

N° Ordre...../FHC/UMBB/2024

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE 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

Charif Oussama

Et

Lachibi Fayçal

Filière : Hydrocarbures

Spécialité : Electricité Industrielle

Thème

Commande des onduleurs multicellulaires séries associées au systèmes PV

Devant le jury:

BENDJEGHABA	OMAR	Pr	UMBB	Président
BOUROUROU	Fares	MAB	UMBB	Examinateur
KHELIFI	Fateh	MAA	UMBB	Encadrant

Année Universitaire : 2023/2024



Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie
Département : Automatisation et Electrification des procédés.
Filière : Hydrocarbures.
Spécialité : Génie Electrique : Electricité Industrielle.

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

Commande des onduleurs multicellulaires séries associes au systèmes PV

Présenté par :
Charif Oussama
Lachibi Fayçal

Avis favorable de l'encadrant :
Nom et prénom : KHELIFI Fateh
signature :

Avis favorable du Président du jury
Nom et Prénom :

Signature :

Cachet et signature

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

Mes parents, que Dieu les protège.

Mon frère que Dieu lui accorde la réussite.

Tous mes amis.

-Oussama-

Je dédie ce travail à :

Mes chers parents, en remerciement pour votre encouragement.

Tous mes frères et sœurs qui ont toujours été une source d'inspiration.

Mes chers amis.

-Fayçal-

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout DIEU Allah le tout puissant, qui nous a donné la volonté, la santé et la patience pour arriver au bout de nos études.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus sincères à notre encadreur, M. Khelifi Fateh, pour ses conseils, sa présence, sa disponibilité, et sa patience.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré de notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Enfin, nous tenons à remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

Sommaire

Contenue

:ملخص.....	i
Abstract:	i
Résumé :	i
Liste des abréviations	ii
Liste des figures	iii
Listes des tableaux	vi
Introduction Générale.....	1
Chapitre I. Etude et Simulation Des Systèmes Photovoltaïques	4
I.1. Introduction	4
I.2. La production de l'énergie électrique à travers les panneaux photovoltaïques :.....	4
I.2.1. Le principe de conversion photovoltaïque :	4
I.2.2. La cellule photovoltaïque :	5
I.2.2.1. Structure Physique de la cellule photovoltaïque :.....	6
I.2.2.2. Les différents types de cellule solaire :.....	6
I.2.2.3 Caractéristique de la cellule photovoltaïque :	8
I.2.3. Le générateur photovoltaïque :	10
I.2.4. Etages d'adaptation :	12
I.2.5. La méthode de command MPPT :	13
I.2.5.1. La méthode « Perturb and observe P&O » :	13
I.2.6. Les différents types de systèmes photovoltaïques :	15
I.2.6.1. Les systèmes autonomes (Isolé) :	15
I.2.6.2. Les Systèmes raccordés au réseau :	16
I.2.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :	17
I.3. Simulation du module photovoltaïque Soltech 1STH-215P :	18
I.3.1. L'impact de température et de l'éclairement sur la performance de module PV :..	19

I.3.2.	Simulation du module PV avec la commande MPPT :	21
I.3.2.1.	Détermination des paramètres d'hacheur survolteur (Boost) :	22
I.3.2.2.	Résultats de simulation :	23
I.3.2.3.	Interprétation des résultats :	24
I.4.	Conclusion	24
Chapitre II.	Les convertisseurs statiques	26
II.1.	Introduction :	26
II.2.	Généralités sur les convertisseurs statiques :	26
II.3.	Les composants électronique semi-conducteur :	27
II.3.1.	La Diode :	27
II.3.2.	Le Thyristor :	27
II.3.3.	Le Transistor :	28
II.3.4.	Critères de choix des composants semi-conducteur :	29
II.4.	Les hacheurs :	30
II.4.1.	Les différents types d'hacheurs :	30
II.5.	Les onduleurs :	31
II.5.1.	Principe de fonctionnement :	32
II.5.2.	Classification des onduleurs :	32
II.5.2.1.	Selon la grandeur transformée :	32
II.5.2.2.	Selon le mode de commutation et les interrupteurs :	32
II.5.3.	Les différentes topologies d'onduleur de tension :	33
II.5.3.1.	Les onduleurs monophasés à demi-pont :	33
II.5.3.2.	Les onduleurs monophasés en pont H :	33
II.5.3.3.	Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu.....	34
II.5.3.4.	Les onduleurs triphasés :	34
II.6.	Introduction aux onduleurs multi-niveaux :	35
II.7.	Généralités sur les topologies d'onduleurs multi-niveaux :	36

II.7.1.	L'Onduleur a structure NPC :	36
II.7.2.	L'onduleur à condensateur flottant FCMC :	36
II.7.3.	L'Onduleur en cascade :	37
II.8.	Etude théorique des onduleurs multicellulaires :	38
II.8.1.	Les onduleurs multicellulaires superposés SMC :	38
II.8.2.	Les onduleurs multicellulaires parallèle PMC :	39
II.8.3.	Les onduleurs multicellulaire séries FCMC :	39
II.8.3.1.	Dynamique idéale des tensions des condensateurs flottants :	40
II.9.	Modélisation des onduleurs multicellulaire séries :	41
II.9.1.	Modèle aux valeurs instantanés :	41
II.9.1.1.	Formulation générale :	42
II.9.1.2.	Fonctionnement onduleur :	42
II.10.	Avantages des onduleurs multicellulaire séries :	44
II.11.	Stratégies de commande des onduleurs multicellulaire séries :	44
II.11.1.	Commande en boucle ouverte :	44
II.11.1.1.	Commande par modulation de largeur d'impulsion :	45
II.11.2.	Commande en boucle fermé :	48
II.11.2.1.	Commande par mode de glissement :	49
II.12.	Conclusion :	53
Chapitre III. Simulation Des Onduleurs Multicellulaires Séries à MLI :		55
III.1.	Introduction :	55
III.2.	Paramètres de simulation :	55
III.3.	Onduleur à trois cellules :	55
III.3.1.	Structure :	55
III.3.2.	La commande :	56
III.3.3.	Résultats de simulation :	59
III.3.4.	Interprétation des résultats :	62

III.4.	Onduleur à cinq cellules :	64
III.4.1.	Structure :	64
III.4.2.	La commande :	64
III.4.3.	Résultats de simulation :	67
III.4.4.	Interprétation des résultats :	70
III.5.	Equilibrage des tensions flottantes :	71
III.5.1.	Paramètres de simulation :	72
III.5.2.	Résultats de simulation :	72
III.5.2.1.	Onduleur à 3 cellules :	72
III.5.2.2.	Onduleur à 5 cellules :	74
III.5.3.	Interprétation des résultats :	74
III.6.	Conclusion :	75
Chapitre IV. Application de la commande par mode glissant sur les onduleurs multicellulaires séries.....		77
IV.1.	Introduction :	77
IV.2.	Simulation de l'ensemble GPV + Onduleur :	77
IV.2.1.	Les paramètres de simulation :	77
IV.2.2.	L'onduleur à 3 cellules :	78
IV.2.3.	L'onduleur à 5 cellules :	80
IV.2.4.	Interprétation des résultats :	83
IV.3.	Commande en boucle fermée pour l'onduleur en utilisant la commande par mode de glissement :	84
IV.3.1.	Résultats de simulation :	86
IV.3.1.1.	L'onduleur à 3 cellules :	86
IV.3.1.2.	L'onduleur à 5 cellules :	87
IV.3.2.	Interprétation des résultats :	88
IV.4.	Conclusion :	89
Conclusion générale		91

Références bibliographiques	93
-----------------------------------	----

ملخص:

تركز أطروحة الماستر هذه على دراسة أداء المبدلات المتعددة المستويات من النوع "متعدد الخلايا المربوطة على التسلسل" التي تتغذى بالطاقة الموفرة من قبل الأنظمة الكهروضوئية. تقدم الأطروحة الجوانب الأساسية للخلايا الكهروضوئية وتبين كذلك كيفية تحسين الأداء عبر تقنية MPPT. تستكشف الدراسة أيضا استراتيجيات التحكم المختلفة المستخدمة لتحسين كفاءة واستقرار تحويل الطاقة باستخدام المبدلات المتعددة الخلايا المتسلسلة. تم إجراء عدة محاكاة لتقييم أداء هذه المبدلات في ظروف تشغيل مختلفة. تستكشف الأطروحة كذلك تطبيق استراتيجية التحكم بالوضع الانزلاقي على المحولات المتعددة الخلايا ذات 4 مستويات و 6 مستويات.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الطاقة الشمسية، محولات متعددة الخلايا، تقنية MPPT، تحويل الطاقة، استراتيجيات التحكم، التحكم بالوضع الانزلاقي، كفاءة تحويل الطاقة، الطاقات المتجددة.

Abstract:

This master thesis examines the performance of series multicellular inverters powered by photovoltaic systems. It presents the fundamental aspects of photovoltaic cells as well as optimization through the MPPT method. The study explores different control methods used to improve the efficiency and stability of power conversion with series multicellular inverters. Several simulations are performed to evaluate the performance of the inverters under different operating conditions. The thesis also explores the application of the sliding mode control method to 4-level and 6-level multicellular inverters.

