de commande des onduleurs multicellulaires :

L'objectif principal de techniques de commande, appliquées aux onduleurs, est de permettre l'obtention d'ondes de tension alternatives, d'amplitude et de fréquence fondamentale réglables, en éliminant ou en repoussant le plus loin possible les composantes harmoniques parasites résultant du découpage. Quelle que soit la forme de l'onde alternative recherchée (le plus souvent sinusoïdale), l'établissement de la stratégie de commande devra, prendre en compte la façon dont ces techniques vont pouvoir s'insérer dans les boucles de contrôle et de régulation qui sont obligatoirement présentes dans toutes les applications des onduleurs. [23] nous allons présenter plusieurs techniques de contrôle pour commander l'onduleur multicellulaire série. Chaque loi de commande va être évaluée selon des critères tels que la stabilité, la rapidité, et la précision.

II.8.1 Commande en boucle ouverte :

L'onduleur multicellulaire série est dit commandé en boucle ouverte lorsqu'aucune boucle de retour ne vient réguler les variables d'état du système [20]. Il existe plusieurs techniques afin d'obtenir la tension finale désirée tel que :

- Commande symétrique
- Commande décalée
- Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion)
- Commande MLI vectorielle
- Commande MLI précalculée
- Commande MLI aléatoire
- Elimination des harmoniques sélectifs

Dans ce qui suit, nous allons utiliser la MLI-ST (Modulation de Largeur d'Impulsion de type Sinus- Triangle) comme commande en boucle ouverte. Il faut noter que le courant de sortie d'onduleur et les tensions aux bornes des condensateurs flottants restent sans régulation.

II.8.1.1 Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) :

La commande par MLI consiste à découper la tension de sortie générée par l'onduleur en une série de motifs élémentaires de période très faible, et de rapport cyclique variable dans le temps [20]. Dans le cas de la MLI naturelle, les signaux de commande de chaque cellule S_i , sont obtenus en faisant l'intersection entre une porteuse triangulaire et un signal modulant, dit signal

de référence (constant dans le cas d'un hacheur et sinusoïdal dans le cas d'un onduleur), comme indiqué sur la figure II.30.

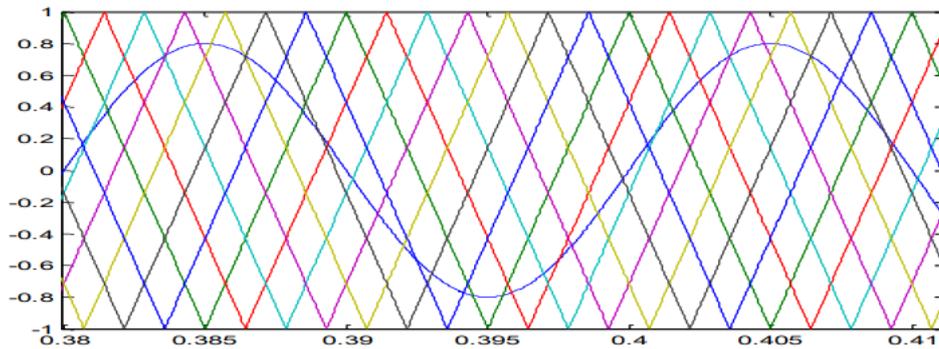


Figure II. 30 Principe de la MLI-ST pour un onduleur multicellulaire série.

La commande MLI utilise P porteuses triangulaires pour commander les P cellules de commutation d'un onduleur multicellulaire série. De plus, ces porteuses sont toutes régulièrement déphasées entre elles de $2\pi/P$: la porteuse n°2 est en retard de $2\pi/P$ par rapport à la porteuse n°1. La porteuse n°3 est en retard de $(3-1).2\pi/P$ par rapport à la porteuse n°1, ... jusqu'à la porteuse P qui aura un déphasage de $(P-1).2\pi/P$ par rapport à la porteuse n°1. Ce déphasage régulier des porteuses les unes par rapport aux autres est utile pour deux raisons [24]:

- D'une part, il permet à la tension multiniveau de sortie d'atteindre ses niveaux intermédiaires. En effet, si toutes les porteuses étaient en phase, toutes les cellules commuteraient en même temps et seraient dans le même état de conduction. La tension de sortie n'atteindrait alors que ses valeurs extrêmes.
- D'autre part, le déphasage régulier permet aussi de multiplier la fréquence apparente de découpage de la tension de sortie : Dans le cas d'un convertisseur à P cellules, si l'on note f_{dec} la fréquence de découpage de chaque interrupteur, et T_{dec} la période correspondante, alors le déphasage régulier des P porteuses triangulaires permet d'obtenir une tension multiniveau de sortie dont chaque motif élémentaire a une durée T_{dec}/P . Autrement dit, la fréquence apparente de découpage de la tension de sortie vaut $P.f_{dec}$.

Les équations permettant de générer les signaux triangulaires notés Tr_i évoluant sur l'intervalle $[0,1]$ sont [25]:

$$Tr_1 = \frac{2}{\pi} \arcsin(\cos(2\pi \cdot f_{dec} \cdot t)) \quad II-13$$

$$Tr_2 = \frac{2}{\pi} \arcsin(\cos(2\pi \cdot f_{dec} \cdot t - \frac{2\pi}{P}))$$

.

.

$$Tr_P = \frac{2}{\pi} \arcsin(\cos(2\pi \cdot f_{dec} \cdot t - (P-1) \frac{2\pi}{P}))$$

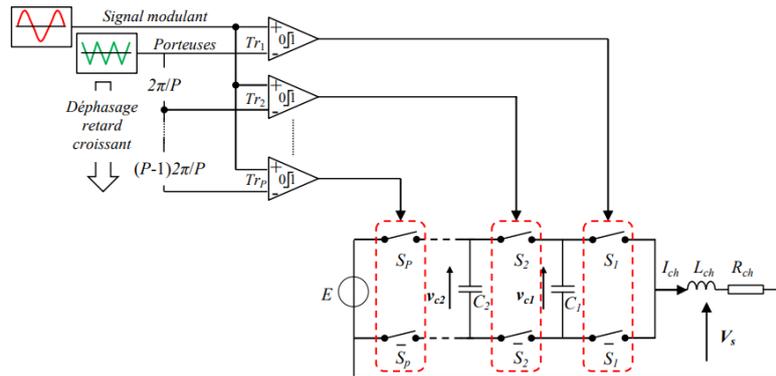


Figure II. 31 Commande en boucle ouverte par MLI-ST d'un onduleur multicellulaire série.

II.8.1.1.1 Les paramètres de performance :

Afin de comparer les résultats de différentes méthodes MLI, plusieurs indices de performance sont définis en fonction de l'analyse de fréquence :

- **Taux de modulation :**

La largeur d'impulsion de technique MLI sinus-triangle dépend au ratio de signal de référence au signal triangulaire porteuse il est défini comme [26]:

$$M_a = \frac{A_r}{A_p} \quad II-14$$

Avec :

- A_r : Amplitude de signal de référence
- A_p : Amplitude de signal de la porteuse (triangulaire)

On peut exprimer l'amplitude d'harmonique fondamentale de tension simple d'un onduleur [27]:

$$V_{AN1} = M_a \times \frac{A_r}{A_p} \quad II-15$$

- **Indice de modulation :**

La fréquence du signal de porteuse triangulaire est généralement considérablement supérieure à la fréquence du signal de modulation. Le rapport de et est un paramètre très important de l'efficacité de la modulation il est aussi désigné « coefficient de réglage ».

$$M_f = \frac{f_p}{f_r} \quad II-16$$

Pour les petites valeurs de M_f , les signaux porteurs et référence doivent être synchronisés, afin d'éliminer les subharmoniques indésirables dans la tension de sortie. Si ces signaux sont synchronisés, M_f est un nombre entier. La valeur de M_f dépend de la fréquence du signal de référence et affecte de manière significative la performance de l'onduleur. En augmentant la fréquence, les pertes de commutation dans l'onduleur augmentent, mais le spectre de tension de sortie est amélioré et il est plus facile de filtrer les harmoniques de haute fréquence produit à

cause de la modulation. Lors du choix de f_p , la tension, la puissance et d'autres paramètres doivent être prises en compte. Par conséquent, la sélection de M_f est un problème d'optimisation aux multiples facteurs. La tendance générale est qu'on choisit une valeur supérieure de M_f pour les onduleurs de faible puissance et faible tension et vice versa.

- **Taux de distorsion harmonique totale (THD) :**

$$THD\% = \frac{100}{Q_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (Q_n)^2} \quad II-17$$

- Q_n : valeur efficace de l'harmonique au rang n de courant/tension.
- Q_1 : composante principale. Les résultats de ce coefficient dépendent du nombre d'harmoniques considérés dans le calcul. C'est une bonne pratique de considérer un certain nombre d'harmoniques plusieurs fois plus grand que la fréquence de commutation.
-

II.8.2 Commande en boucle fermée :

Les commandes en boucle fermée sont divisées en deux grandes catégories :

- **les commandes en durée :**

Une stratégie de commande est dite « en durée » lorsque les grandeurs commandant le convertisseur sont les durées de conduction des semi-conducteurs, autrement dit, les valeurs des rapports cycliques. Il existe trois types de commande en durée

- La commande linéaire par modulation des rapports cycliques
- La commande découplante avec retour d'état non linéaire
- La commande SVM (Space Vector Modulation).

- **les commandes en amplitude :** Elle regroupe toutes les commandes pour les quelles l'état des interrupteurs est défini directement en fonction des grandeurs essentielles du convertisseur. Typiquement, toutes les commandes par fourchette (de courant, et autres), ainsi que les commandes de la valeur crête sont des commandes en amplitude (Nous allons intéresser dans notre travail par la commande en durée)

II.8.2.1 Théorie de la commande linéaire par modulation des rapports cycliques [22]:

La commande linéaire par modulation des rapports cycliques permet uniquement la régulation des tensions générées par les condensateurs. Dans un onduleur multicellulaire le courant moyen traversant le condensateur C_i est proportionnel à la différence de rapports cycliques entre les deux cellules adjacentes. Cette remarque-là représente la base autour de laquelle la commande linéaire par modulation des rapports cycliques est bâtit [25]

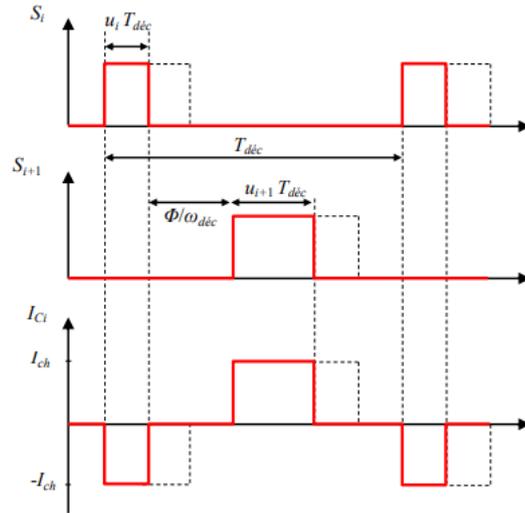


Figure II. 32 Formes d’ondes obtenues à l’échelle de la période de découpage.

D’après la figure II. 33, nous remarquons que si les rapports cycliques des cellules $i+1$ et i sont différents, le courant moyen I_{Ci} qui traverse le condensateur C_i n’est pas nul et, par conséquent, la tension V_{Ci} évolue [25]

Lorsqu’un déséquilibre apparaît sur une tension condensateur V_{Ci} , le courant moyen I_{Ci} qui traverse le condensateur pendant une période de découpage T_{dec} est telle que la tension V_{Ci} tend vers sa valeur d’équilibre. La variation de la tension condensateur ΔV_{Ci} s’obtient alors par la relation (II-18).

$$\Delta V_{Ci} = V_{Ci}(t + T_{dec}) - V_{Ci}(t) = \frac{i \cdot E}{P} - V_{Ci} = \frac{I_{Ci} \cdot T_{dec}}{C_i} \quad II-18$$

Récrivons l’équation (II-19) en remplaçant le courant I_{Ci} par le courant de charge I_{ch} et les rapports cycliques u_{i+1} , u_i (en sachant que : $I_{Ci} = I_{ch} \cdot [u_{i+1} - u_i]$):

$$\Delta V_{Ci} = \frac{T_{dec}}{C_i} \cdot I_{ch} [u_{i+1} - u_i] = \frac{T_{dec}}{C_i} \cdot I_{ch} \cdot \alpha_i \quad II-20$$

Où : α_i représente la différence entre les rapports cycliques u_{i+1} et u_i .

A partir de l’équation (II-19), nous pouvons calculer la grandeur de commande α_i (équation II-20).

$$\alpha_i = \frac{C_i}{T_{dec} \cdot I_{ch}} \cdot \Delta V_{Ci} = \frac{C_i}{T_{dec} \cdot I_{ch}} \cdot \left[\frac{i \cdot E}{P} - V_{Ci} \right] \quad II-21$$

L’existence de P cellules de commutation à contrôler, signifie que P grandeurs de commande u_i seraient utilisées. Cela est avantageux, car, il n’existe que $(P-1)$ tensions condensateurs à contrôler. La grandeur de commande supplémentaire u_p va être choisie constante de manière à ce que les tensions V_{Ci} suivent leurs références. La grandeur u_p étant choisie comme la grandeur de commande supplémentaire, il ne reste maintenant qu’à trouver les $(P-1)$ rapports cycliques en utilisant l’équation (II-21).

$$u_i = u_{i+1} - \alpha_i \quad II-22$$

A partir de l'équation (II-20), nous pouvons constater qu'une saturation des grandeurs de commande (rapports cycliques) entraîne la perte du contrôle des grandeurs électriques. Pour cela, un gain qu'on notera G va être ajouté à l'équation (II-20). Il est dimensionné judicieusement pour assurer un double rôle. D'une part, il veille à éliminer la saturation des grandeurs de commande. D'autre part, il accélère la dynamique d'équilibrage des tensions des condensateurs flottants au démarrage du convertisseur. Donc, La loi de commande peut être synthétisée comme suit :

$$u_p = u_{ref} \quad II-23$$

$$u_i = u_{i+1} - G \cdot \frac{C_i}{T_{déc} \cdot I_{ch}} \cdot \left[\frac{i \cdot E}{p} - V_{C_i} \right]$$

Où : i varie de 1 à $P-1$ et u_{ref} représente le rapport cyclique de référence permettant de définir le point de fonctionnement.

A partir de l'équation (II-23), nous constatons que les rapports cycliques sont égaux si et seulement si la différence $C_i (i \cdot E / P) - V$ est nulle (où : $C_i V_{C_i} (i \cdot E / P) - V = \varepsilon$ représente l'erreur existante sur la tension V_{C_i}).

$$u_1 = u_2 = \dots = u_p = u_{ref} \quad II-24$$

En considérant que le courant peut être représenté par sa valeur moyenne sur une période de découpage, il est possible de définir, dans le domaine fréquentiel, une boucle de contrôle propre à chaque condensateur (figure II.33).

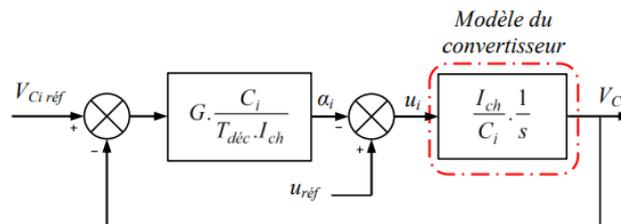


Figure II. 34 Boucle de régulation de la tension condensateur V_{C_i} .

A partir de la figure II.33, nous pouvons calculer facilement la fonction de transfert entre V_{C_i} et $V_{C_{i\text{réf}}}$. Elle est de premier ordre (équation II-24).

$$\frac{V_{C_i}}{V_{C_{i\text{réf}}}} = \frac{1}{1 + \tau s} \quad II-25$$

Où : s représente la variable de Laplace.

- $\tau = G / T_{déc}$ représente la constante du temps.

D'après l'équation (II-22), nous remarquons que le choix d'un gain G important permet de diminuer la constante de temps du système en boucle fermée. Mais, la moindre perturbation au niveau de la tension d'alimentation peut entraîner la saturation des rapports cycliques. Alors, le gain G doit être dimensionné pour assurer un fonctionnement optimal du convertisseur pendant le démarrage qui est la phase la plus critique. Le choix du gain G s'effectue en considérant que :

- La tension d'alimentation est égale à sa valeur de référence E .