Key words: photovoltaic systems, multicellular inverters, MPPT method, power conversion, control techniques, sliding mode control, energy efficiency, renewable energy.

Résumé :

Cette mémoire de master examine les performances des onduleurs multiniveaux de type multicellulaire séries alimentés par des systèmes photovoltaïques. Elle présente les aspects fondamentaux des cellules photovoltaïques ainsi que l'optimisation via la méthode MPPT. L'étude présente les différentes stratégies de commande utilisées pour améliorer l'efficacité et la stabilité de la conversion de puissance avec les onduleurs multicellulaire séries. Plusieurs simulations sont réalisées pour évaluer les performances des onduleurs dans différentes conditions de fonctionnement. La mémoire présente également l'application de la méthode de contrôle par mode glissant aux onduleurs multicellulaires à 4 et 6 niveaux.

Mots-clés : systèmes photovoltaïques, onduleurs multicellulaire, méthode MPPT, conversion de puissance, techniques de commande, commande par mode glissant, efficacité énergétique, énergies renouvelables.

Liste des abréviations

A_{ref} : Amplitude de signal de référence.

A_p : Amplitude de signal de porteuse.

C_{aux} : Condensateurs de circuit auxiliaire (F).

C_f : Condensateurs flottantes (F).

E (ou v_{dc}) : La tension continue d'entrée de l'onduleur.

F_f : Facteur de forme.

f_r : Fréquence de signal de référence.

f_p : Fréquence de signal de porteuse.

FCMC: Flying capacitor multi-level converter.

G : L'éclairement. (W/m^2)

I_{cc} : Courant de court-circuit. (A)

I_d : Courant de diode (A).

I_{out} : Courant de sortie de cellule PV (A).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

L_{aux} : Inductance de circuit auxiliaire (H).

L_{ch} : Inductance de la charge (H).

M_f : Le taux de modulation de fréquence.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

N : Le nombre de niveaux de l'onduleur.

P : Le nombre de porteuse (ou cellule).

R_{aux} : Résistance de circuit auxiliaire (Ohm).

R = Indice de régulation.

R_{ch} : Résistance de charge. (Ohm)

T : Température. ($^{\circ}C$)

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

Liste des figures

Figure I-1 Système Photovoltaïque	4
Figure I-2 L'effet photovoltaïque	5
Figure I-3 Structure d'une cellule photovoltaïque.	6
Figure I-4 Les Différents types de cellules solaire	8
Figure I-5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	8
Figure I-6 Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule (PV)	9
Figure I-7 Caractéristiques résultantes d'un groupement de S cellules en série.	11
Figure I-8 Caractéristiques résultant d'un groupement de p cellules en parallèle.	12
Figure I-9 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.	12
Figure I-10 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.	13
Figure I-11 Courbe P-V d'un panneau PV pour illustrer le principe de méthode P&O. [1]	14
Figure I-12 Algorithme de la méthode P&O.	14
Figure I-13 Système photovoltaïque autonome à couplage direct.	15
Figure I-14 Système photovoltaïque autonome avec stockage.	16
Figure I-15 Système photovoltaïque raccordé au réseau.	17
Figure I-16 Bloc Simulink pour l'obtention des courbes I-V et P-V.	19
Figure I-17 Caractéristique P-V du module pour des différentes valeurs de l'éclairement.	19
Figure I-18 Caractéristique I-V du module pour des différentes valeurs de température.	20
Figure I-19 Caractéristique P-V du module pour des différentes valeurs d'éclairement.	20
Figure I-20 Caractéristique I-V du module pour des différentes valeurs d'éclairement.	21
Figure I-21 Bloc Simulink d'un module PV commandé par MPPT.	21
Figure I-22 Bloc Simulink de command MPPT.	22
Figure I-23 Courbes $V_{pv}(t)$ et $I_{pv}(t)$. (Courant et tensio de GPV)	23
Figure I-24 Courbes $V(t)$ et $I(t)$. (Courant et tension de sortie)	23
Figure I-25 Courbe $P(t)$. (Puissance délivrée par le GPV)	24
Figure II-1 Les différent types de convertisseurs statiques	26
Figure II-2 Symbole et courbe caractéristique d'une diode.	27
Figure II-3 Thyristor SCR.	28
Figure II-4 Thyristor GTO.	28
Figure II-5 Symbole de transistor BJT à jonction NPN et PNP	28
Figure II-6 Symbole d'un transistor MOSFET à canal P et à canal N.	29
Figure II-7 Symbole de transistor IGBT et son circuit équivalent	29
Figure II-8 Schéma d'un hacheur séries (Buck).	30
Figure II-9 Schéma d'un hacheur parallèle (Boost).	31
Figure II-10 Schéma d'un hacheur survolteur-dévolteur (Buck-boost).	31
Figure II-11 Schéma de cicuit d'un onduleur monophasé de tension à demi-pont.	33
Figure II-12 Scéma de circuit d'un onduleur monophasé en pont H.	33
Figure II-13 Schéma de circuit d'un onduleur Push-Pull.	34

Figure II-14 Schéma de circuit d'un onduleur triphasé alimentant une charge R.	34
Figure II-15 Topologies principales des onduleurs multi-niveaux	35
Figure II-16 Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux alimentant une charge R.	36
Figure II-17 Bras d'onduleur FC à 3 niveaux alimentant une charge R.	37
Figure II-18 Onduleur en cascade.	37
Figure II-19 Onduleur SMC Px2.	38
Figure II-20 Onduleur PMC à P cellule de commutation.	39
Figure II-21 Bras multicellulaire à P cellule de commutation.	39
Figure II-22 Bras d'onduleur multicellulaire séries a deux cellule.	40
Figure II-23 Dynamique idéale des tensions flottantes.	41
Figure II-24 Bras onduleur à P cellules, à point milieu capacitif, associé à une charge R-L.	42
Figure II-25 Principde de MLI.	45
Figure II-26 Schéma synoptique de la commande en MLI.	46
Figure II-27 La modulation de largeur d'impulsions multiples.	47
Figure II-28 MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.	47
Figure II-29 La modulation sinusoïdale modifiée.	48
Figure II-30 représentation de la fonction sign.	52
Figure II-31 Modes de fonctionnement.	52
Figure III-1 Bras d'onduleur à 3 cellule.	55
Figure III-2 Bloc de commande d'un bras d'onduleur à 3 cellules	56
Figure III-3 Représentation graphique des sequence de fonctionnement d'onduleur à 3 cellules.	57
Figure III-4 Signal de référence et signaux de porteuses (à 50Hz) pour l'onduleur à 3 cellule.	58
Figure III-5 Signaux de commande des interrupteurs superieur.	58
Figure III-6 Signaux de commande des interrupteurs inférieur.	58
Figure III-7 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 45$ pour l'onduleur à 3 cellule.	59
Figure III-8 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.4$)	60
Figure III-9 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 45$ d'onduleur à 3 cellule.	60
Figure III-10 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.9$)	60
Figure III-11 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 100$ d'onduleur à 3 cellule.	61
Figure III-12 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.4$)	61
Figure III-13 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 100$ pour l'onduleur à 3 cellule.	62
Figure III-14 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.9$)	62
Figure III-15 Bras d'onduleur à 5 cellule.	64
Figure III-16 Bloc de commande d'un bras d'onduleur à 5 cellules	64
Figure III-17 Signal de référence et signaux de porteuses (à 50Hz) pour l'onduleur à 5 cellule	66
Figure III-18 Signaux de commande des interrupteurs superieur.	66
Figure III-19 Signaux de commande des interrupteurs inferieur.	67
Figure III-20 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 45$ pour l'onduleur à 5 cellule.	67
Figure III-21 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.4$)	68
Figure III-22 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 45$ pour l'onduleur à 5 cellule.	68

Figure III-23 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.9$)	68
Figure III-24 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 100$ pour l'onduleur à 5 cellule.	69
Figure III-25 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.4$)	69
Figure III-26 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 100$ pour l'onduleur à 5 cellule.	70
Figure III-27 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.9$)	70
Figure III-28 Bras d'onduleur à 3 cellules avec circuit auxiliaire.	72
Figure III-29 Tension d'alimentation et tension flottantes sans circuit auxiliaire (3 cellules).	73
Figure III-30 Tension d'alimentation et tension flottantes avec circuit auxiliaire (3 cellules).	73
Figure III-31 Tension d'alimentation et tension flottantes sans circuit auxiliaire (5 cellules).	74
Figure III-32 Tension d'alimentation et tension flottantes avec circuit auxiliaire (5 cellules).	74
Figure IV-1 Ensemble GPV + Onduleur sous forme de Sub-système	77
Figure IV-2 Tension simple et composé sans circuit auxiliaire. (3 cellules)	78
Figure IV-3 Courant sans circuit auxiliaire. (3 cellules)	78
Figure IV-4 THD de courant sans circuit auxiliaire. (3 cellules)	78
Figure IV-5 Tension flottantes sans circuit auxiliaire. (3 cellules)	79
Figure IV-6 Tension simple et composé avec circuit auxiliaire. (3 cellules)	79
Figure IV-7 Courant avec circuit auxiliaire. (3 cellules)	79
Figure IV-8 THD de courant avec circuit auxiliaire. (3 cellules)	80
Figure IV-9 Tension flottantes avec circuit auxiliaire. (3 cellules)	80
Figure IV-10 Tension simple et composé sans circuit auxiliaire. (5 cellules)	80
Figure IV-11 Courant sans circuit auxiliaire. (5 cellules)	81
Figure IV-12 THD de courant sans circuit auxiliaire. (5 cellules)	81
Figure IV-13 Tension flottantes sans circuit auxiliaire. (5 cellules)	81
Figure IV-14 Tension simple et composé avec circuit auxiliaire. (5 cellules)	82
Figure IV-15 Courant avec circuit auxiliaire. (5 cellules)	82
Figure IV-16 THD de courant avec circuit auxiliaire. (5 cellules)	82
Figure IV-17 Tension flottantes avec circuit auxiliaire. (5 cellules)	83
Figure IV-18 Schéma bloc de la commande par mode de glissement d'un convertisseur multicellulaire série.	85
Figure IV-19 Bras d'onduleur FCMC 3 cellules, alimentant une charge R-L, contrôlé par la commande par mode de glissement.	86
Figure IV-20 Bras d'onduleur FCMC 5 cellules, alimentant une charge R-L, contrôlé par la commande par mode de glissement.	86
Figure IV-21 Evolution des tension flottants. (3 cellules)	86
Figure IV-22 Evolution du courant de charge et son THD. (3 cellules)	87
Figure IV-23 Evolution des tensions flottantes. (5 cellules)	87
Figure IV-24 Courant de charge et son THD. (5 cellules)	88

Listes des tableaux

Tableau I-1 Caractéristique de module PV Soltech 1STH-215P.....	18
Tableau II-1 Comparaison entre MOSFET et IGBT	30
Tableau III-1 Paramètres de simulation des onduleurs à 3 et à 5 cellules.....	55
Tableau III-2 Séquence de fonctionnement des interrupteurs d'onduleur à 3 cellules.....	56
Tableau III-3 Les valeurs de THD% obtenu par simulation de l'onduleur à 3 cellules.....	63
Tableau III-4 Séquence de fonctionnement des interrupteurs d'onduleur à 5 cellules.....	66
Tableau III-5 Les valeurs de THD% obtenu par simulation de l'onduleur à 3 et à 5 cellules.....	71
Tableau III-6 Paramètres de simulation pour équilibrage des tension flottantes des onduleurs à 3 et à 5 cellules.....	72
Tableau IV-1 Paramètres utilisé dans le cas de la commande par mode glissant.....	85

Introduction Générale

Introduction Générale

Confronté à la nécessité de réduire sa dépendance aux énergies fossiles et d'atténuer le changement climatique, le monde opère une transition majeure vers des sources d'énergie renouvelables et durables. L'énergie solaire se démarque par son abondance et son caractère inépuisable, offrant une solution unique pour répondre de façon pérenne et efficace aux besoins énergétiques mondiaux.

A l'aide de l'effet photovoltaïque, les systèmes (PV) convertissent la lumière du soleil directement en électricité grâce à des panneaux solaires, des dispositifs de montage, un système de charge et un onduleur. Ils absorbent le rayonnement solaire et libèrent des électrons, créant un courant électrique continu (DC) qui est converti en courant alternatif (AC) par l'onduleur pour un usage domestique ou une injection dans le réseau électrique. Il existe différents types de systèmes photovoltaïques, notamment les systèmes autonomes et hybrides connectés au réseau.

Avec les progrès technologiques, les convertisseurs statiques sont devenus essentiels pour optimiser la conversion d'énergie dans les systèmes (PV). L'invention des convertisseurs multiniveaux est l'une des grandes avancées dans ce domaine. Par rapport aux convertisseurs traditionnels à deux niveaux, ils offrent des avantages considérables, notamment une meilleure qualité de tension de sortie, une réduction des harmoniques, une plus grande efficacité énergétique et une meilleure fiabilité. Cette innovation a amélioré la performance globale et la stabilité des installations solaires tout en offrant de nouvelles perspectives pour l'intégration efficace des systèmes (PV) dans les réseaux électriques.

Parmi les structures des convertisseurs multiniveaux, les convertisseurs multicellulaires se démarquent par leur conception modulaire et leur capacité à réduire les contraintes de tension sur les composants. Les convertisseurs multicellulaires utilisent plusieurs cellules en série pour générer des niveaux de tension supplémentaires, améliorant ainsi la qualité de la sortie AC et réduisant les pertes de commutation. Cette approche permet une meilleure adaptation aux variations des conditions de charge et des contraintes de tension, tout en offrant une flexibilité accrue dans la conception et le contrôle des systèmes de conversion d'énergie.

Il est crucial de réguler les tensions des condensateurs afin que le convertisseur fonctionne correctement. Un contrôle efficace des tensions permet de maintenir les niveaux de tension requis dans les cellules du convertisseur, ce qui contribue à réduire les pertes d'énergie et à améliorer la fiabilité du système dans son ensemble. Par conséquent, la conception et la mise en œuvre de

stratégies de commande efficaces sont essentielles pour maximiser l'efficacité et la durabilité des convertisseurs multiniveaux.

Ce travail de recherche vise à étudier et simuler un onduleur multicellulaire série convertissant une tension continue provenant d'un système photovoltaïque pour alimenter des charges en courant alternatif. L'objectif est d'analyser en profondeur les performances de cet onduleur multicellulaire série, en mettant l'accent sur la régulation des tensions, la gestion de la puissance et la fiabilité du système. En combinant une approche théorique rigoureuse avec des simulations avancées.

Ce travail sera organisé comme suivant :

- Le premier chapitre se concentre sur les systèmes photovoltaïques. Il se compose d'une partie théorique où nous discutons de la production d'électricité à partir des systèmes solaires, de la cellule photovoltaïque elle-même : son fonctionnement et sa composition, des différents types de systèmes solaires, ainsi que d'une partie consacrée à la simulation d'un module photovoltaïque et à son contrôle à l'aide du MPPT.
- Le deuxième chapitre est une étude théorique approfondie des convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes solaires, détaillant leurs fonctionnement, leurs conceptions et présentant également les différentes stratégies de commande.
- Le troisième chapitre est consacré à une simulation en boucle ouverte utilisant MLI-ST d'onduleurs multicellulaires à 3 et 5 cellules, une comparaison de leurs performances dans différentes conditions. Il traite aussi la problématique de l'équilibrage des tensions flottantes.
- Dans le quatrième chapitre, nous réaliserons une simulation où nous alimenterons les onduleurs à 3 et à 5 cellules avec le système photovoltaïque du premier chapitre et comparerons les résultats. Nous effectuerons aussi une simulation de commande en boucle fermée pour eux en utilisant la commande par mode glissant.

On termine ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre I

Etude et Simulation Des Systèmes Photovoltaïques

Chapitre I. Etude et Simulation Des Systèmes Photovoltaïques

I.1. Introduction

Ce chapitre présente les Systèmes Photovoltaïques (PV). Nous commencerons par une présentation des notions fondamentales relatives à la génération d'électricité à l'aide de systèmes photovoltaïques, en mettant en lumière leur composition, leur fonctionnement et les différents types disponibles. Par la suite, nous aborderons une simulation d'un modèle de système photovoltaïque, mettant en œuvre la technique de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).

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

L'énergie solaire photovoltaïque résulte de la conversion directe d'une portion du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion est réalisée à l'aide de modules photovoltaïques constitués de cellules solaires ou de photopiles conçues avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du spectre visible. Ces matériaux opèrent la transformation de l'énergie solaire en électricité de manière efficace. [1]

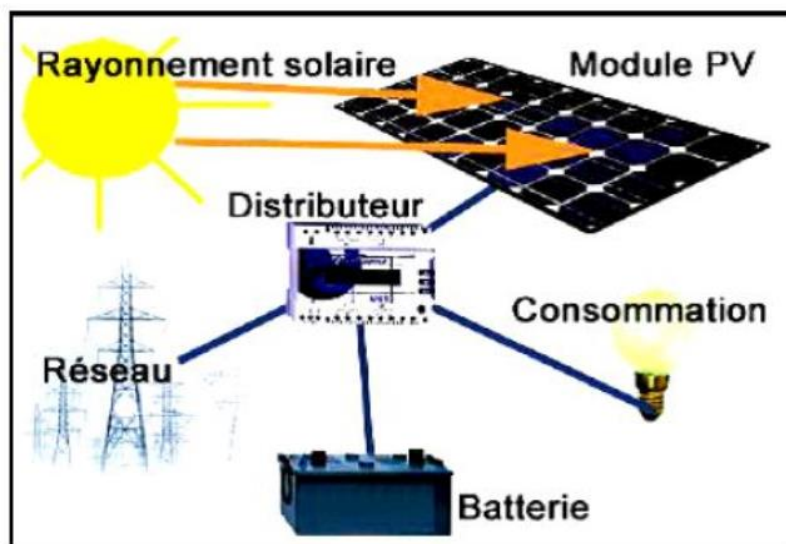


Figure I-1Système Photovoltaïque

I.2.1. Le principe de conversion photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque, découvert par le physicien A. Becquerel en 1839, est le processus par lequel les matériaux semi-conducteurs convertissent directement la lumière du soleil en électricité.