- Les condensateurs C_i sont déchargés au démarrage du convertisseur.
- Un rapport cyclique définit le point de fonctionnement (courant de charge). A l'instant initial, les erreurs sur les tensions aux bornes des condensateurs V_{Ci} ε sont maximales et égales à :

$$\varepsilon_{V_{ci}} = i \cdot \frac{E}{P} \quad II-26$$

Le rapport cyclique u_{pinit} égal à $u_{réf}$ permet de définir les grandeurs u_{1init} par les relations de récurrence :

$$\begin{aligned} u_{pinit} &= u_{réf} & II-27 \\ u_{p-1init} &= u_{pinit} - \alpha_{p-1init} = u_{réf} - (P-1) \cdot \frac{G \cdot C_i}{T_{déc} \cdot I_{ch}} \cdot \frac{E}{P} \\ u_{1init} &= u_{réf} - \alpha_{1init} = u_{réf} - \frac{P(P-1)}{2} \cdot \frac{G \cdot C_i}{T_{déc} \cdot I_{ch}} \cdot \frac{E}{P} \end{aligned}$$

Ces équations impliquent que les rapports cycliques u_{1init} seront toujours inférieurs à la valeur de référence $u_{réf}$ dans le cas d'un démarrage :

$$u_{réf} > u_{p-1init} > u_{p-2init} > \dots > u_{1init} \geq 0 \quad II-28$$

Le gain G est donc calculé tel que $u_{1init} = 0$, sachant que $I_{chréf} = (E \cdot R_{ch}) / (2R_{ch})$

$$G = \frac{2T_{déc}}{(P-1) \cdot C_i \cdot R_{ch}} \cdot u_{réf}^2 \quad II-29$$

La constante de temps caractérisant l'évolution en boucle fermée des tensions condensateurs s'exprime alors par :

$$\tau = \frac{T_{dec}}{G} = \frac{(P-1) \cdot C_i \cdot R_{ch}}{2} \cdot \frac{1}{u_{réf}^2} \quad II-29$$

Cette première expression montre que la constante de temps tend vers l'infini pour $R_{ch} = \infty$ ou $u_{réf} = 0$. A partir de cette expression, il est alors possible de définir une relation liant la constante de temps τ à la période de découpage $T_{déc}$ et au rapport cyclique $u_{réf}$. Pour cela, nous considérons que le condensateur C_i est dimensionné en fonction de l'ondulation de tension maximale à ses bornes ΔV_{Ci} :

$$C_i = \frac{T_{déc} \cdot I_{ch}}{P \Delta V_{ci}} \quad II-30$$

En prenant en compte cette expression dans l'équation (II-29) et en supposant que l'ondulation ΔV_{Ci} est fixée à 10% de E/P (E/P correspond à la valeur d'équilibre des tensions interrupteurs), la constante de temps devient :

$$\tau = \frac{P-1}{0.2 \cdot U_{réf}} \cdot T_{déc} \quad II-31$$

A partir de l'équation (II.31), on peut conclure que τ diminue lorsque le rapport cyclique augmente. Le gain G de l'équation (II-28) a été calculé afin d'assurer une dynamique d'équilibrage importante dans la phase de démarrage. En ce qui concerne le courant de charge

I_{ch} , celui-ci n'étant pas régulé, il subit directement les variations de la tension d'alimentation comme le montre l'équation suivante (pour un onduleur) :

$$I_{ch} = \frac{U_{réf} \cdot E}{2R_{ch}} \quad II-32$$

Remarquons que cette commande nécessite P+1 capteurs isolés mesurant les tensions flottantes V_{C1} , V_{C2} , ..., V_{CP-1} , la tension de bus continu (E) et le courant de charge I_{ch} .

II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types d'onduleurs de puissances utilisés et les différentes topologies des onduleurs multiniveaux de type multicellulaire série. Nous avons constaté que l'utilisation de ce type d'onduleur permet de générer des tensions proches de la forme sinusoïdal et utilisent un plus grand nombre de cellules de commutation, ce qui permet de réduire la tension de commutation par cellule. Cela réduit les contraintes sur les composants électroniques et améliore l'efficacité globale du système

Les onduleurs multicellulaires peuvent continuer à fonctionner même en cas de défaillance d'une cellule individuelle. Cela augmente la fiabilité globale du système et réduit les temps d'arrêt.

Chapitre III: Simulation des onduleurs multicellulaires série

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation des onduleurs multicellulaires à 2 et 4 cellules en utilisant MLI-ST, et présenter les résultats de la simulation pour chaque onduleur. Nous allons analyser la forme d'onde de tension de sortie pour chaque onduleur, en présentant à la fois la tension simple et la tension composée afin de comparer les performances de chaque onduleur.

III.2 Simulation des onduleurs de tension :

III.2.1 Onduleur multicellulaire série à 2 cellules :

III.2.1.1 Structure :

La structure de l'onduleur multicellulaire en série à 2 cellules, consiste en deux cellules d'onduleur connectées en série. Chaque cellule de commutation est constituée de deux interrupteurs bidirectionnels (IGBT) et de deux diodes de roue libre. Les cellules de commutation sont connectées en série pour former l'onduleur multicellulaire.

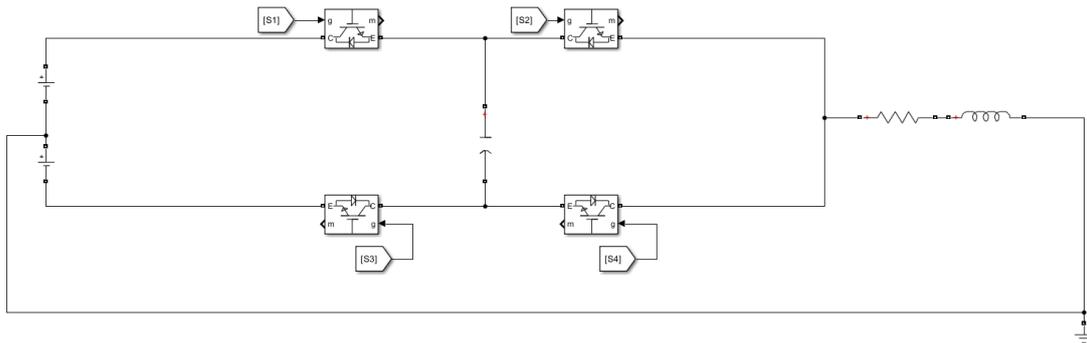


Figure III. 1 Structure d'un bras d'onduleur à 2 cellules

III.2.1.2 Séquences de fonctionnement :

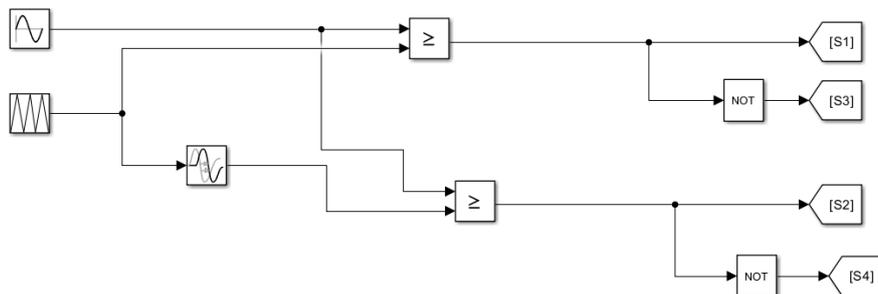


Figure III. 2 Structure de la commande MLI à 2 porteeses

Pour la simulation on a les paramètres de commande MLI :

Pour cette technique, deux porteeses sont utilisée avec un signal de référence d'amplitude de $A_r=1$ et de fréquence de $f_r = 50\text{Hz}$ pour générer la commande de chaque phase. On fixe les paramètres de porteeses comme suit et on varie seulement sa fréquence f_p :

Amplitude : $A_p = 1$, La séquence de commande porteeses : $[-1 \ 1 \ -1]$

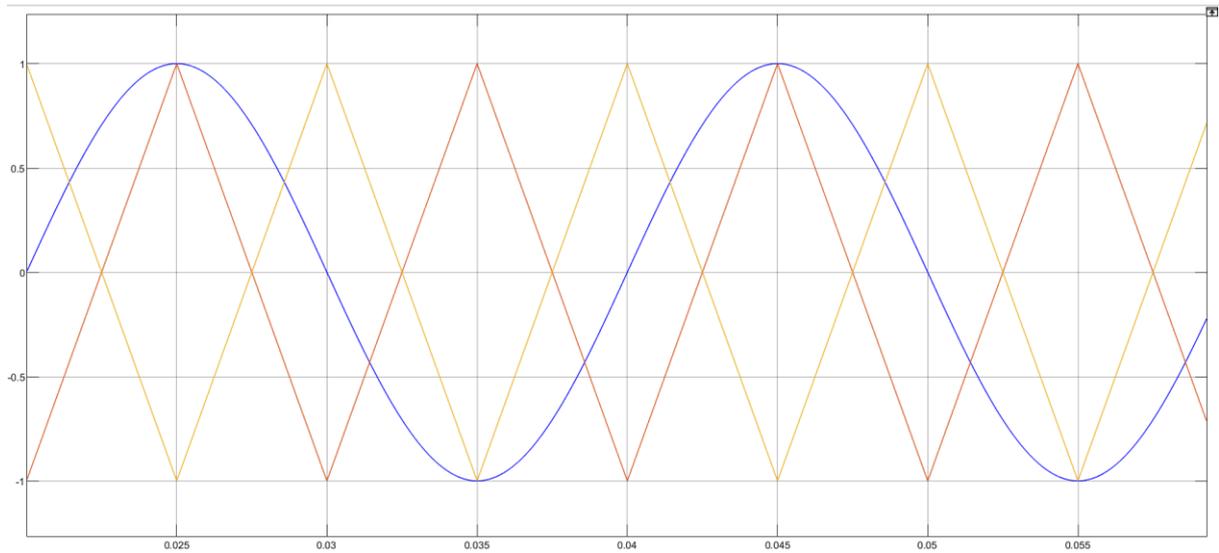


Figure III. 3 Signale de référence et porteuses

Etat	S_1	S_2	V_s
1	0	0	-E
2	0	1	0
3	1	0	0
4	1	1	E

Tableau III.1

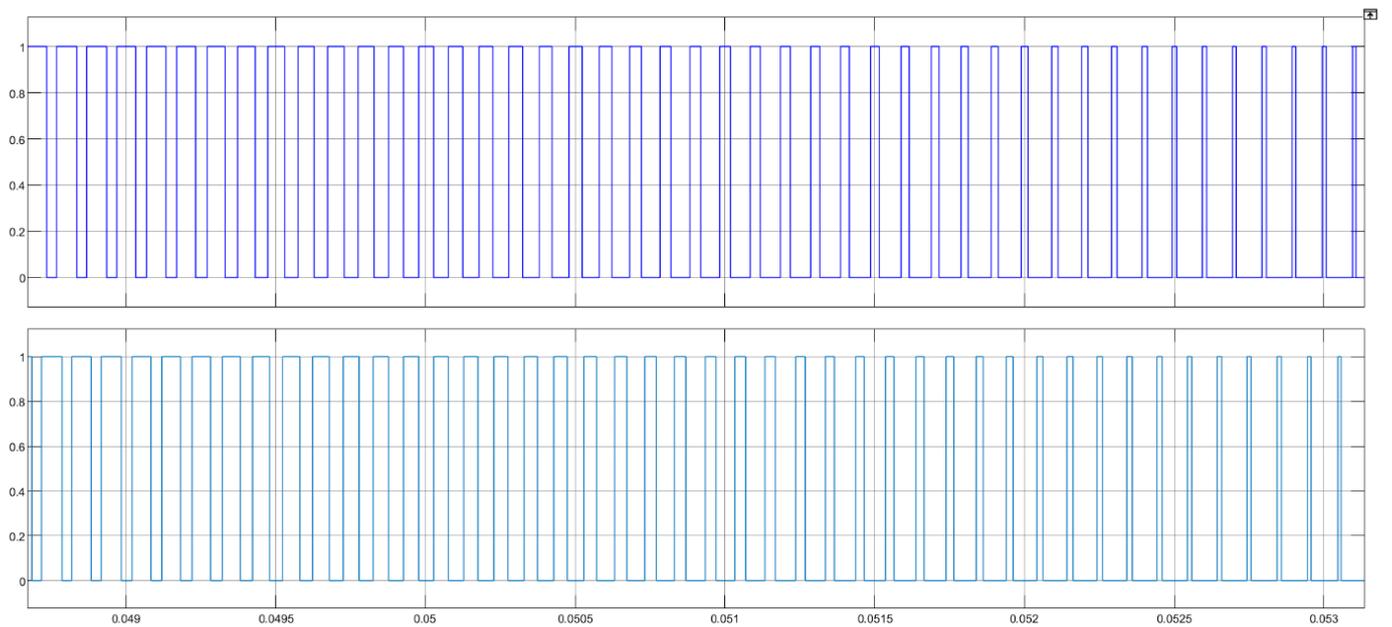


Figure III. 4 Signal de commande des interrupteurs supérieurs.

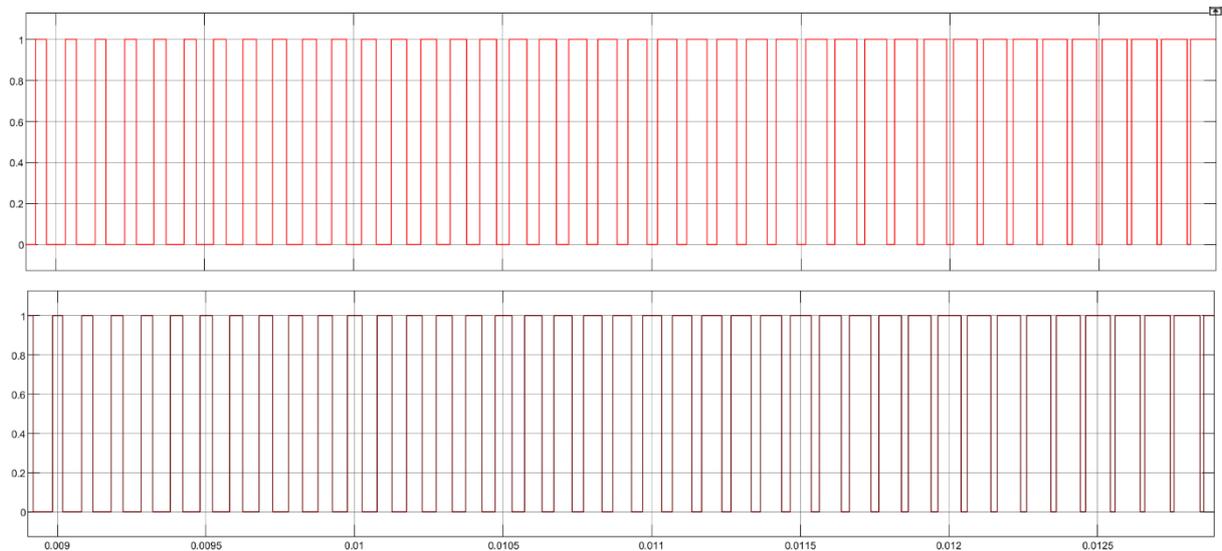


Figure III. 5 Signal de commande des interrupteurs inférieurs.

III.2.1.3 Simulation d'onduleur multicellulaire a 2 cellules et les résultats obtenus :

R	L	C	E	f_r
6 ohm	2.8mH	1 μ F	405V	50hz

Tableau III.2

- 1er Cas :

$M_f=100$

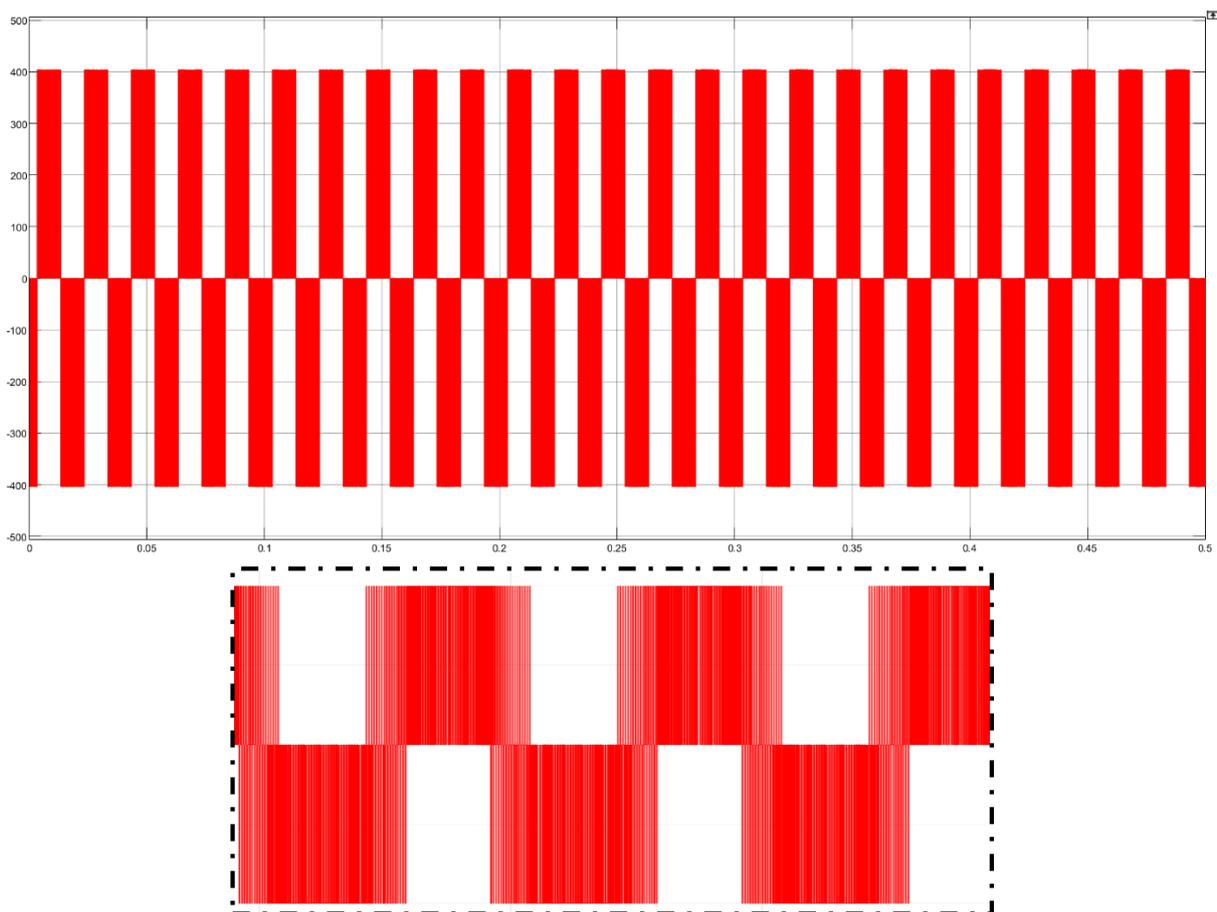


Figure III. 6 Tension simple à 5KHz

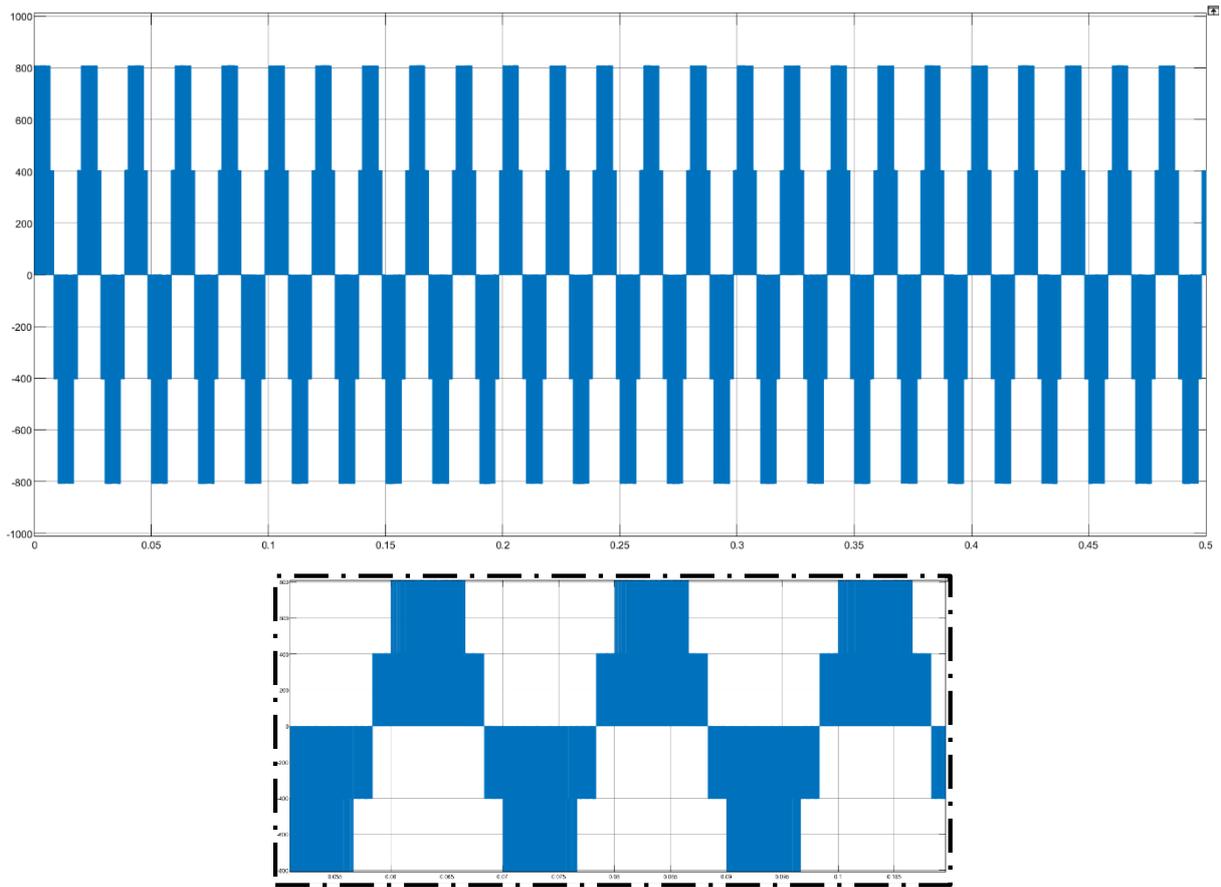


Figure III. 7 Tension composée à 5KHz

- 2eme cas :

$M_f = 200$

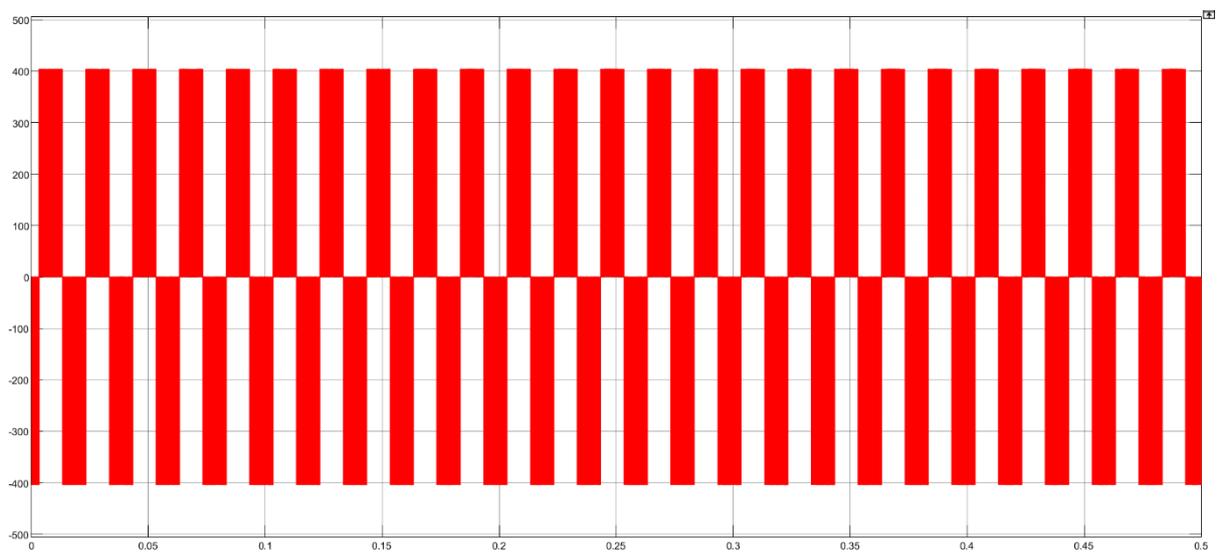


Figure III. 8 Tension simple à 10KHz

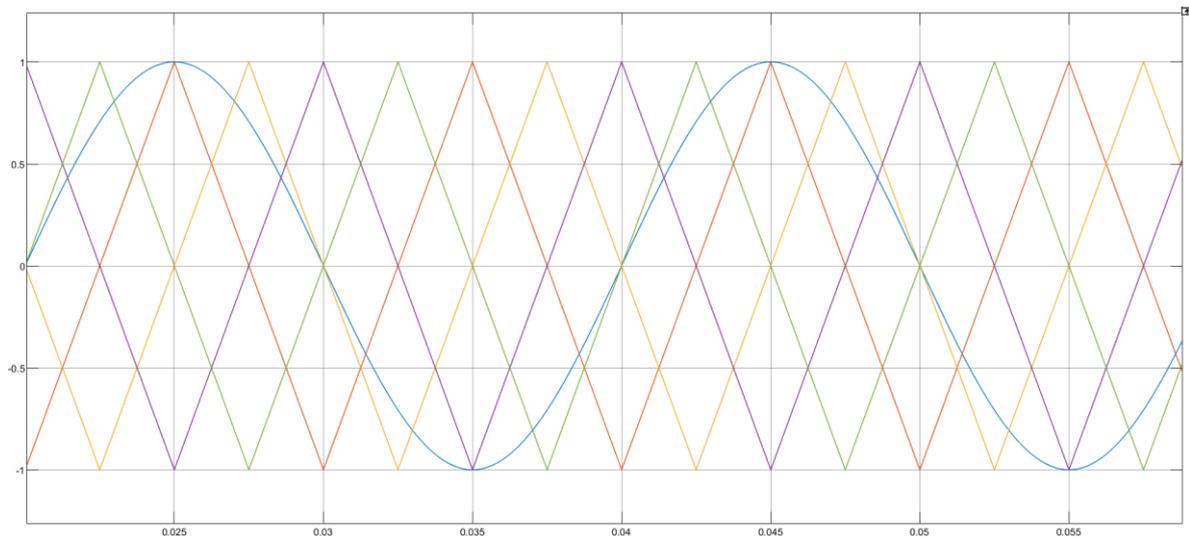


Figure III. 11 Signales de référence et porteuses

Etat	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	V _s
1	0	0	0	0	-E
2	0	0	0	1	-E/2
3	0	0	1	0	-E/2
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	-E/2
6	0	1	0	1	0
7	0	1	1	0	0
8	0	1	1	1	E/2
9	1	0	0	0	-E/2
10	1	0	0	1	0
11	1	0	1	0	0
12	1	0	1	1	E/2
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	E/2
15	1	1	1	0	E/2
16	1	1	1	1	E

Tableau III.3

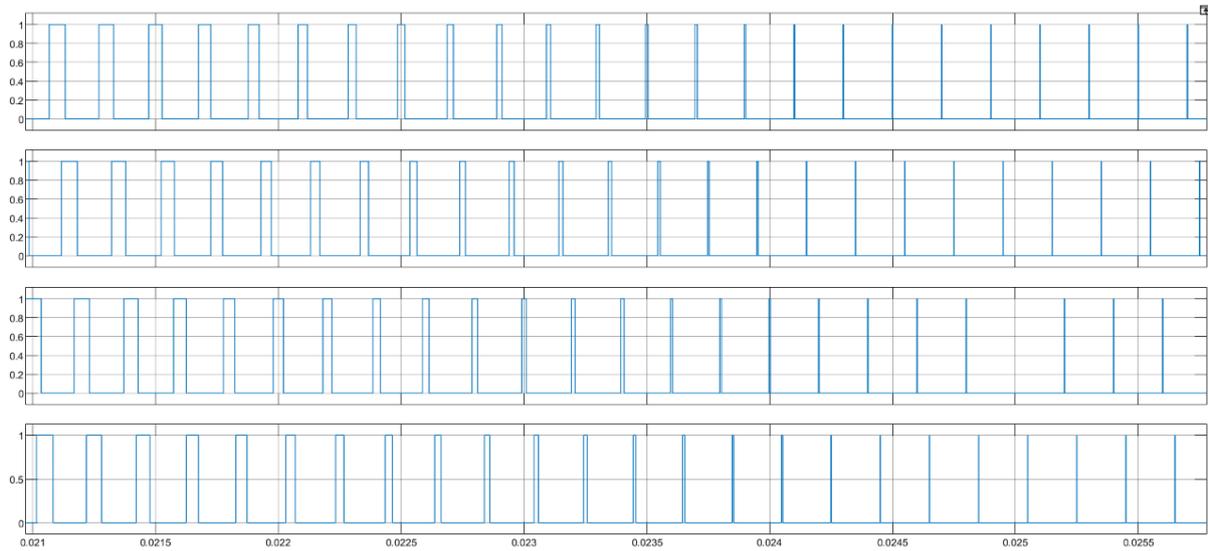


Figure III. 12 Signal de commande des interrupteurs supérieures

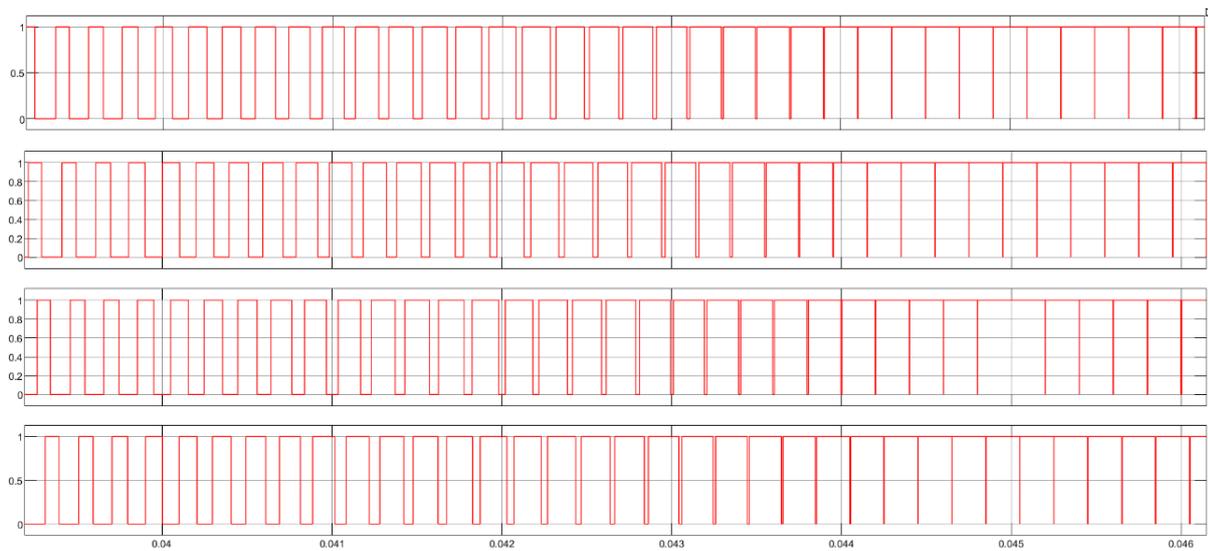


Figure III. 13 Signal de commande des interrupteurs inférieurs.

D'après les résultats de tableau III.3 nous pouvons voir que plusieurs configurations sont équivalentes à un même niveau de tension obtenu, c'est à dire que nous pouvons avoir tous les niveaux de tension en sortie avec un nombre réduit de configurations du bras. Cela permet de simplifier la commande.

III.2.2.3 Simulation d'onduleurs multicellulaire a 4 cellules et les résultats obtenus

- 1er Cas :

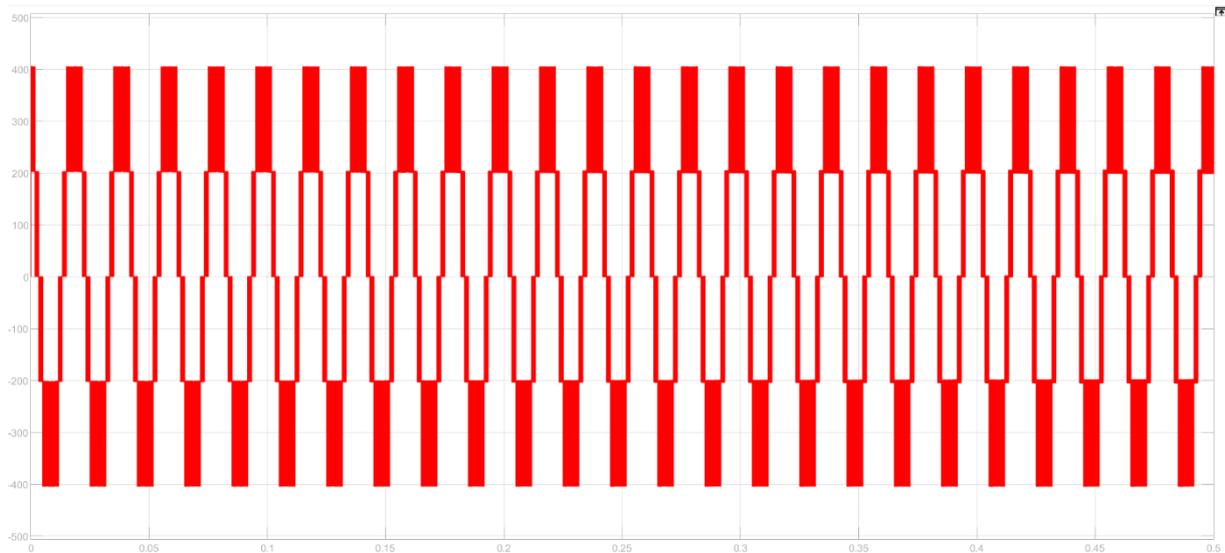
 $M_f=100$ 

Figure III. 14 Tension simple à 5KHz

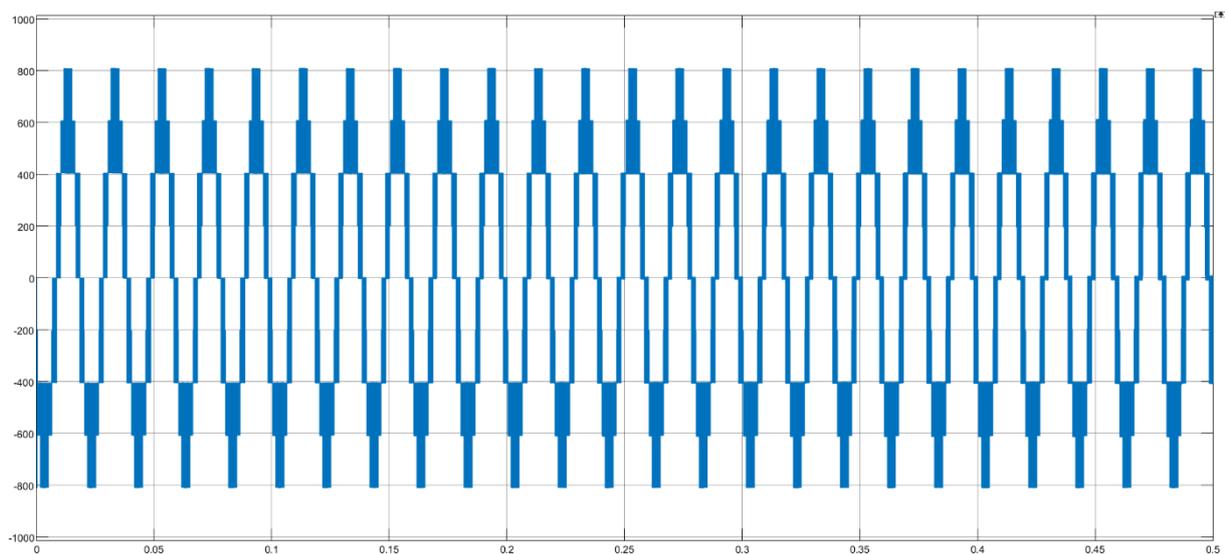


Figure III. 15 Tension composé à 10KHz

- 2eme cas :