Ces matériaux se composent de deux régions : l'une dopée avec un excès d'électrons (de type N) et l'autre dopée avec un déficit d'électrons (de type P). Lorsque ces régions entrent en contact, une jonction P-N se forme. Cette jonction crée une zone de transition où les électrons de la région N peuvent combler les trous de la région P. En conséquence, un gradient de charges électriques se forme, établissant un champ électrique à travers la jonction.

Les photons incidents du soleil interagissent avec les électrons libres et les électrons de valence du matériau semi-conducteur, transférant de l'énergie à ces électrons. Lorsque l'énergie des photons dépasse la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur, les électrons de la bande de valence sont excités vers la bande de conduction, créant ainsi des paires électron-trou. Dans une cellule solaire, la jonction P-N facilite la séparation et la collecte des porteurs de charge générés par cette interaction. Les électrons libérés dans la région N sont repoussés par le champ électrique de la jonction vers la région P, tandis que les trous restent dans la région P. Lorsque la cellule solaire est connectée à un circuit externe, les électrons se déplacent vers la région P et les trous vers la région N, créant ainsi un flux de courant électrique.[2]

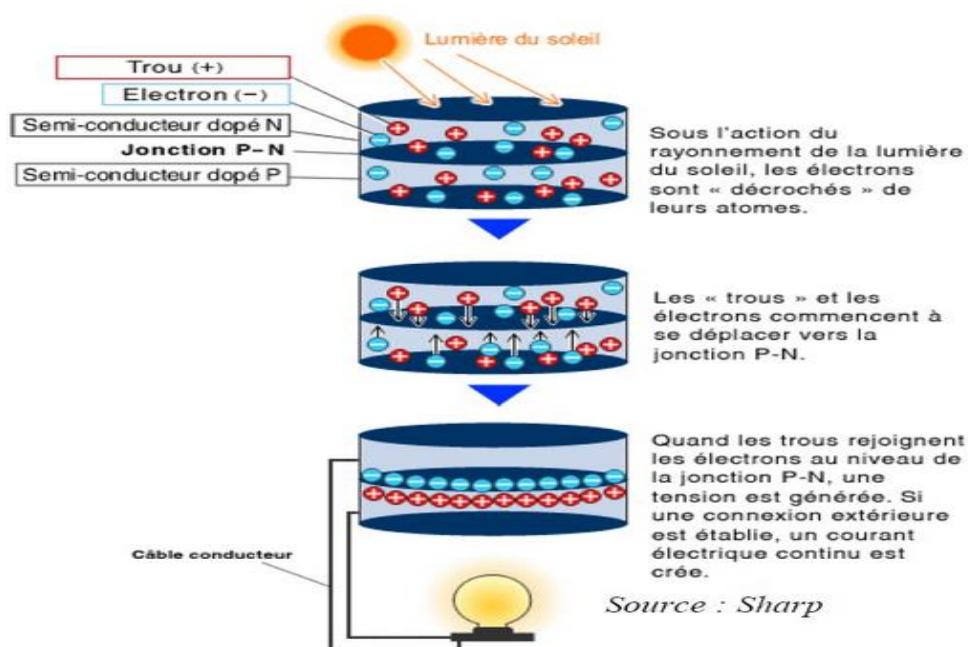


Figure I-2 L'effet photovoltaïque

I.2.2. La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue

est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

I.2.2.1. Structure Physique de la cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est principalement construite avec du silicium, qui peut se présenter sous différentes formes cristallines.

La cellule est constituée de deux couches de silicium dopées différemment :

- ✚ La couche supérieure est composée de silicium dopé N. Le dopage N permet d'ajouter des électrons libres au silicium, ce qui lui donne une charge négative.
- ✚ La couche inférieure est composée de silicium dopé P. Le dopage P permet de retirer des électrons libres au silicium, ce qui lui donne une charge positive.

La jonction entre les régions N et P est essentielle au fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Des contacts électriques transparents, une couche antireflet pour une meilleure absorption des photons, et une couche de verre pour protéger contre les intempéries, complètent la structure de la cellule photovoltaïque.[3]

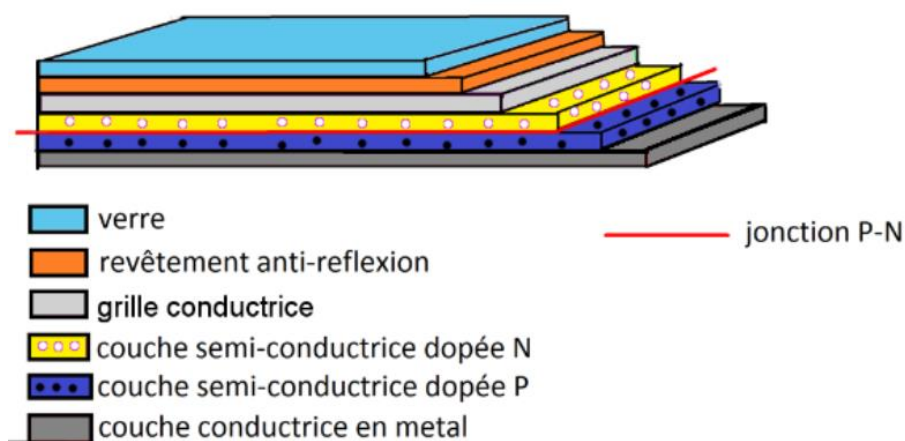


Figure I-3 Structure d'une cellule photovoltaïque.

I.2.2.2. Les différents types de cellule solaire :

Il existe trois types principaux de cellules solaires : monocristalline, polycristalline et amorphe.

A. Les cellules monocristallines :

Les cellules solaires monocristallines se distinguent par leur composition de cristaux hautement purs, obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. Dotées d'un rendement remarquable, oscillant entre 17 et 20 %, ces cellules génèrent une puissance allant de 170 à 200 Wc par m².

Actuellement, les cellules de type « Al-BSF » (Aluminium Back Surface Field) prédominent, mais la transition vers des cellules « PERC » (Passivated Emitter and Rear Cell) permettra bientôt d'atteindre un rendement d'environ 23 %. Par ailleurs, les cellules à hétérojonctions ouvrent la voie à des rendements encore plus élevés, pouvant atteindre jusqu'à 26 % en laboratoire. Toutefois, malgré leur efficacité exceptionnelle, les cellules monocristallines sont également associées à un coût élevé et à un rendement relativement faible en cas d'éclairement réduit [4].

B. Les cellules polycristallines :

Les cellules solaires polycristallines sont fabriquées à partir de silicium en fusion refroidi dans des creusets. Ce processus engendre la formation de cristaux orientés de manière irrégulière, ce qui confère aux cellules leur aspect caractéristique de teinte bleutée et de motifs générés par les cristaux.

Bien que leur rendement soit légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, variant entre 16 et 18 %, elles offrent néanmoins une puissance allant de 160 à 180 Wc par m². Les cellules polycristallines demeurent très répandues en raison de leur rapport performance/prix attractif par rapport à leurs homologues monocristallins. Malgré cette popularité, elles présentent également un rendement relativement faible en cas d'éclairement réduit, constituant ainsi un inconvénient notable [4].

C. Les cellules amorphes :

Le silicium amorphe est une alternative aux cellules solaires cristallines, se caractérisant par sa structure désordonnée et non cristalline. Contrairement aux cellules cristallines, le silicium amorphe n'est pas soumis au processus de transformation en « wafers » et présente donc une méthode de fabrication moins énergivore. Ces cellules affichent un rendement global moins élevé, oscillant entre 6 et 7 %, ce qui correspond à une puissance de 60 à 70 Wc/m².

Cependant, malgré leur rendement inférieur, les cellules amorphes présentent divers avantages significatifs. Elles sont moins coûteuses à produire, nécessitent moins de matériau semi-conducteur, et sont moins polluantes lors de la fabrication. De plus, les panneaux amorphes sont capables de fonctionner efficacement même sous un faible éclairement, et ils sont moins sensibles à l'ombrage et aux variations de température. Leur conception flexible permet également la

création de panneaux souples et légers. Cependant, ces avantages sont contrebalancés par un rendement global plus faible, une performance réduite en cas d'éclairement direct, et une diminution de la performance avec le temps plus importante [4].