 $M_f=200$

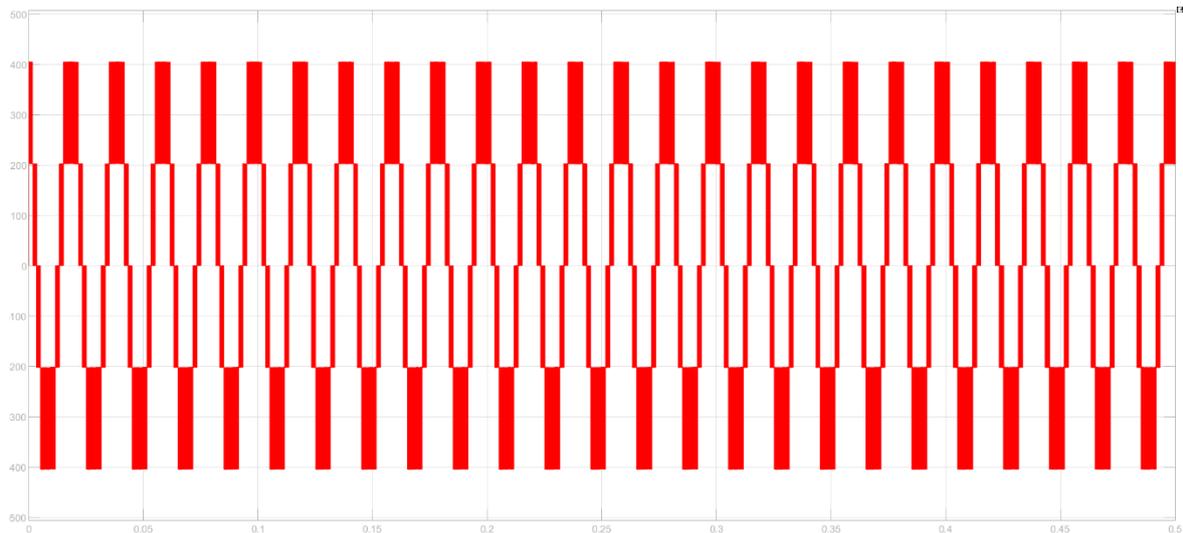


Figure III. 16 Tension simple à 10KHz

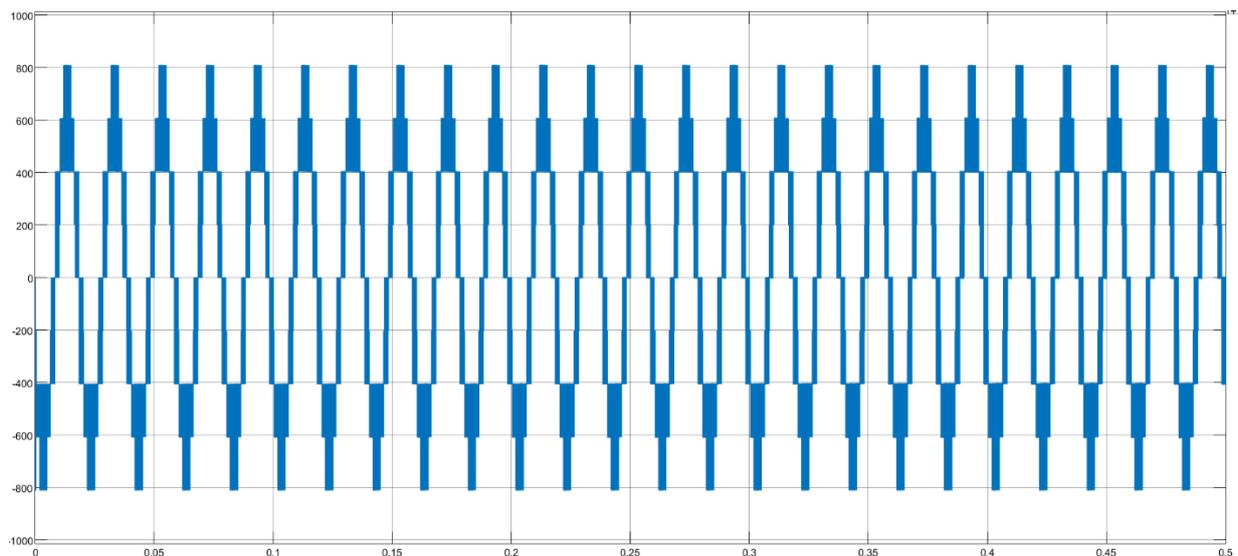


Figure III. 17 Tension composé à 10KHz

III.2.3 Interprétations des résultats

- Pour $P=2$,

- La tension simple porte bien les trois niveaux de tensions E , 0 , $-E$.

- La tension composée porte bien les cinq niveaux de tensions $2E$, E , 0 , $-E$, $-2E$.

-D'après les résultats obtenus pour $M_f=100$ et $M_f=200$ on conclure que les formes d'ondes ne sont pas trop différentes

- Pour $P=4$,

- La tension simple porte bien les cinq niveaux de tensions E , $E/2$, 0 , $-E/2$, $-E$.

- La tension composé porte bien les sept niveaux de tensions $2E$, E , $E/2$, 0 , $-E/2$, $-E$, $-2E$.

-D'après les résultats obtenus pour $M_f=100$ on observe que la formes d'onde rapproche mieux à la sinusoïde par rapport à la forme de d'onde d'onduleur à $P=2$ a $M_f=200$

- A chaque fois qu'on passe d'un niveau à un autre supérieur et en augmentant la fréquence, on conclure que la forme d'onde devient mieux sinusoïdale que la précédente.

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé deux structures d'onduleur multicellulaires série (P=2, P=4). D'après les résultats de simulation obtenus, nous constatons que la qualité de la tension de sortie s'améliore avec l'augmentation d'indice de modulation M_f et le nombre des cellules (augmentation de la fréquence de porteuse f_p).

Chapitre IV: Simulation de l'ensemble onduleur multicellulaire et GPV

IV.1 Introduction :

Ce chapitre se devise en deux parties, premièrement nous allons simuler l'ensemble GPV, convertisseur DC-DC, Onduleurs, Filtre et charge RL sous l'environnement MATLAB SIMULINK ensuite nous allons simuler l'onduleur multicellulaire série a 7 cellules commandé par la commande linéaire par modulation des rapports cycliques.

IV.2 Simulation de module photovoltaïque :

IV.2.1 Module photovoltaïque :

Le module **SunPower SPR-315E-WHT-D** comporte 96 cellules solaires de silicium monocristallin connectées en série. Le module **SunPower SPR-315E-WHT-D** peut produire une puissance maximale de 315 watts à 54.7 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement de 1000 W/m² et une température $T=25^{\circ}$. Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque **SunPower SPR-315E-WHT-D** en conditions de test standards sont représentées sur le tableau IV-1 :

Grandeurs	Valeurs
Eclairement standard G	1000W/m ²
Température T	25
Puissance crête maximale P _m	315 W
Tension optimal V _m	54.7 V
Courant optimal I _m	5.76 A
Tension de court-circuit V _{co}	64.6 V
Courant de court-circuit I _{cc}	6.14 A

Tableau IV.1 : Paramètres du SunPower SPR-315E-WHT-D

Le block SIMULINK du module photovoltaïque est présenté dans la figure

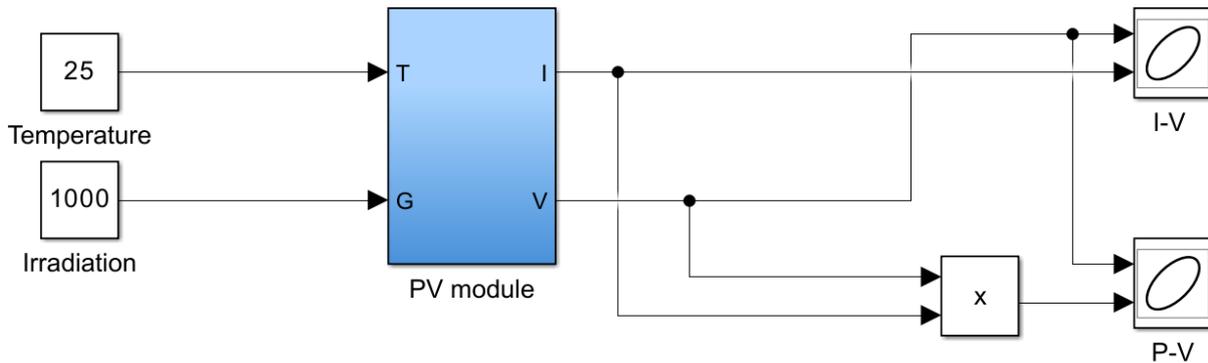


Figure IV. 1 Block SIMULINK du module SunPower SPR-315E-WHT-D

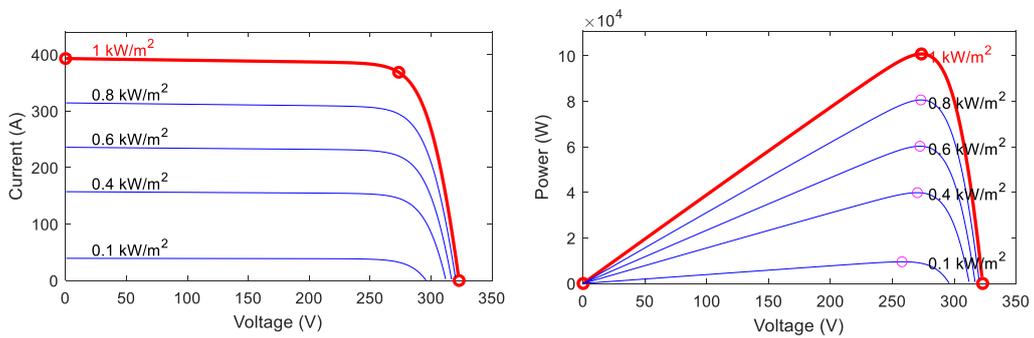


Figure IV. 2 Caractéristique I(V) et P(V) du module pour différentes valeurs de l'éclairement

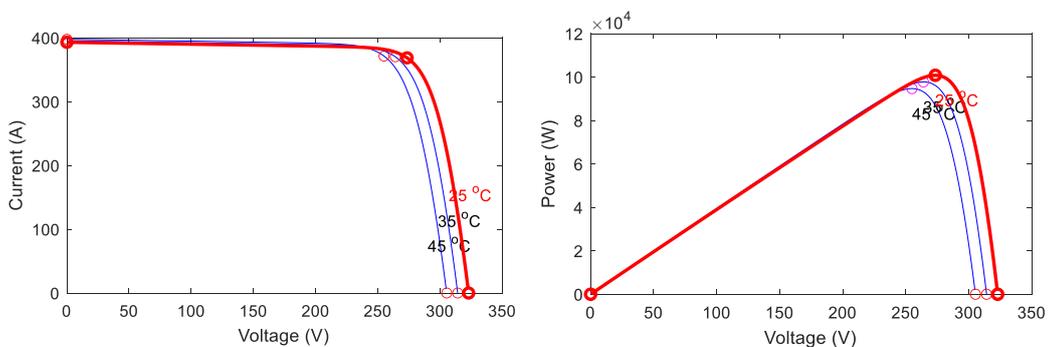


Figure IV. 3 Caractéristique I(V) et P(V) du module pour différentes valeurs de la température

IV.2.2 Simulation de la commande MPPT « P&O » + hacheur survolteur :

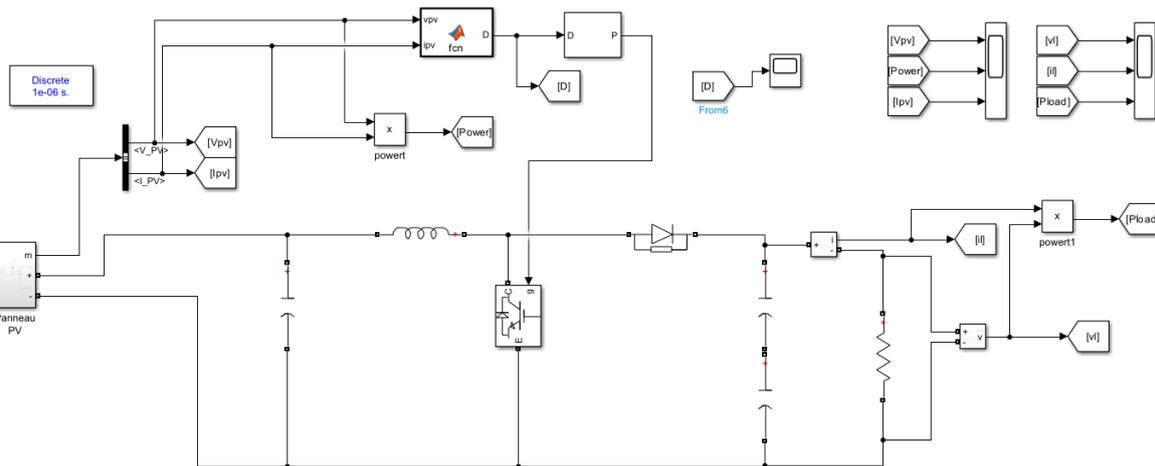


Figure IV. 4 Simulation de la commande MPPT « P&O » +hacheur



Figure IV. 5 La tension maximale à la sortie du PV après l'application de l'MPPT

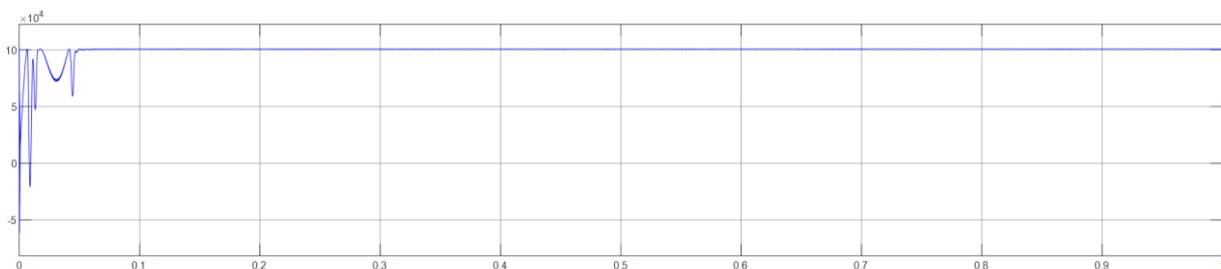


Figure IV. 6 La puissance maximale à la sortie du PV après l'application de l'MPPT

IV.2.3 Interprétation des résultats de la simulation PV avec la commande MPPT :

La puissance maximale du générateur photovoltaïque après application du MPPT est Comme le montre la Figure IV.6. On observe la forme de la courbe déterminée par l'algorithme P&O. La tension optimale est progressivement atteinte, délivrant la puissance maximale que le PV peut fournir.

IV.3 Simulation de l'ensemble GPV et onduleurs Multicellulaire :

Dans cette partie, nous commencerons par simuler un système global composé d'Alimentation photovoltaïque, commande MPPT, convertisseur DC-DC, convertisseur DC/AC, commande MLI, filtre LC et charge RL.

- GPV :

Notre générateur se compose de 64 cordes en parallèle chaque corde contient 5 modules connectés en série, dont les performances ont été étudiées auparavant. Le nombre de modules est calculé pour obtenir une tension maximale de 650,6 V en sortie du GPV.

▪ Filtre LC :

Afin d'éliminer les harmoniques de commutation et d'améliorer la qualité de l'alimentation, un filtre à basse fréquence est nécessaire. Afin de calculer les paramètres du filtre, on fixe :

La fréquence de résonance du filtre est fixée au dixième de celle de découpage.

$$L = V / (4 \times \Delta I \times f d) \quad (\text{IV.1})$$

Tel que :

- V : tension de sortie.
- $\Delta I = 20\% I_s$
- $f d$: fréquence de découpage

$$C = V / (8 \times \Delta I \times f d) \quad (\text{IV.2})$$

Pour la simulation on fixé deux fréquence de découpage :

- $f d = 10\text{KHz}$: $L = 2.27\text{H}$, $C = 2.75 \mu\text{F}$
- $f d = 5\text{KHz}$: $L = 1.14 \text{H}$, $C = 1.38 \mu\text{F}$
- Charge RL :

La charge RL a les valeurs :

- $R = 10\Omega$
- $L = 1\text{mH}$

IV.4 Simulation de l'ensemble GPV et onduleur alimentant une charge RL :

IV.4.1 Simulation de l'onduleur Multicellulaire à 2 cellules :

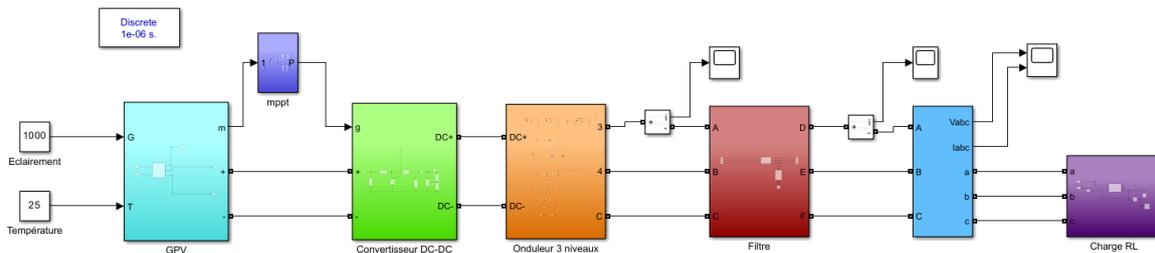


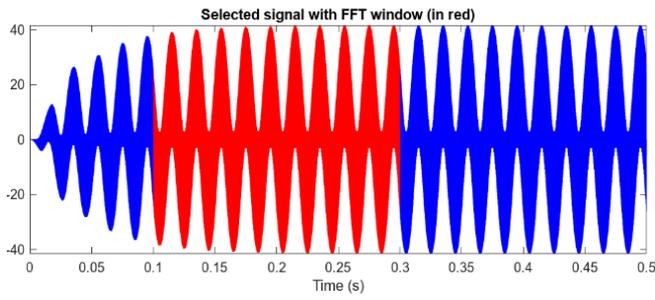
Figure IV. 7 Circuit de l'onduleur Multicellulaire (P=2)

IV.4.1.1 Influence du taux de modulation M_a et le rapport de fréquence M_f sur le THD :

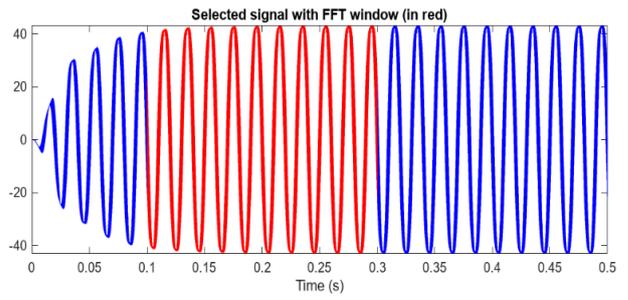
Dans le premier cas on fixe la fréquence de la porteuse à $F_p=5\text{KHz}$ puis à 10KHz dans le deuxième cas, tout en variant le taux de modulation d'amplitude M_a pour chaque fréquence.

- $M_f=100$:

Sans filtrage :

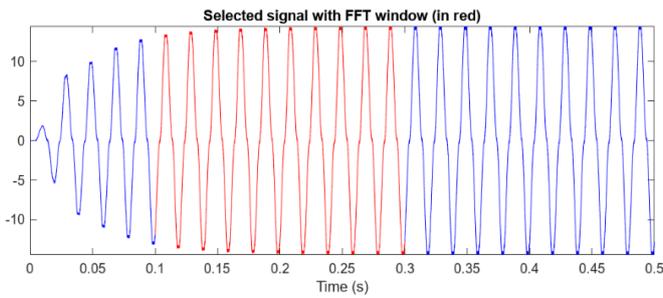


Ma=0.4

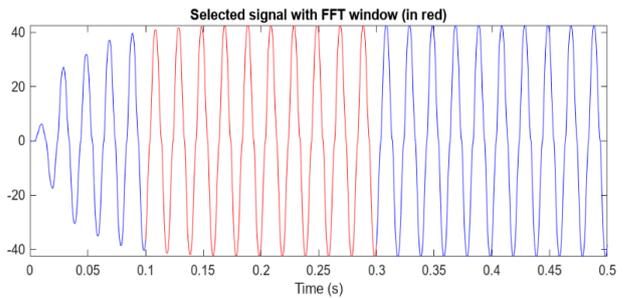


Ma=1

Avec filtrage :



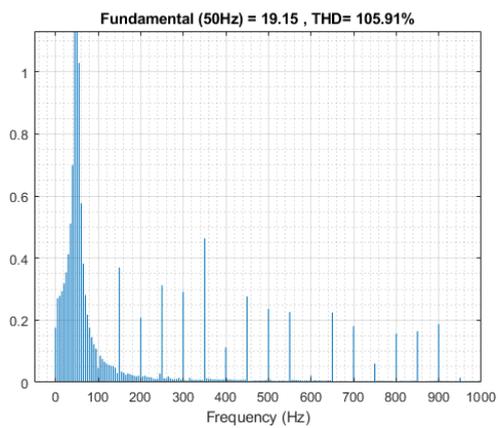
Ma=0.4



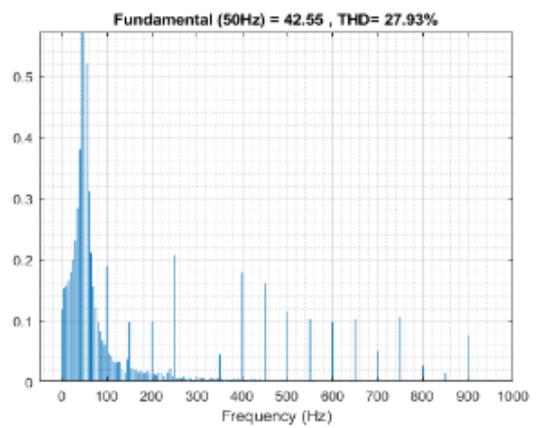
Ma=1

Figure IV. 8 Variations de courant en fonction de Ma

Sans filtrage :

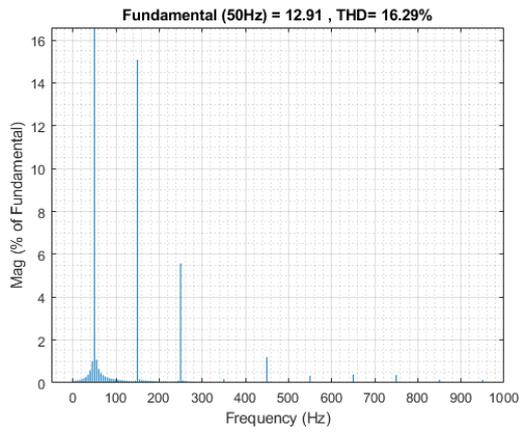


Ma=0.4

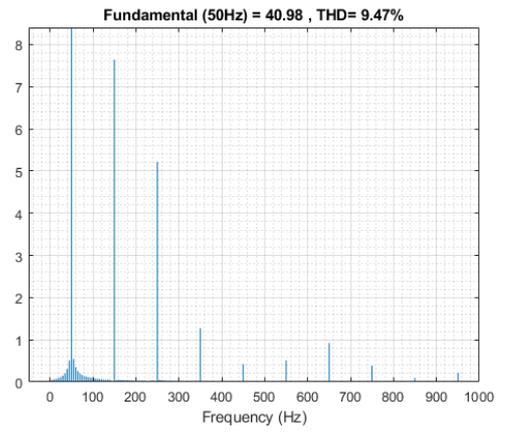


Ma=1

Avec filtrage :



Ma=0.4

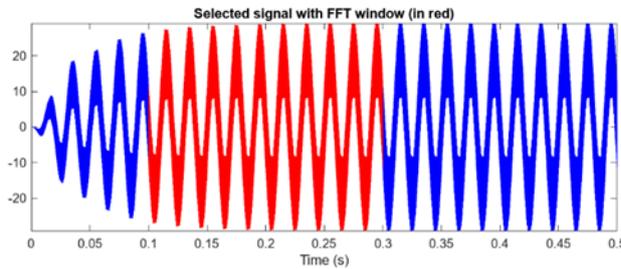


Ma=1

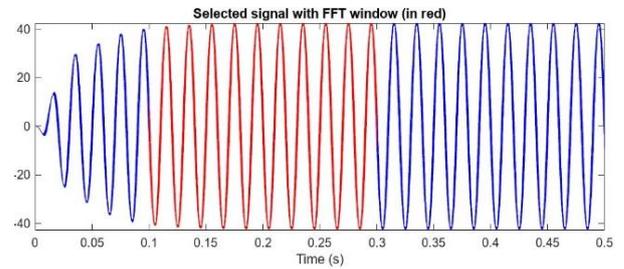
Figure IV. 9 Variations de THD% en fonction de Ma

- $M_f=200$:

Sans filtrage :

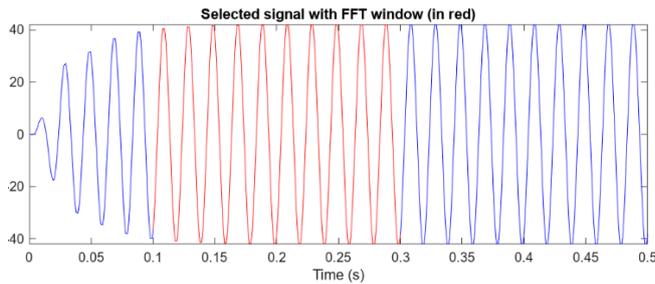


Ma=0.4

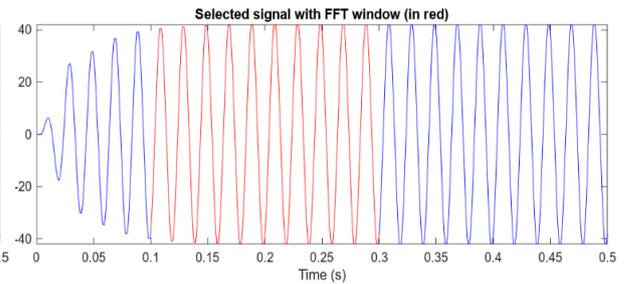


Ma=1

Avec filtrage :



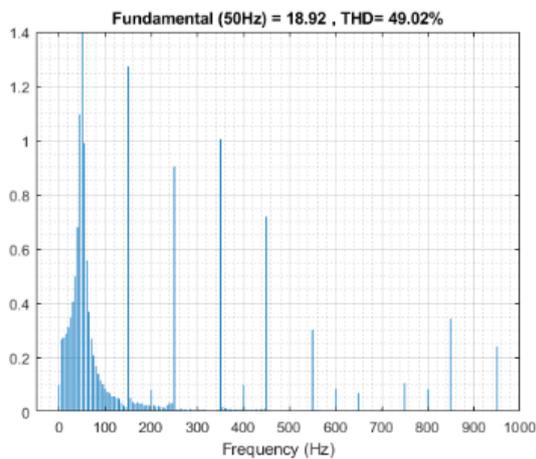
Ma=0.4



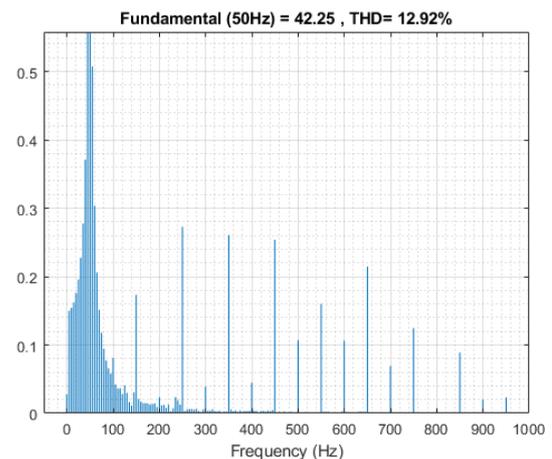
Ma=1

Figure IV. 10 Variations de courant en fonction de Ma

Sans filtrage :

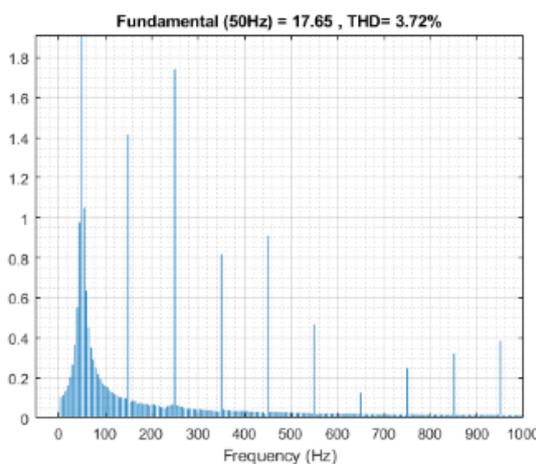


Ma=0.4

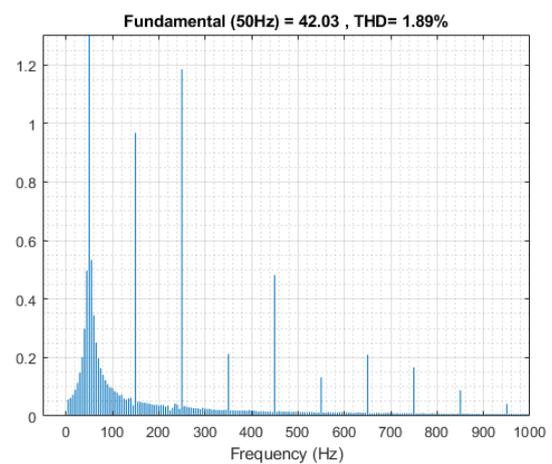


Ma=1

Avec filtrage :



Ma=0.4



Ma=1

Figure IV. 11 Variations de THD% en fonction de Ma

IV.4.1.2 Interprétations des résultats de la simulation :

L'analyse des figures précédentes de courant et THD nous permet de faire les constatations suivantes :

- Pour une fréquence de porteuse fixe ($M_f=200$) le THD=49.02% pour Ma=0.4 et THD=12.92% pour Ma=1
- Pour la même valeur Ma=1 et en ajoutant un filtrage et en augmentant la fréquence de porteuse de 5KHz à 10KHz la qualité de l'onde s'améliore comme le montre le THD qui diminue de 105.63% à 3.72%.
- Dans tous les autres cas on constate que le THD s'améliore en passant à un indice supérieur de Ma et M_f

IV.4.2 Simulation de l'onduleur Multicellulaire à 4 cellules :

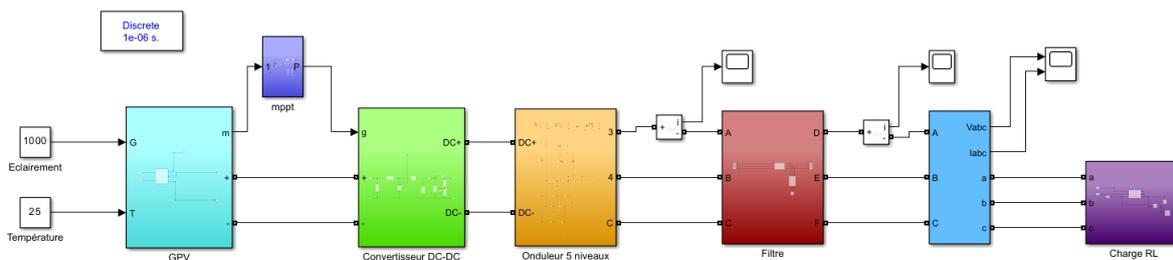
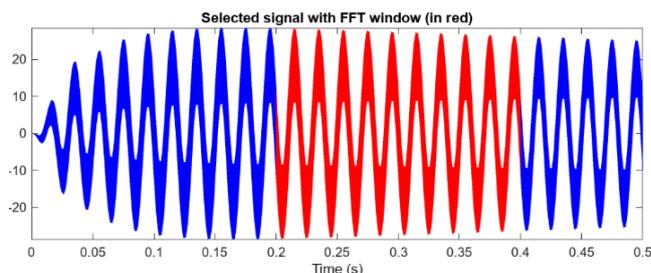


Figure IV. 12 Circuit de l'onduleur Multicellulaire (P=5)

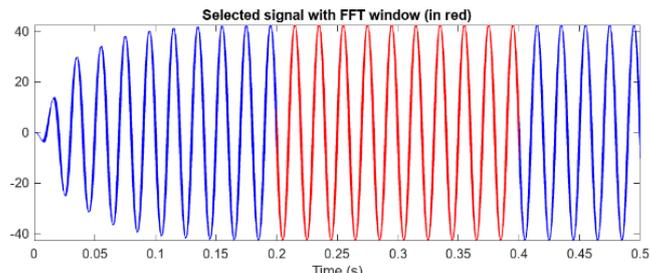
IV.4.2.1 Influence du taux de modulation M_a et le rapport de fréquence M_f sur le THD :

• Cas 1 : $M_f=100$:

Sans filtrage :

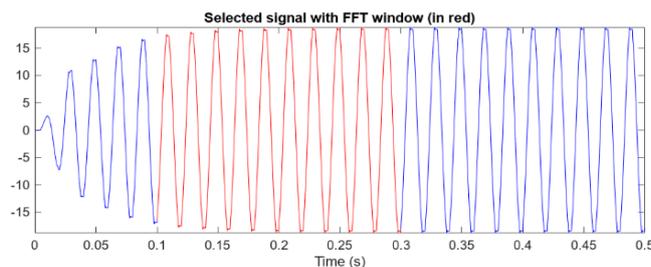


Ma=0.4

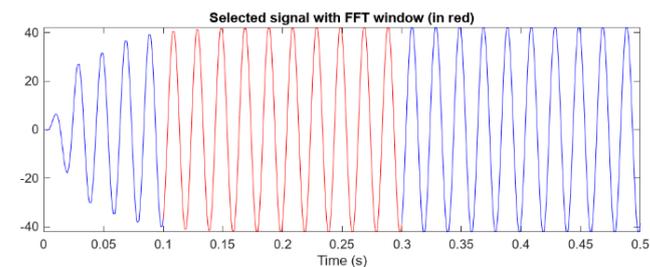


Ma=1

Avec filtrage :



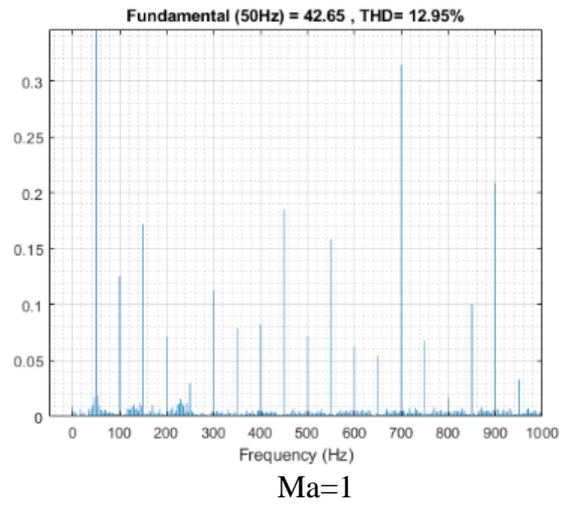
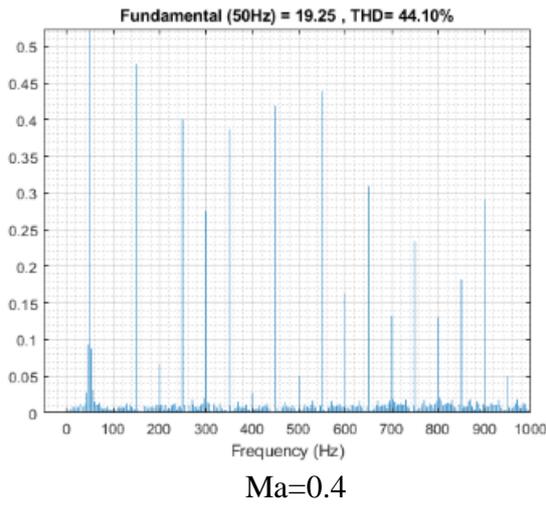
Ma=0.4



Ma=1

Figure IV. 13 Variations de courant en fonction de M_a

Sans filtrage :



Avec filtrage :