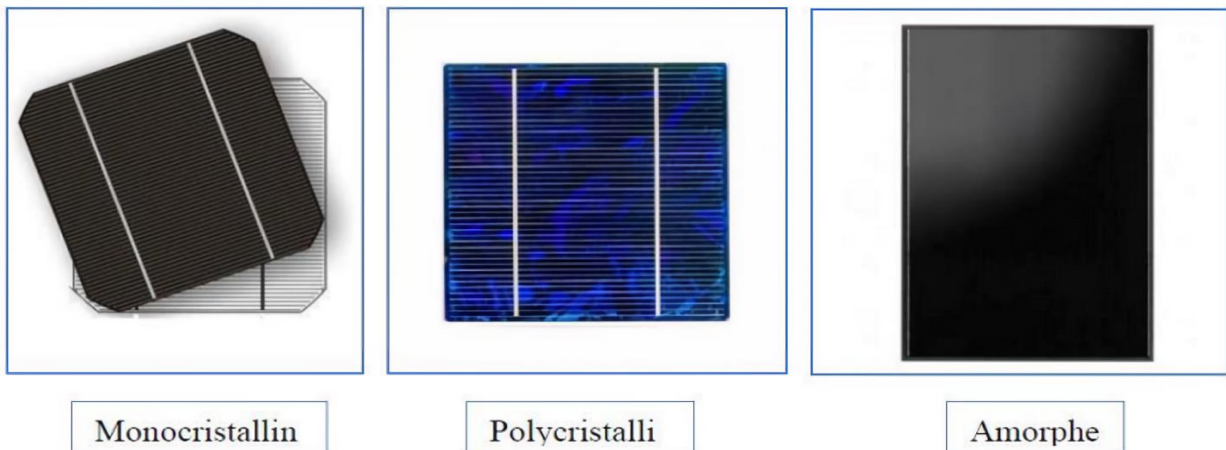


Figure I-4 Les Différents types de cellules solaire

I.2.2.3. Caractéristique de la cellule photovoltaïque :

Le circuit équivalent de la cellule photovoltaïque représente un circuit électrique simplifié qui modélise le comportement électrique de la cellule. Il comprend généralement une source de courant en parallèle avec une diode, une résistance de dérivation, et une résistance série. Ce schéma est illustré en détail dans la Figure I-5.

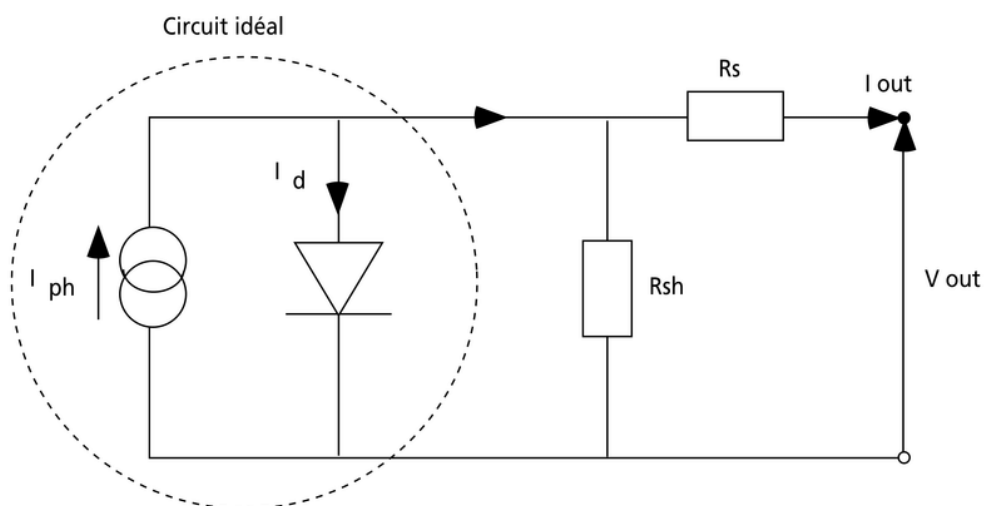


Figure I-5 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Pour la cellule idéale :

$$I_{out} = I_{ph} - I_d \quad \text{ou} \quad (I-1)$$

$$I_d = I_0 e^{\left(\frac{V_d}{V_t}\right)} - 1 \quad (I-2)$$

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. (Figure I-6)

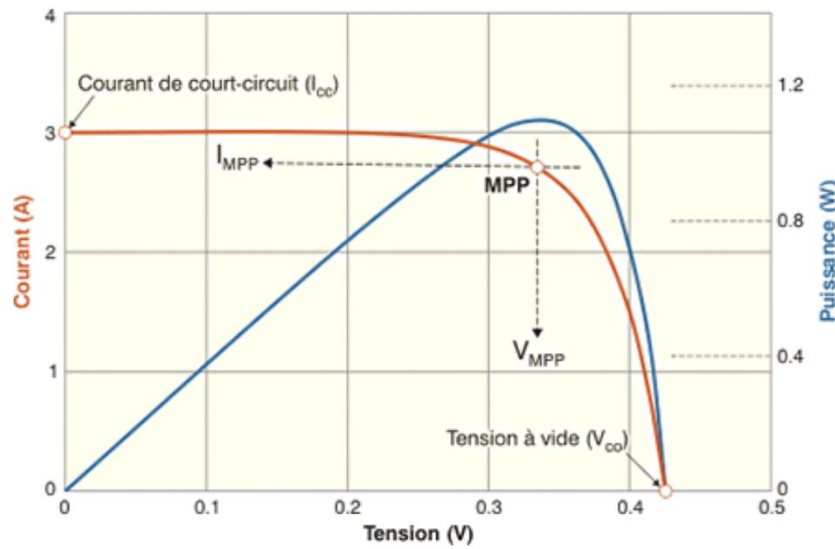


Figure I-6 Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule (PV)

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par les paramètres suivants :

A. Tension de circuit ouvert V_{co} :

La tension de circuit ouvert (V_{co}) représente la tension aux bornes de la cellule lorsque aucun courant ne circule à travers elle, c'est-à-dire lorsque la charge est déconnectée. Cette mesure fournit une indication de la tension maximale que la cellule peut produire dans des conditions idéales d'éclairement solaire.

B. Courant de court-circuit I_{cc} :

Ce courant représente le courant maximal circulant à travers la cellule lorsqu'elle est court-circuitée, signifiant que la tension aux bornes est nulle. Ce paramètre indique la capacité maximale de courant que la cellule peut fournir dans des conditions spécifiques d'éclairement solaire et de charge.

C. Point de puissance maximale (Pmax) :

Il correspond au point où la puissance de sortie de la cellule est maximisée. Cela se produit lorsque la multiplication du courant et de la tension est maximale. Le point de puissance maximale est crucial car il représente la condition de fonctionnement optimale de la cellule pour obtenir la meilleure efficacité énergétique.

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (I-3)$$

D. Le facteur de forme F_F :

Il est un paramètre qui mesure l'uniformité de la courbe caractéristique de la cellule. Il est défini comme le rapport entre la puissance optimale et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

$$F_f = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (I-4)$$

E. Le rendement de conversion d'énergie η :

Il mesure l'efficacité avec laquelle la cellule convertit l'énergie lumineuse en électricité. Il est défini comme le rapport entre la puissance électrique de sortie de la cellule (P_{max}) et l'énergie lumineuse incidente sur la cellule ($P_{in} = 1000\text{mW/cm}^2$). Ce paramètre est essentiel pour évaluer les performances globales d'un système photovoltaïque et pour comparer différentes technologies de cellules solaires.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (I-5)$$

F. La réponse spectrale de cellule :

La réponse spectrale de cellule représente sa sensibilité à différentes longueurs d'onde de la lumière solaire. Elle décrit comment la performance de la cellule varie en fonction du spectre de la lumière incidente. Cette réponse spectrale RS est donnée par la relation suivante :

$$RS(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{P_{in}(\lambda)} \quad (I-6)$$

I.2.3. Le générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est l'élément principale dans la conversion d'énergie solaire en énergie électrique. Il est constitué de cellules solaires interconnectées, agencées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour former un module photovoltaïque. Ces modules sont interconnectés pour produire une puissance continue compatible avec les besoins électriques. Ils sont souvent montés sur des supports métalliques, inclinés selon l'angle désiré pour maximiser

l'exposition au soleil. Ils sont habituellement branchés en série-parallel pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur.[5]

En conditions de test standardisées, une cellule en silicium (Si) de 100 cm^2 génère environ 1,25 Watt de puissance maximale. Cette puissance est très faible pour les besoins électriques habituels, nécessitant ainsi l'association de multiples cellules pour former des modules. En série, la connexion augmente la tension pour un même courant, tandis qu'en parallèle, elle augmente le courant pour une tension constante. Pour répondre aux exigences des applications électriques, un grand nombre de cellules sont combinées en modules, souvent présentés sous forme de panneaux, et interconnectées en réseau série-parallel pour obtenir les niveaux de tension et de courant nécessaires.[4]