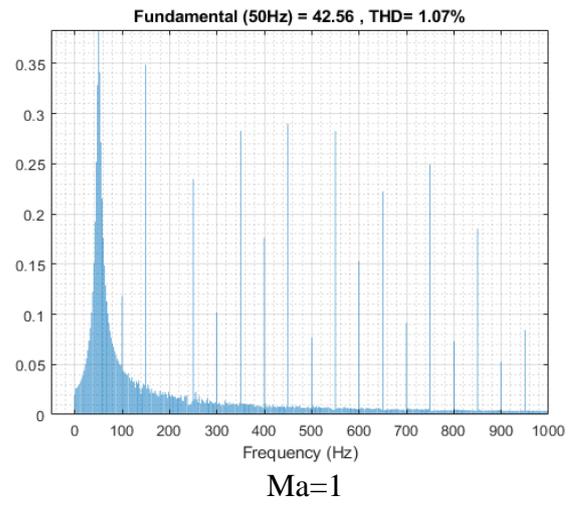
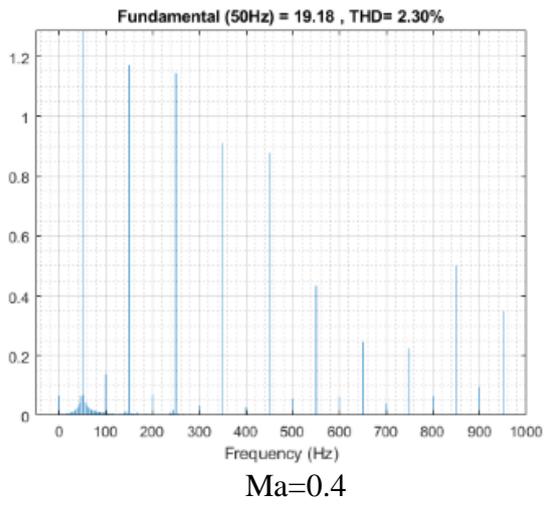
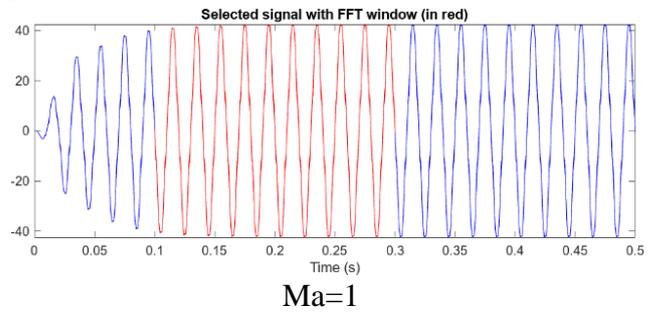
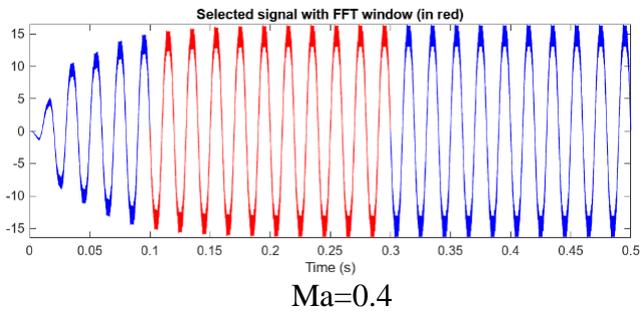


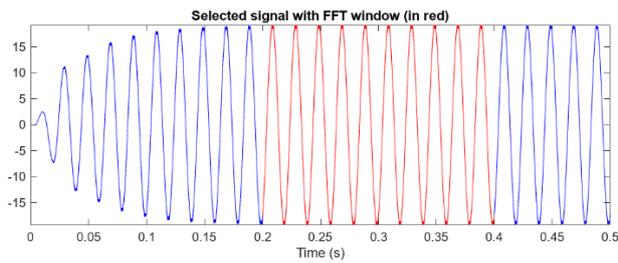
Figure IV. 14 Variations de THD% en fonction de Ma

• Cas 2 : $M_f=200$:

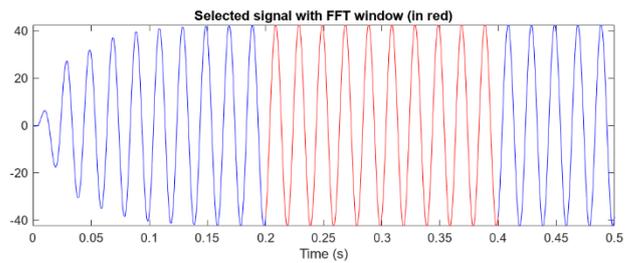
Sans filtrage :



Avec filtrage :



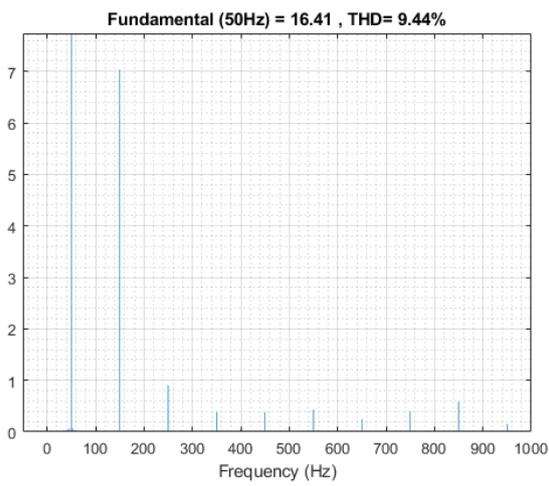
Ma=0.4



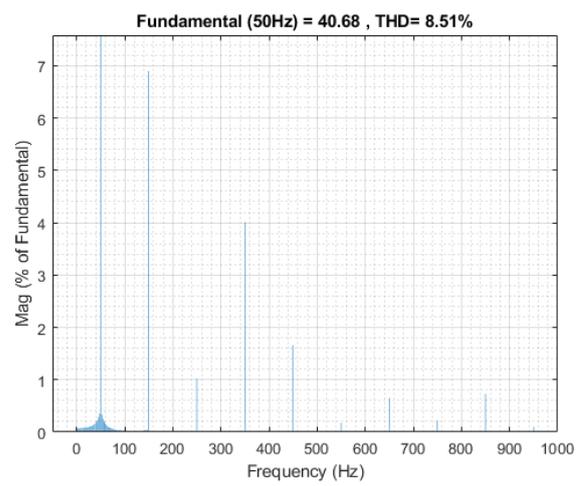
Ma=1

Figure IV. 15 Variations de courant en fonction de Ma

Sans filtrage :

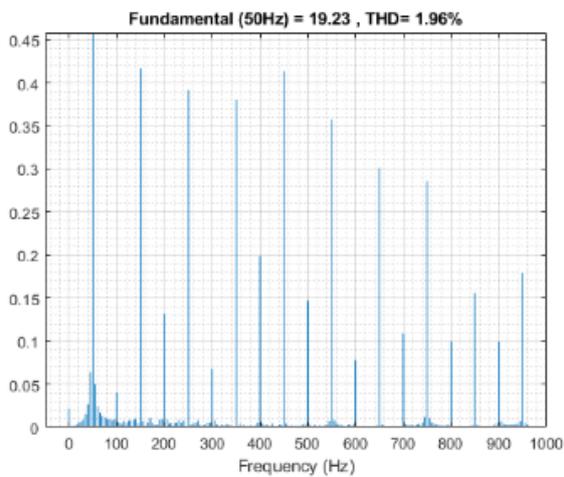


Ma=0.4

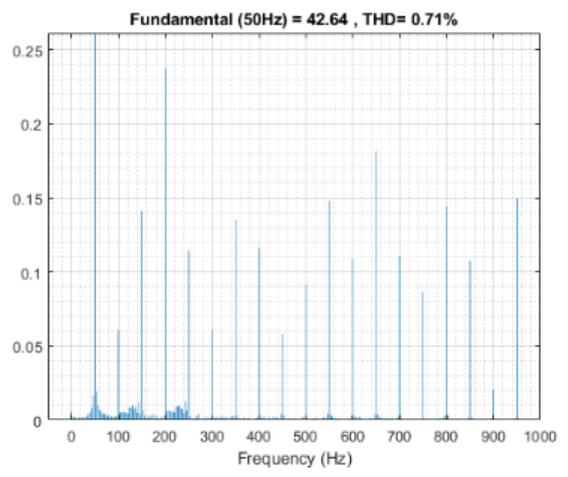


Ma=1

Avec filtrage :



Ma=0.4



Ma=1

Figure IV. 16 Variations de THD% en fonction de Ma

- Les résultats obtenus pour les deux simulations sont représentés dans les tableaux suivants :

MA	THD%			
	P=2		P=4	
	5KHz	10KHz	5KHz	10KHz
0.2	227.12%	106.60%	93.05%	17.12%
0.4	105.63%	49.02%	44.10%	9.44%
0.8	40.82%	18.91%	18.39%	8.72%
1	27.95%	12.92%	12.95%	8.49%

Tableau IV.2 : Résultats de THD% en fonction de Ma sans filtrage

MA	THD%			
	P=2		P=4	
	5KHz	10KHz	5KHz	10KHz
0.2	19.05%	6.81%	13.83%	4.08%
0.4	16.29%	3.72%	2.30%	1.96%
0.8	12.07%	2.46%	1.03%	0.88%
1	9.47%	1.89%	1.07%	0.71%

Tableau IV.3 : Résultats de THD% en fonction de Ma avec filtrage

IV.4.2.2 Interprétations des résultats de la simulation :

L'analyse des figures précédentes de courant et THD nous permet de faire les constatations suivantes :

- Pour une fréquence de porteuse fixe ($M_f=200$) le THD=9.44 pour Ma=0.4 et THD=8.49% pour Ma=1
- Pour la même valeur Ma=1 et en ajoutant un filtrage et en augmentant la fréquence de porteuse de 5KHz à 10KHz la qualité de l'onde s'améliore comme le montre le THD qui diminue de 12.95% à 0.71%
- Le THD s'améliore avec l'augmentation des deux indices Ma et M_f et avec un filtrage.

IV.5 Simulation de l'onduleur multicellulaire série à 7 cellules :

IV.5.1 La commande MLI-ST :

Pour voir le comportement du convertisseur multicellulaire série lors de la commande en boucle ouverte, nous avons réalisé deux simulations sous MATLAB/SIMULINK d'un onduleur multicellulaire série 7 cellules, alimentant une charge (R-L), commandé par MLI Sinus-Triangle (voir figures IV. 17, IV. 18).

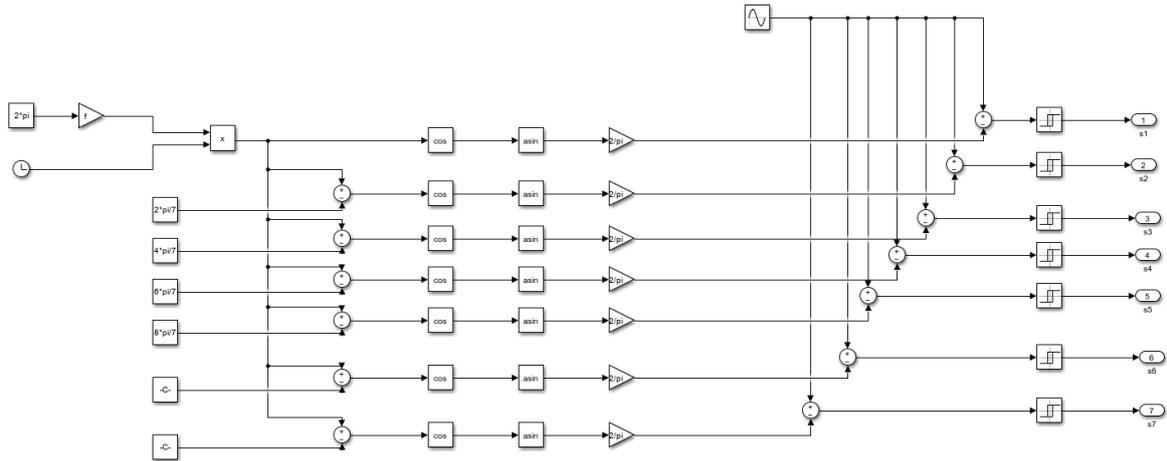


Figure IV. 17 Bloc de la commande MLI-ST du bras d'onduleur FCMC 7 cellules.

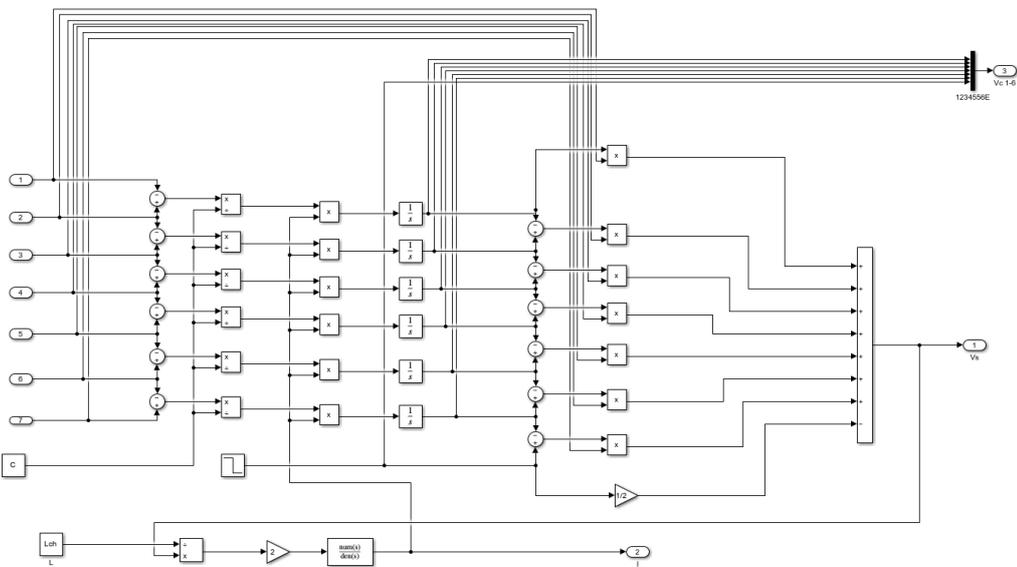


Figure IV. 18 Bras d'onduleur FCMC 7 cellules alimentant une charge R-L

Le tableau IV.3 donne les différents paramètres utilisés dans cette simulation. Les figures IV. 19, IV.20, IV.21, IV.22, IV.23 Présentent les résultats obtenus après simulation de l'onduleur multicellulaire série 7 cellules

	Paramètres	Valeurs numériques
Le convertisseur multicellulaire série	Nombre de cellules (P)	7
	Tension continue (E)	1500 V
	Condensateur flottant (C)	40 μ F
La charge	Inductance de charge (L_{ch})	1 mH
	Résistance de charge (R_{ch})	10 Ω

Les paramètres de la commande MLI	Fréquence de découpage (f_{dec})	26 kHz
	Taux de modulation (r)	0.8

IV.3 Paramètres de simulation (commande par MLI-ST).