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

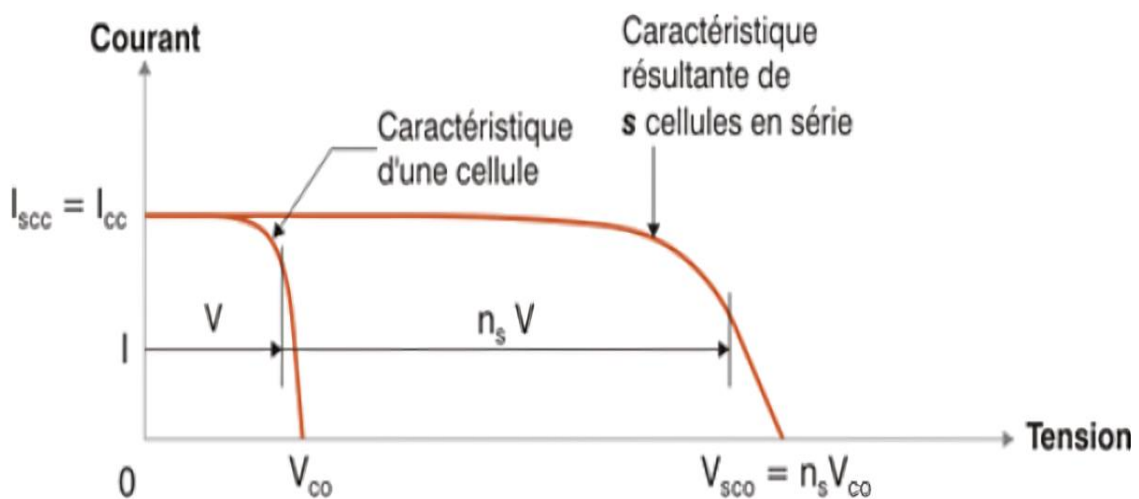


Figure I-7 Caractéristiques résultantes d'un groupement de S cellules en série.

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

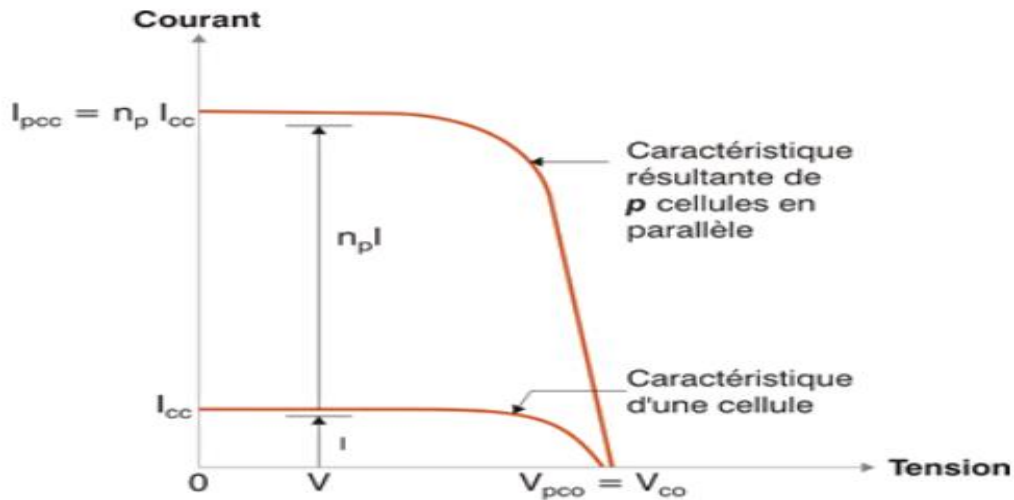


Figure I-8 Caractéristiques résultant d'un groupement de p cellules en parallèle.

I.2.4. Etages d'adaptation :

Un générateur photovoltaïque présente des caractéristiques intrinsèquement non linéaires, influencées par des paramètres tels que le niveau d'éclairement solaire et la température de la cellule. Ces facteurs peuvent considérablement affecter le point de puissance maximum (MPP) du générateur. De plus, la nature de la charge connectée au générateur peut entraîner un écart significatif entre la puissance théorique disponible et celle réellement transférée. Pour optimiser l'extraction de puissance du générateur et son transfert à la charge, il est courant d'utiliser un étage d'adaptation, généralement un convertisseur DC-DC, comme illustré dans la figure (I.9). Ce convertisseur agit comme une interface entre le générateur photovoltaïque et la charge, assurant une régulation précise pour maximiser la puissance délivrée à tout moment, indépendamment des variations d'éclairement et de charge. Son rôle essentiel est de maintenir les modules photovoltaïques à leur point de puissance optimale, garantissant ainsi une utilisation efficace de l'énergie solaire disponible.[1]

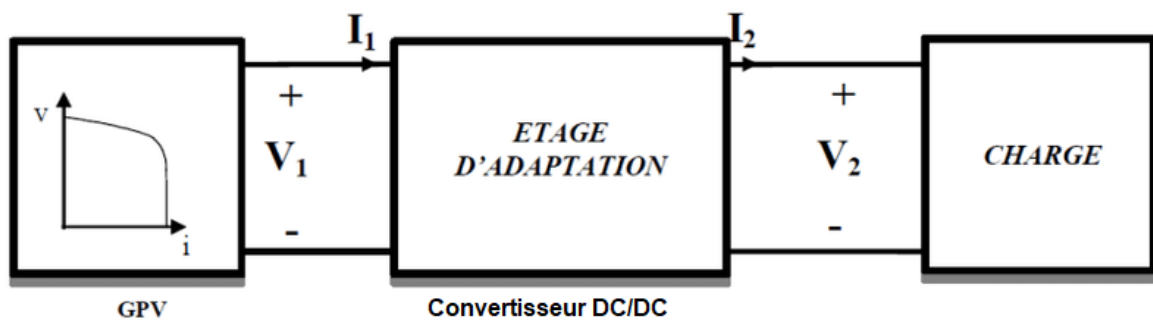


Figure I-9 Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation.

I.2.5. La méthode de command MPPT :

L'objectif principal du méthode MPPT est d'ajuster en temps réel les conditions de fonctionnement du panneau solaire afin de maintenir sa puissance de sortie maximale, appelée le point de puissance maximale (Pmax).

Le MPPT fonctionne en surveillant en permanence la tension et le courant de sortie du panneau solaire, puis en ajustant la charge ou la tension de sortie pour que le produit tension-courant soit maximisé, correspondant ainsi au Pmax. Pour ce faire, plusieurs techniques de contrôle peuvent être utilisées, telles que la méthode P&O (Perturb and Observe), la méthode Incrémentale, ou encore les algorithmes de contrôle par boucle fermée basés sur des modèles de prédiction de point de puissance maximale. Ces techniques exploitent les variations des conditions d'irradiation solaire et de température pour s'adapter et maintenir le panneau solaire à son point de fonctionnement optimal, garantissant ainsi une efficacité maximale de la conversion de l'énergie solaire en électricité.

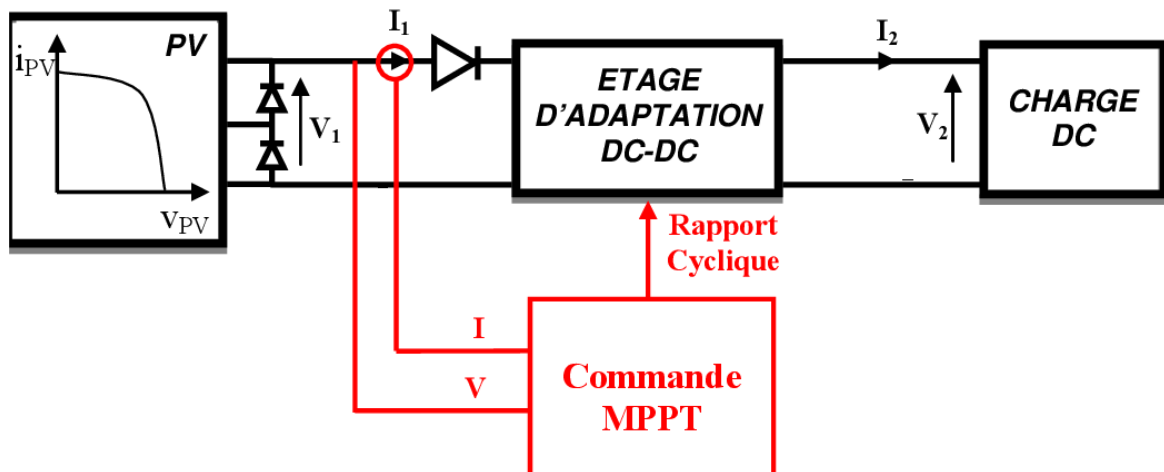


Figure I-10 Chaîne élémentaire de connexion photovoltaïque.

I.2.5.1. La méthode « Perturb and observe P&O » :

La méthode P&O fonctionne en modifiant progressivement la tension ou le courant de fonctionnement du panneau solaire et en observant comment cela affecte la puissance de sortie.

Le processus de la méthode P&O commence par une perturbation initiale de la tension ou du courant de fonctionnement du panneau solaire. Par exemple, si la tension est perturbée, elle est légèrement augmentée ou diminuée, tandis que le courant reste constant. Ensuite, la variation de puissance résultante est mesurée et comparée à la puissance précédente. Si la puissance augmente, la perturbation est maintenue dans la même direction pour continuer à suivre la courbe de puissance ascendante. En revanche, si la puissance diminue, la perturbation est inversée pour suivre la courbe de puissance descendante. La figure I-11 illustre le principe de cette méthode :

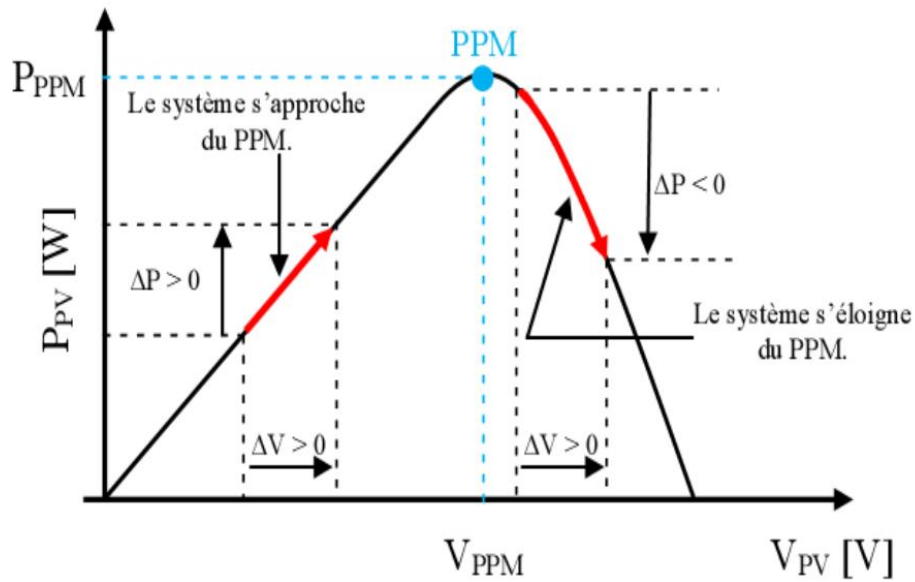


Figure I-11 Courbe P-V d'un panneau PV pour illustrer le principe de méthode P&O. [1]

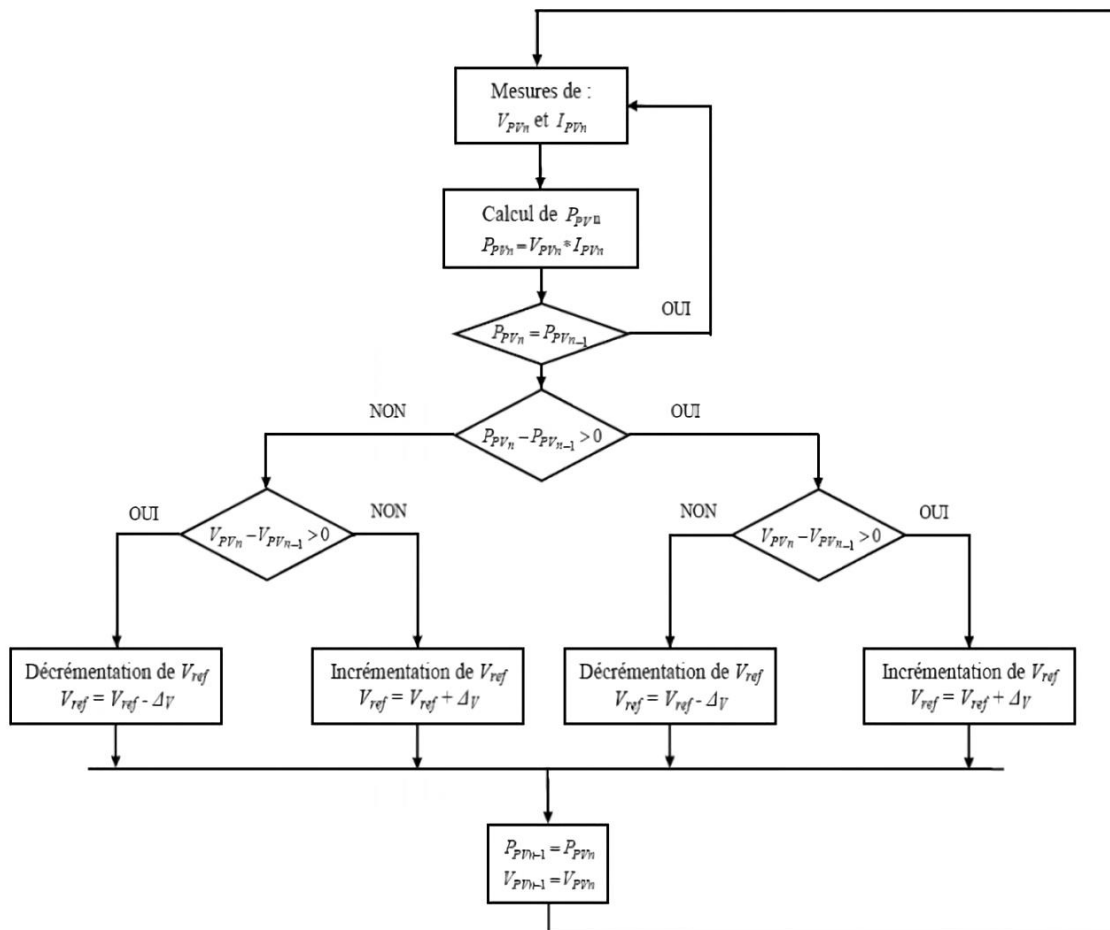


Figure I-12 Algorithme de la méthode P&O.

I.2.6. Les différents types de systèmes photovoltaïques :

I.2.6.1. Les systèmes autonomes (Isolé) :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont conçus pour fonctionner indépendamment du réseau électrique public et sont généralement dimensionnés pour alimenter certains appareils électriques en courant continu (DC) et/ou alternatif (AC). Ces systèmes peuvent être alimentés uniquement par un réseau photovoltaïque, ou peuvent utiliser le vent, un groupe électrogène ou l'électricité du réseau comme source d'alimentation auxiliaire dans ce qu'on appelle un système hybride PV [6].

Le type le plus simple de système photovoltaïque autonome est un système à couplage direct, où la sortie DC d'un module ou d'un réseau photovoltaïque est directement connectée à une charge DC. Comme il n'y a pas de stockage d'énergie électrique (batteries) dans les systèmes à couplage direct, la charge ne fonctionne que pendant les heures d'ensoleillement, ce qui les rend adaptés à des applications courantes telles que les ventilateurs, les pompes à eau et les petites pompes de circulation pour les systèmes de chauffage d'eau thermique solaire. L'adaptation de l'impédance de la charge électrique à la puissance maximale de sortie du réseau photovoltaïque est une partie critique de la conception des systèmes à couplage direct performants. Pour certaines charges telles que les pompes à eau à déplacement positif, un type de convertisseur DC-DC électronique, appelé suiveur de point de puissance maximale (MPPT), est utilisé entre le réseau et la charge pour mieux utiliser la puissance maximale disponible du réseau.

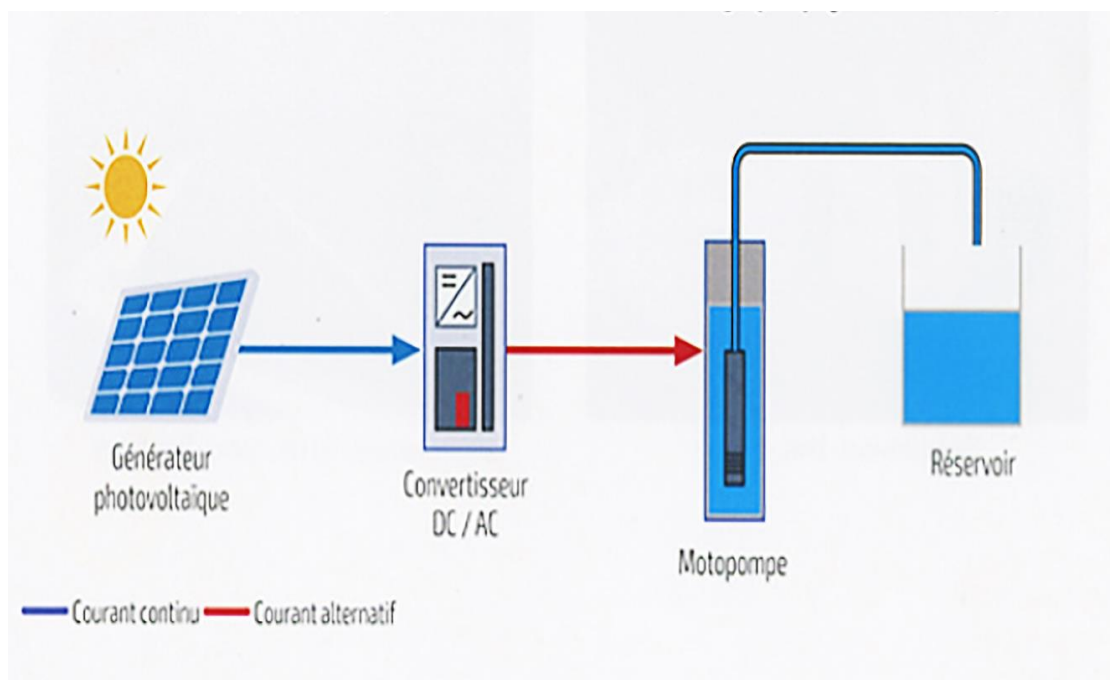


Figure I-13 Système photovoltaïque autonome à couplage direct.