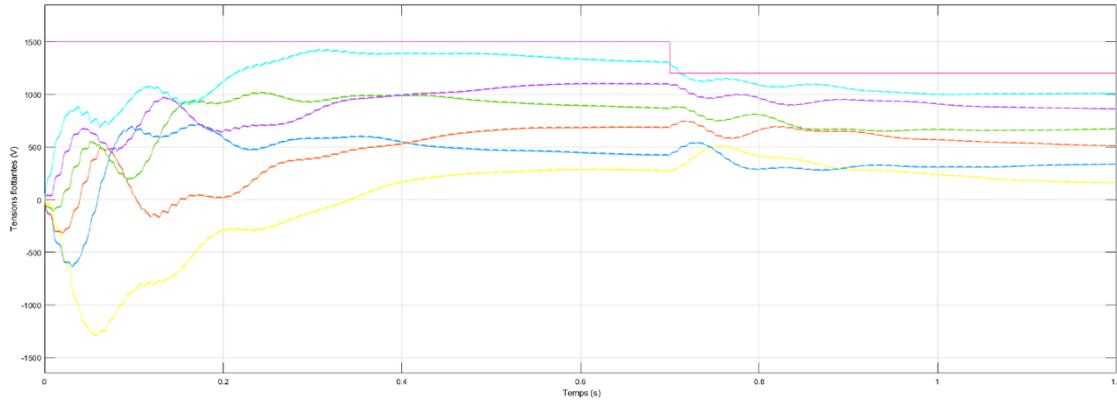


Figure IV. 19 Evolution des tensions flottante

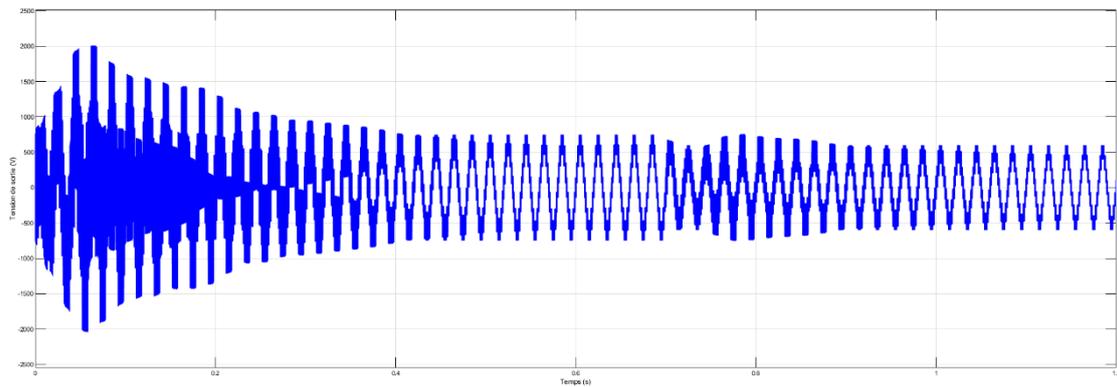


Figure IV. 20 Evolution de la tension de sortie

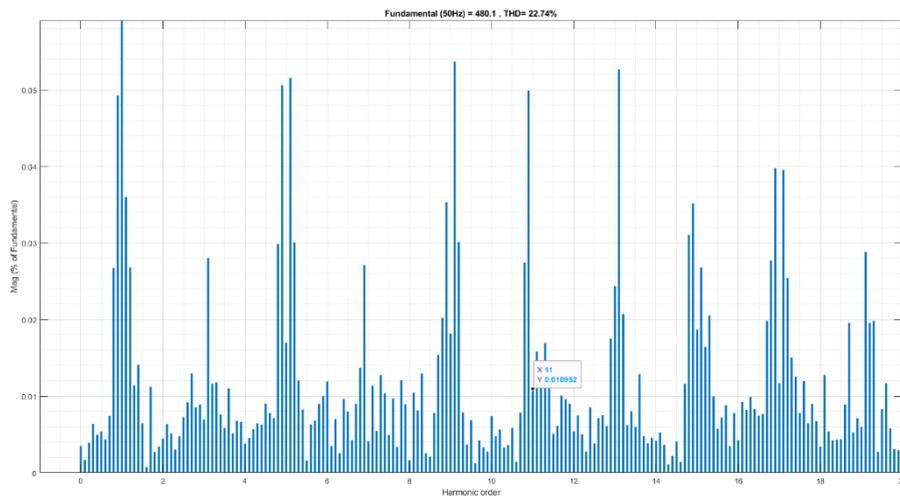


Figure IV. 21 THD de la tension de sortie

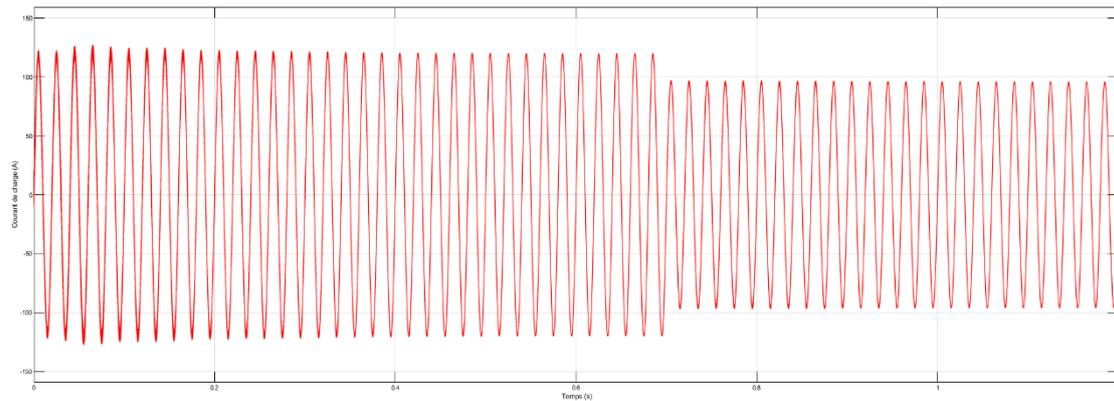


Figure IV. 22 Evolution du courant de charge

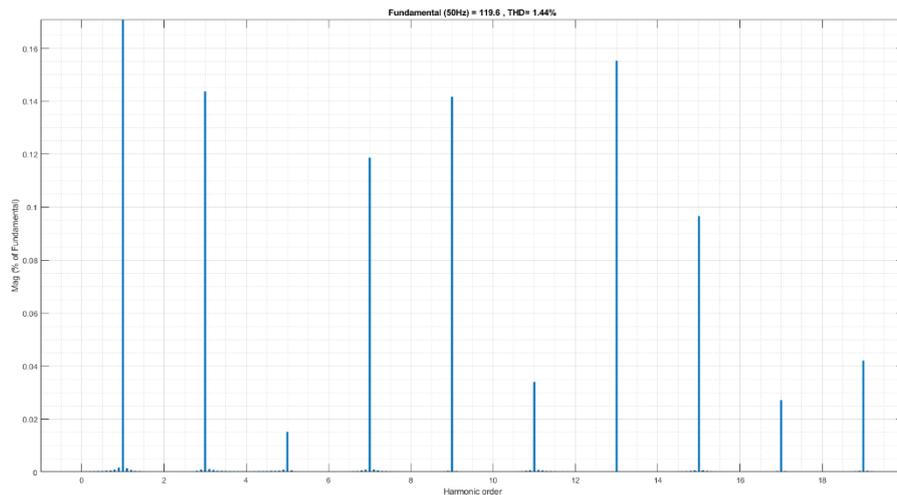


Figure IV. 23 THD de courant de charge

IV.5.1.1 Interprétations des résultats de la simulation :

Au démarrage du convertisseur, les tensions flottantes sont déséquilibrées (régime transitoire) jusqu'à $t = 0.25s$; puis elles se stabilisent. A $t = 0.4 s$, une perturbation est introduite (on simule une chute de tension d'alimentation E de 300 V). Les tensions flottantes sont à nouveau déséquilibrées jusqu'à environ $t = 0.65 s$ où elles atteignent leurs nouvelles valeurs de référence. La durée du déséquilibre des tensions flottantes au cours des deux régimes transitoires (au démarrage et après perturbation) influence directement sur la qualité du signal de sortie de la tension et du courant. Le $THD_{tension}=22.74 \%$ et le $THD_{courant}=1.44 \%$.

IV.5.2 La commande linéaire par modulation des rapports cycliques à un onduleur multicellulaire 7 cellules :

Nous allons simuler sous MATLAB/SIMULINK, un onduleur multicellulaire série 7 cellules, alimentant une charge (R-L), commandé par la commande linéaire par modulation des rapports cycliques (voir Annexe figures A5, A6 et A7).

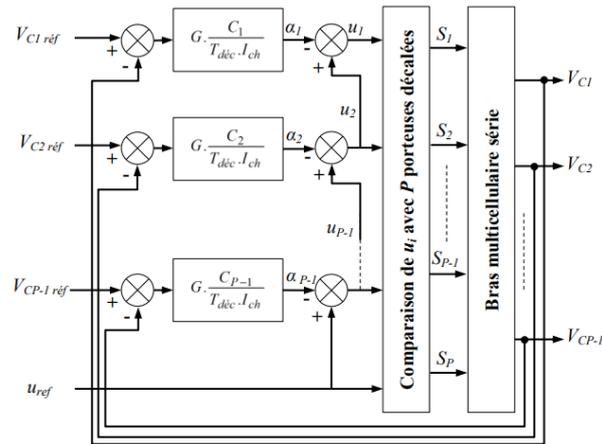


Figure IV. 24 Commande linéaire par modulation des rapports cycliques d’un bras d’onduleur multicellulaire série.

Les paramètres utilisés dans cette simulation sont donnés sur le tableau IV.4.

	Paramètres	Valeurs numériques
Le convertisseur multicellulaire série	Nombre de cellules (P)	7
	Tension continue (E)	1500 V
	Condensateur flottant (C)	40 μ F
La charge	Inductance de charge (Lch)	1 mH
	Résistance de charge (Rch)	10 Ω
Commande par modulation des rapports cycliques	Fréquence de découpage (fdéc)	26 kHz
	G	6

IV.4 Paramètres utilisés dans le cas de la commande par modulation des rapports cycliques. Les résultats obtenus après simulation sont représentés sur les figures IV. 25, IV. 26, IV. 27, IV. 28, et IV. 29.

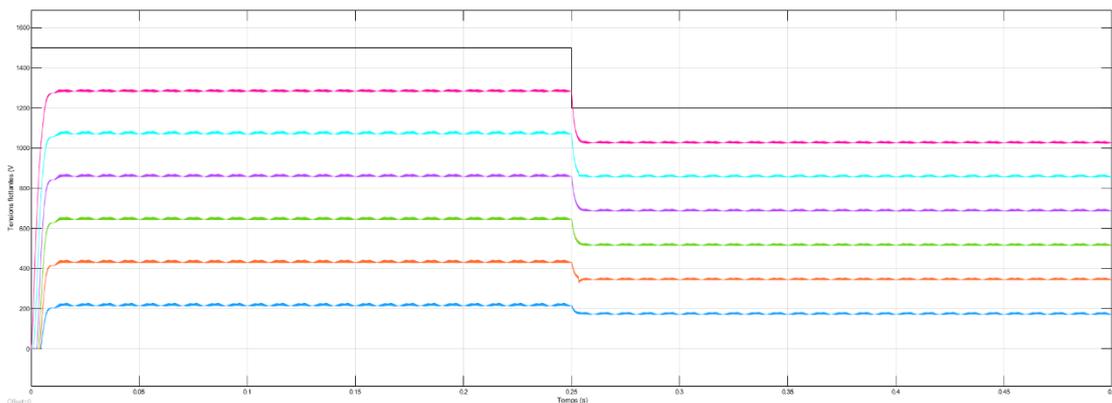


Figure IV. 25 Evolution des tensions flottantes

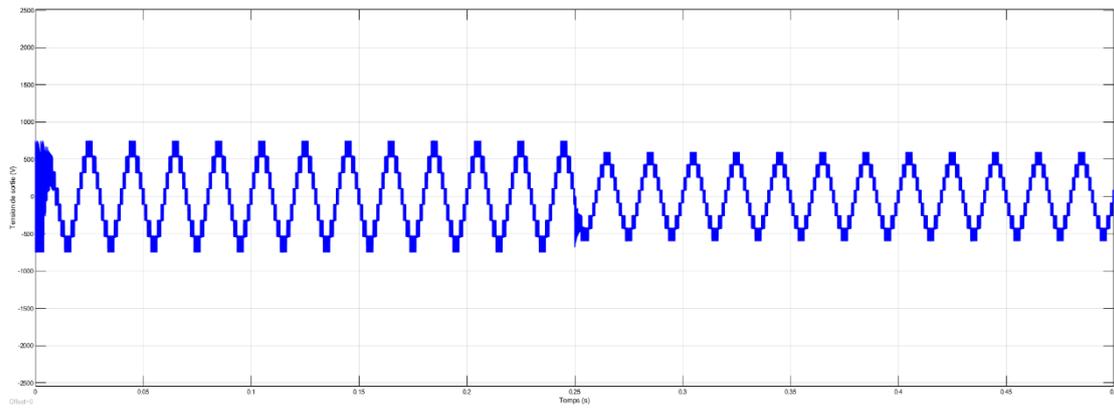


Figure IV. 26 Evolution de la tension de sortie

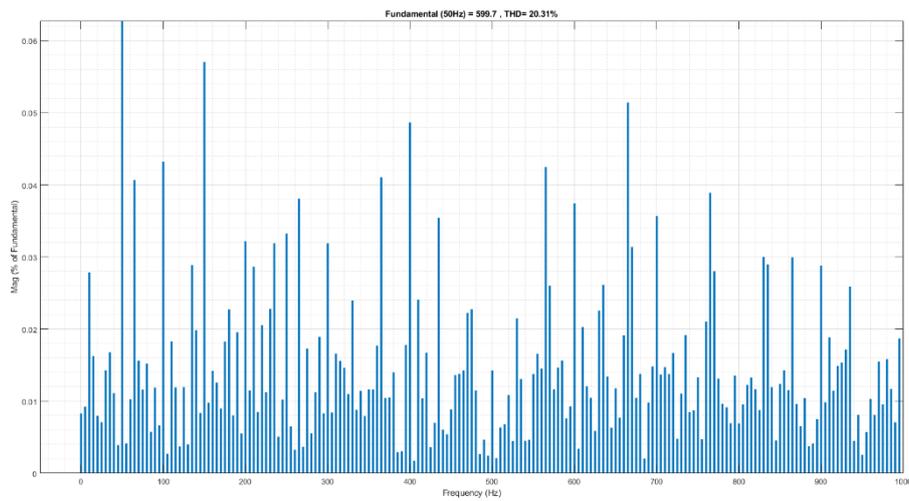


Figure IV. 27 THD de la tension de sortie.

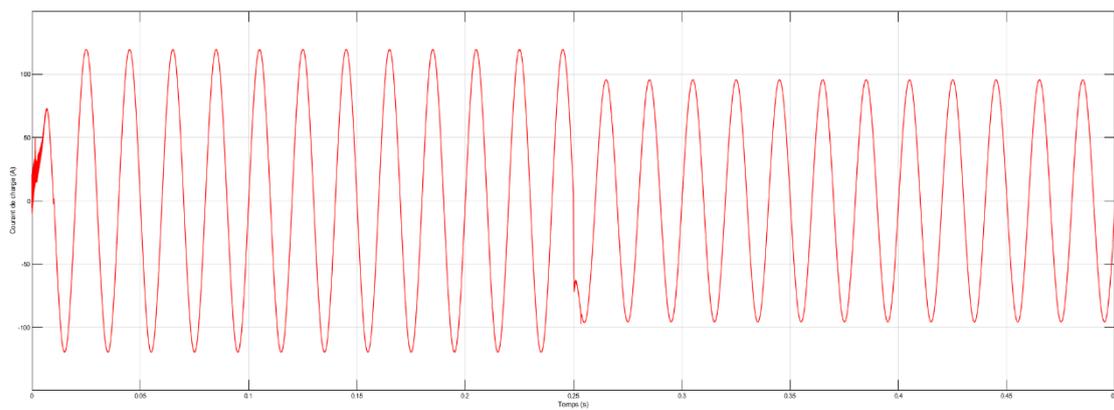


Figure IV. 28 Evolution du courant de charge

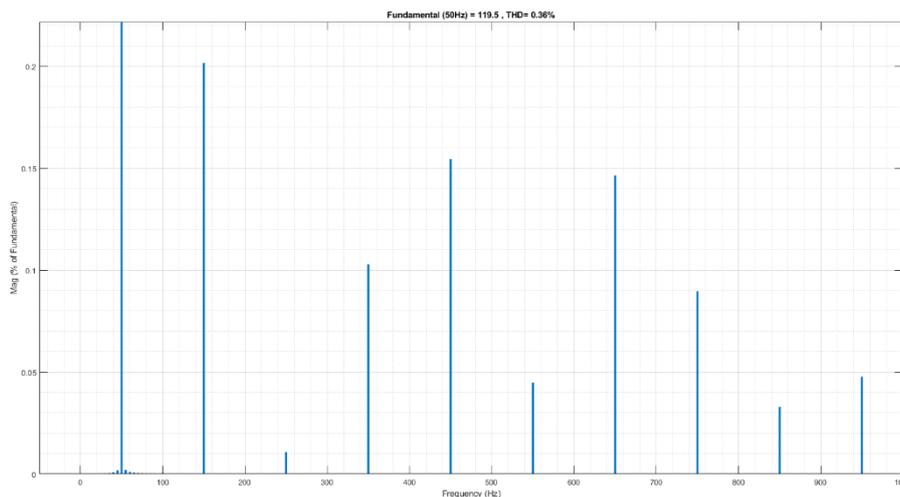


Figure IV. 29 THD du courant de charge

IV.5.2.1 Interprétations des résultats des simulations :

A partir des figures IV. 25, IV. 26, IV. 27, IV. 28, et IV. 29. nous pouvons déduire que la commande par modulation des rapports cycliques impose une dynamique d'équilibrage rapide pour les tensions flottantes (figure IV. 25). Elles atteignent leurs valeurs de références en un temps de 0.007 s (temps nécessaire pour l'équilibrage des tensions 30 fois plus faible que celui en boucle ouverte dans le cas de la commande par MLI-ST), ce qui améliore le signal de la tension de sortie (figure IV. 26), le courant de charge (figure IV. 28) et protège les interrupteurs de puissance. A $t = 0.25$ s, nous simulons une chute de tension de 300V au niveau de la tension d'alimentation du convertisseur E. Les tensions flottantes suivent rapidement ce changement ce qui réduit le temps des perturbations au niveau du signal la tension de sortie et du courant de charge. Le $THD_{tension} = 20.31\%$ et le $THD_{courant} = 0.36\%$.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier lieu les différents résultats de simulation du générateur photovoltaïque associés aux onduleurs multicellulaires série (P=2, P=4)

Le taux d'harmoniques est diminué par l'ajout d'un filtre. Aussi, le passage à un nombre de cellule d'onduleur multicellulaire série supérieur contribue à la diminution du THD en parallèle avec l'augmentation du rapport de fréquence "Mf" et du taux de modulation "Ma" mais cette augmentation cause bien sûre une augmentation des pertes de commutation.

Donc on peut conclure qu'il doit y avoir un compromis entre le nombre de cellule à utiliser et la fréquence de commutation des interrupteurs pour un fonctionnement optimal du système.

En deuxième lieu nous avons simulé l'onduleur multicellulaire série à 7 cellules commandé par la commande linéaire par modulation des rapports cycliques.

Cette commande impose une dynamique d'équilibrage rapide pour les tensions flottantes 30 fois plus faible que celui en boucle ouverte (MLI-ST), Également elle améliore le signal de la tension de sortie , le courant de charge et protège les interrupteurs de puissance.

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce thème est lié à l'étude de commande des onduleurs multicellulaires et leurs comportements dans un système photovoltaïque connecté à une charge RL.

Dans le premier lieu, nous avons étudié le principe de système photovoltaïque dans lequel nous avons présenté le modèle des différents éléments, nous avons conclu que le type de cellule influe sur le rendement de panneau. Ainsi que la température, l'éclairement, l'association série ou parallèle influent sur le courant et la tension du panneau et la méthode MPPT sert à maximiser son rendement.

Le second lieu est consacré pour les composants semi-conducteurs et leurs utilisations ainsi que nous avons présenté les onduleurs, ses principes de fonctionnement et leurs différents types. A la fin de cette partie on a élaboré une étude détaillée sur les onduleurs multicellulaire et leurs stratégies de commandes. Nous avons constaté que l'utilisation de ce type d'onduleur permet de générer des tensions proches de la forme sinusoïdal et permet de réduire la tension de commutation par cellule. Cela améliore et augmente la fiabilité et l'efficacité globale du système

En troisième lieu, notre étude nous a amené à simuler la commande MLI a deux topologies d'onduleur multicellulaire ($P=2$, $P=4$). Nous avons constaté que quand en augmentant M_f et le nombre de cellule nous aurons une meilleure qualité de tension

Dans le dernier lieu, Premièrement nous avons effectué la simulation du système globale (GPV + onduleurs + filtre + charge) pour deux topologies d'onduleur ($P=2$, $P=4$) en utilisant la commande MLI-ST et deuxièmes nous avons appliqué la commande linéaire par modulation des rapports cycliques.

D'après les résultats de simulation obtenue

Premièrement en fixant M_f et en variant M_a nous avons constaté que :

- Le passage d'un niveau à un autre niveau supérieure améliore la qualité de l'onde.
- Le filtrage sert à ajuster la forme d'onde pour se rapprocher de la sinusoïdale souhaitée.
- La commande de l'onduleur et ses différents paramètres nous a donné la possibilité de minimiser les distorsions harmoniques et d'obtenir une forme plus propre.

Deuxièmement pour $P=7$

La commande linéaire par modulation des rapports cycliques. Impose une dynamique d'équilibrage rapide pour les tensions flottantes 30 fois plus faible que celui en boucle ouverte (MLI-ST), Également elle améliore le signal de la tension de sortie, le courant de charge et protège les interrupteurs de puissance.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Z.Bendjellouli, Contribution à la modalisation d'une cellule solaire. Mémoire de Magistère de l'Université de Bechar, Algérie, 2009.
- [2] S. Bensmail, Contribution à la modélisation des systèmes photovoltaïques. Mémoire de master en systemes électro-énergétique de l'Uninevrsité de Bejaia, Algérie, 2012.
- [3] H. Amar, Propriétés électriques de cellule solaire à base de Sélénium de Cuivre Indium Galium $CuIn(1-x)Ga_xSe_2$ (CIGS). mémoire de magister de l'Université de Biskra, Algérie, 2014..
- [4] A.Lorfan, Constribution à l'étude de l'association d'une source photovoltaïque et d'un filtre actif. Thèse de doctorat de l'Université de Haute-Alasace, France, ..
- [5] S. A, Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau. Thèse magister de l'UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, Algérie, 2012.
- [6] A. Lyes, Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Mémoire de Magister de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2011.
- [7] A. Kara, Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie. Mémoire de master en électrotechnique de l'Université de Setif, Algérie,, 2014.
- [8] K. K. N. Kehloul, Etude comparative d'une cellule photovoltaïque . Mémoire de master en électrotechnique, Université de Bejaia,Algérie, 2012.
- [9] S.ABOUDA, Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : Application aux systèmes de pompage. Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, France, 2015.
- [10] O.GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de Doctorat de l'école Normale Supérieure de Cachan, France, 2002.
- [11] H. ZEMAMOUCHE, Application de la MLI Vectorielle aux onduleurs multiniveaux à base de GTO et d'IGBT, Mémoire Magister, Université de Annaba, Algérie, 2010.
- [12] G.Seguiet, F.Labrique,R.Baussiere « Les convertisseurs de l'électronique de puissance » « Volume 4 »..
- [13] T.A.Meynard, H.Foch, “Multi-level Conversion: High Voltage Choppers and VoltageSource Inverter”, IEEE Power Electronics Specialist Conference, 1992, pp.397-403.
- [14] S.BOUZELMADEN, Etude et Réalisation d'un onduleur sept niveaux en Cascade. Mémoire De Fin D'études De Master Académique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaïa,Algérie, 2012.

BIBLIOGRAPHIE

- [15] S. Hanafi, M.K. Fellah, M. Yaichi, M.F Benkhoris, « Nonlinear feedback decoupling control applied to stacked multicellular converter ». *Rev. Roum. Sci. Techn–Électrotechn. et Énerg*, 59, 1, pp. 97-106, 2014.
- [16] G. Gateau, T. A. Meynard, H. Foch, « Stacked Multicell Converter (SMC): properties and design ». *IEEE Power Electronics Specialists Conference, Vancouver-Canada*, Vol. 3, 2001, pp. 1583 1588..
- [17] G. Gateau, T. A. Meynard, H. Foch, « Stacked Multicell Converter (SMC): topology and control ». *9th European Conference on Power Electronics and Applications*.
- [18] A.M.Lienhardt, G. Gateau, T. A. Meynard, « Stacked Multicell Converter (SMC): reconstruction of flying capacitor voltages », *IEEE Industrial Electronics Conference*, 2005..
- [19] T.A.Meynard, H.Foch, « Multilevel choppers for high voltage applications ». *EPEJ*, Vol (2) n°1, pp-45-55, Mars 1992..
- [20] M. Aimé, « Evaluation et optimisation de la bande passante des convertisseurs statiques : Application aux nouvelles structures multicellulaires ». *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse*, 2003.
- [21] C. Elmetennani, « Commande et optimisation par l'approche hybride d'une chaîne de production photovoltaïque à base d'un convertisseur multicellulaire ». *Mémoire de master, Ecole Nationale Polytechnique El Harrach, Algérie*, 2012.
- [22] A. Chouder, *Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série* . *Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie*, 2010.
- [23] A.Zoghbi, *Commande des onduleurs multiniveaux*, *Mémoire de master de l'Ecole Nationale Polytechnique EL-Harrach, Algérie*, 2013.
- [24] P. Carrere, *Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaires série à IGBT*. *Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France*, 1996.
- [25] O. Tachon, *Commande découplante linéaire des convertisseurs multicellulaires série* . *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France*, 1998.
- [26] D. Ostojic, *A multilevel converter structure for grid connected PV plants*. *Thèse de Doctorat, Université Bologna, Italie*, 2010.
- [27] J. Rodriguez, J. Sheng lai, F. Zheng peng. *Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications*», *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 49, N°4,, 2002.
- [28] T. Meynard, 1992.

ANNEXE

Schémas des simulations dans SIMULINK

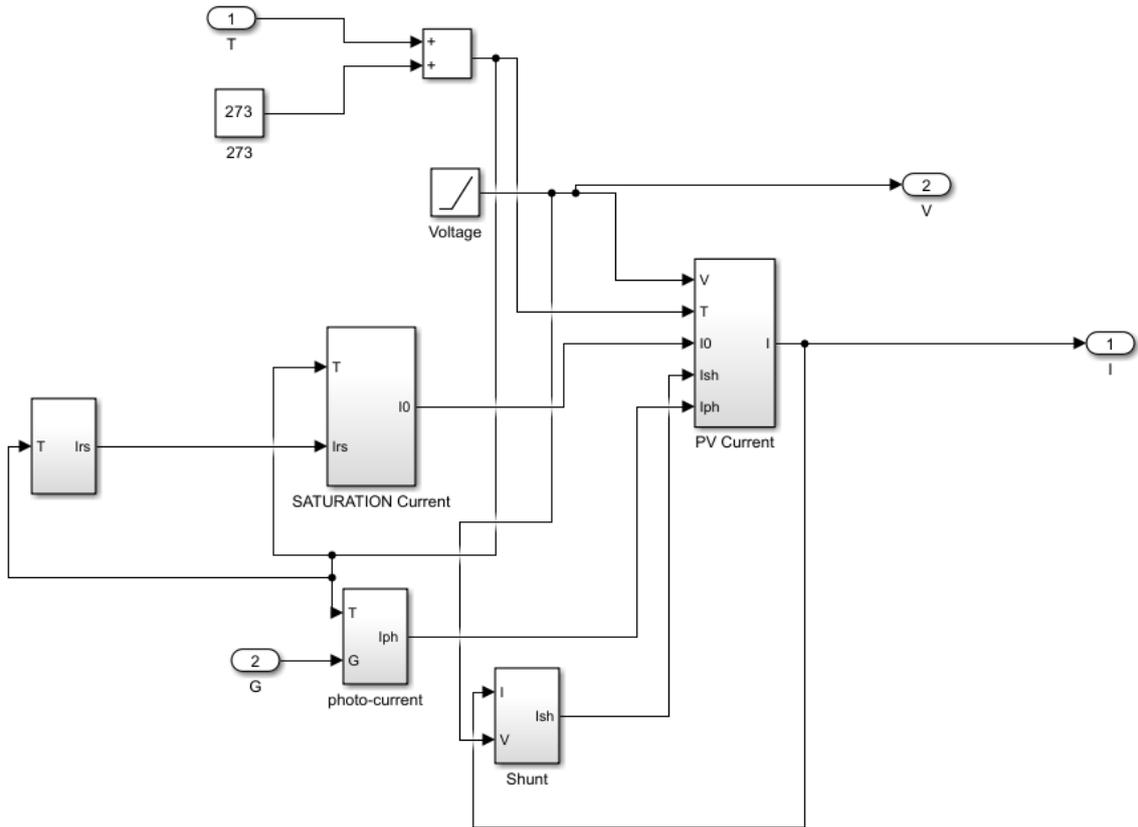


Figure A.1 : schéma SIMULINK du PV

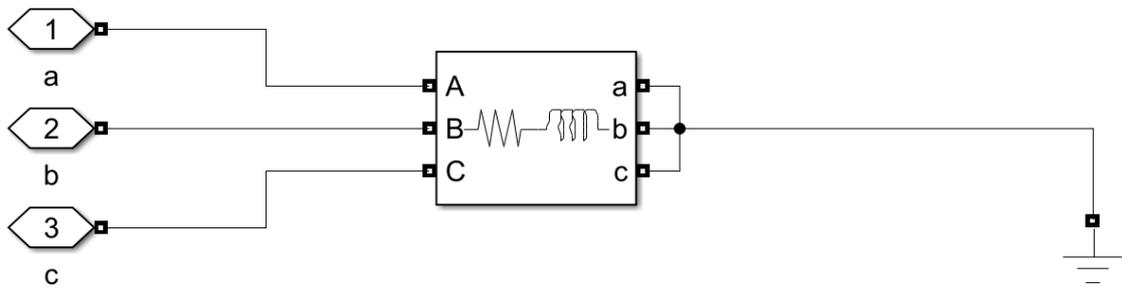


Figure A.2 : schéma SIMULINK de la charge RL

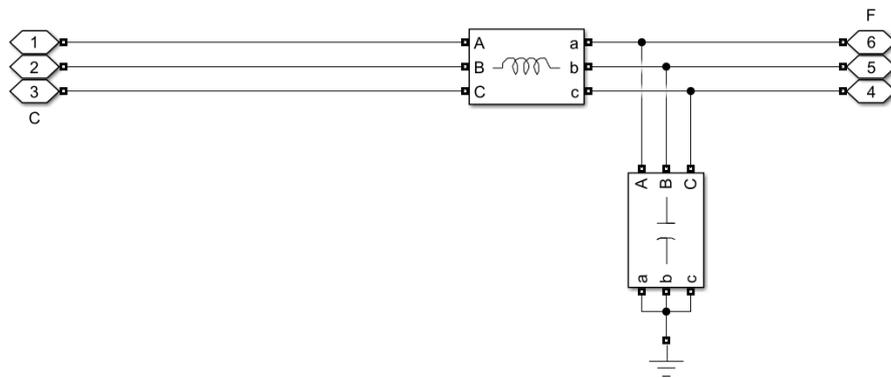


Figure A.3 : schéma SIMULINK du filtre LC

Programme Mppt utilisé :

```
function D = fcn(vpv, ipv)
    Dinit = 0.4;
    Dmax = 0.9;
    Dmin = 0.1;
    deltaD = 20e-6;

    persistent Vold Pold Dold;
    dataType = 'double';

    if isempty(Vold)
        Vold = 0;
        Pold = 0;
        Dold = Dinit;
    end

    P = vpv * ipv;

    dV = vpv - Vold;
    dP = P - Pold;

    if dP ~= 0
        if dP < 0
            if dV < 0
                D = Dold - deltaD;
            else
                D = Dold + deltaD;
            end
        else
            if dV < 0
                D = Dold + deltaD;
            else
                D = Dold - deltaD;
            end
        end
    else
        D = Dold;
    end

    if D >= Dmax || D <= Dmin
        D = Dold;
    end
end
```

```

end

Dold = D;
Vold = vpv;
Pold = P;
end
    
```

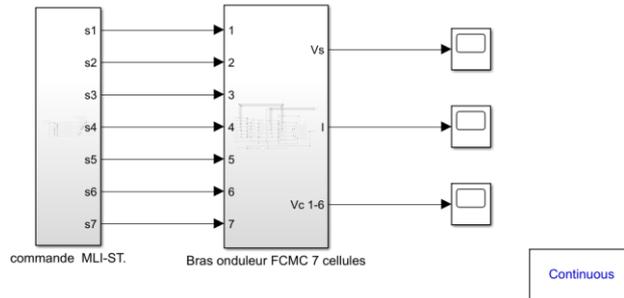


Figure A.4 : Bras onduleur FCMC 7 cellules, alimentant une charge R-L, commandé par MLI-ST.

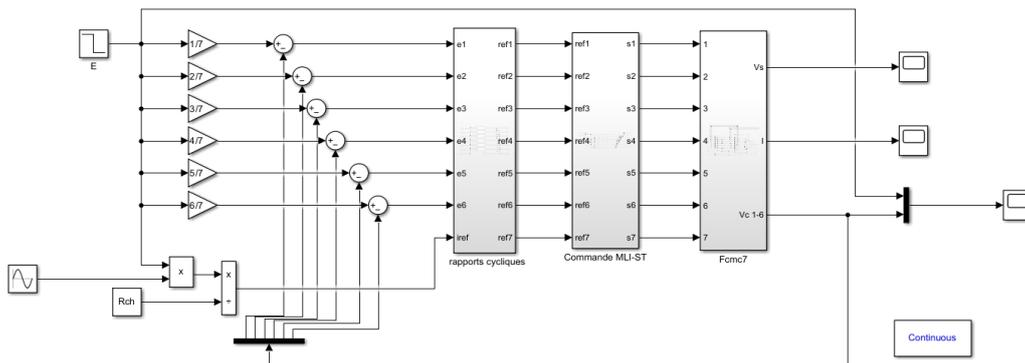


Figure A.5 : Bras onduleur FCMC 7 cellules, alimentant une charge R-L, contrôlé par la commande par modulation des rapports cycliques.

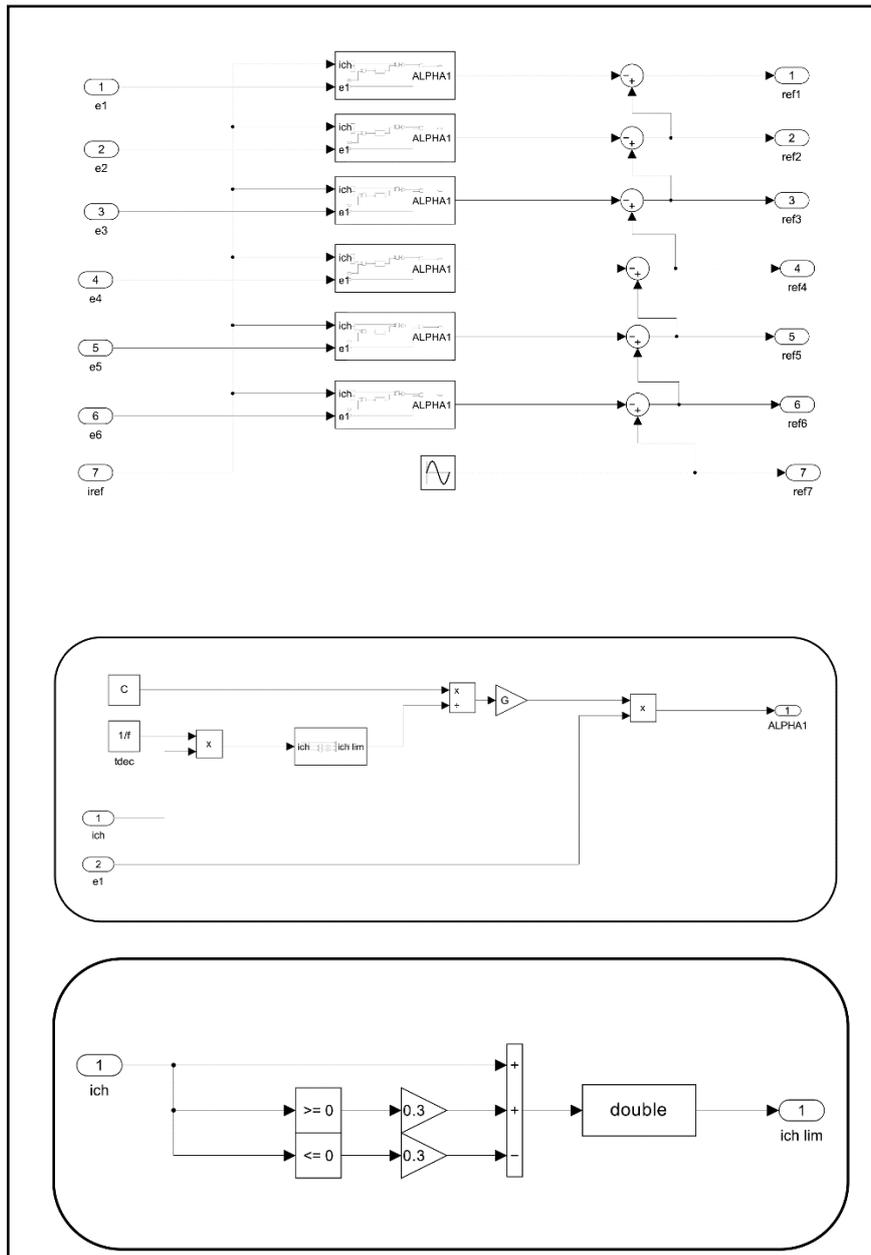


Figure A.6 Bloc calculs des rapports cycliques.