Dans les systèmes autonomes avec stockage, les batteries jouent un rôle crucial en permettant de stocker l'énergie produite par les panneaux solaires lorsqu'elle n'est pas immédiatement utilisée. Cette capacité de stockage permet d'alimenter les charges électriques même lorsque le soleil ne brille pas. Les batteries sont chargées pendant les périodes d'ensoleillement et fournissent de l'électricité pendant les périodes de faible luminosité ou la nuit. Cette approche permet une plus grande flexibilité dans l'utilisation de l'énergie solaire, ce qui la rend adaptée à une gamme plus large d'applications, y compris les systèmes résidentiels, les sites isolés et les installations industrielles.

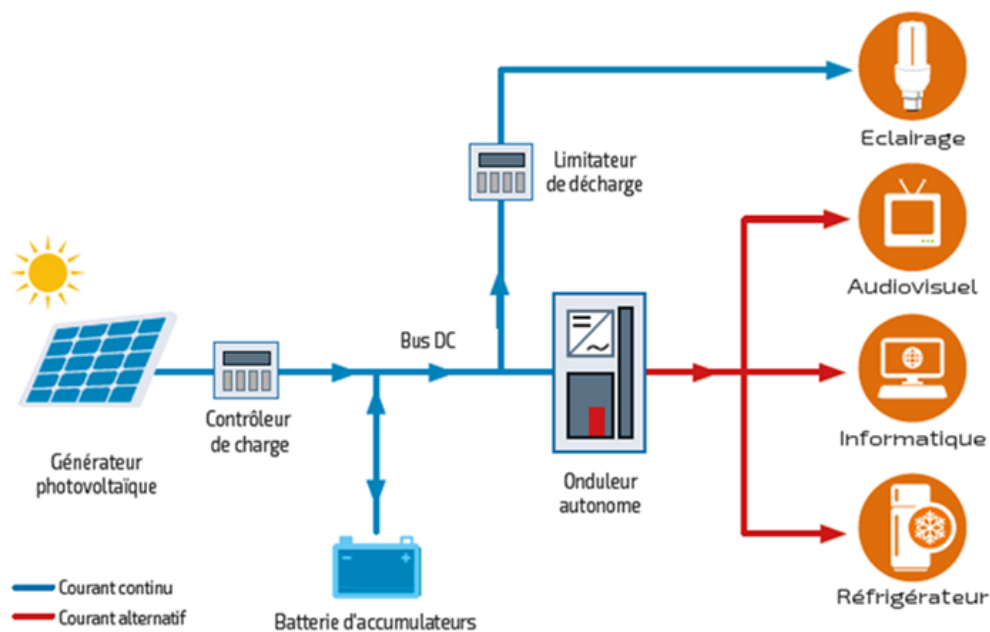


Figure I-14 Système photovoltaïques autonome avec stockage.

I.2.6.2. Les Systèmes raccordés au réseau :

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont conçus pour fonctionner en parallèle avec le réseau électrique public. Le composant principal de ces systèmes est l'onduleur, également appelé unité de conditionnement de puissance (UCP). L'UCP convertit l'énergie continue produite par le panneau solaire en énergie alternative conforme aux exigences de tension et de qualité d'alimentation du réseau électrique, et cesse automatiquement de fournir de l'énergie au réseau lorsque celui-ci n'est pas alimenté.

Une interface bidirectionnelle est établie entre les circuits de sortie en courant alternatif du système photovoltaïque et le réseau électrique public, généralement au niveau du tableau de distribution sur site ou de l'entrée de service. Cela permet à l'énergie en courant alternatif produite par le système photovoltaïque de soit alimenter les charges électriques sur place, soit être renvoyée

vers le réseau lorsque la production du système photovoltaïque dépasse la demande en charge sur place. Pendant la nuit et d'autres périodes où les charges électriques dépassent la production du système photovoltaïque, l'énergie requise est fournie par le réseau électrique public. Cette fonction de sécurité est obligatoire pour tous les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, et garantit que le système photovoltaïque cesse de fonctionner et de renvoyer de l'énergie vers le réseau en cas de panne ou de maintenance du réseau[6].

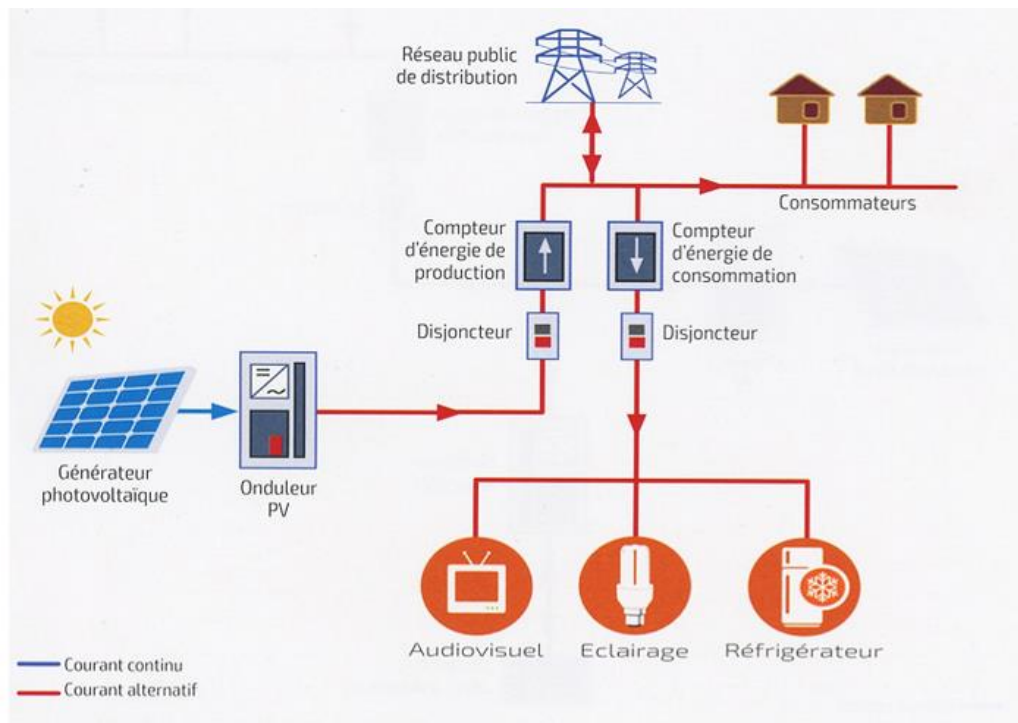


Figure I-15 Système photovoltaïque raccordé au réseau.

I.2.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

A. Les avantages :

- Les systèmes photovoltaïques ont une longue durée de vie et nécessitent peu d'entretien.
- L'énergie solaire est une ressource renouvelable abondante.
- La production d'électricité à partir du soleil ne produit pas de pollution ni d'émissions de gaz à effet de serre.
- Les installations solaires peuvent fournir de l'électricité dans des endroits où les réseaux électriques traditionnels sont absents ou coûteux à installer.
- Les panneaux solaires ne produisent aucun bruit pendant leur fonctionnement.
- L'énergie solaire est gratuite une fois que les installations sont en place.

B. Les Inconvénients :

- Les systèmes photovoltaïques peuvent nécessiter des investissements initiaux importants.
- La production d'électricité solaire dépend de l'ensoleillement et peut varier en fonction des conditions météorologiques.
- Les batteries utilisées pour stocker l'énergie produite par les systèmes photovoltaïques ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées
- Malgré les progrès technologiques, le rendement de conversion de l'énergie solaire en électricité (effet photovoltaïque) reste relativement faible par rapport à d'autres sources d'énergie.

I.3. Simulation du module photovoltaïque Soltech 1STH-215P :

Dans cette section, on va réaliser une simulation d'un module PV et le contrôler avec la méthode MPPT. On va d'abord étudier l'impact de l'irradiation et de la température sur les performances du module, concevoir le convertisseur élévateur (hacheur) et mettre en œuvre la méthode de contrôle MPPT.

Le module utilisé dans la simulation est **Soltech 1STH-215P** (il est trouvé sous « User-defined, si ce module n'existe pas dans la liste), il comporte 60 cellules de silicium monocristallin connecté en série. Il peut produire une puissance maximale de 213.15 W à 29 V. Les caractéristiques électriques du ce module sont représenté sous le tableau de I-1 :

Grandeur	Valeur
Eclairement standard G	1000w/m ²
Température T	25
Puissance maximale Pmax	213.15 W
Tension optimale Vm	29 V
Courant optimale Im	7.35 A
Tension de circuit ouvert Ico	36.6 V
Courant de court-circuit Icc	7.84 A

Tableau I-1 Caractéristique de module PV Soltech 1STH-215P.

I.3.1. L'impact de température et de l'éclairement sur la performance de module PV :

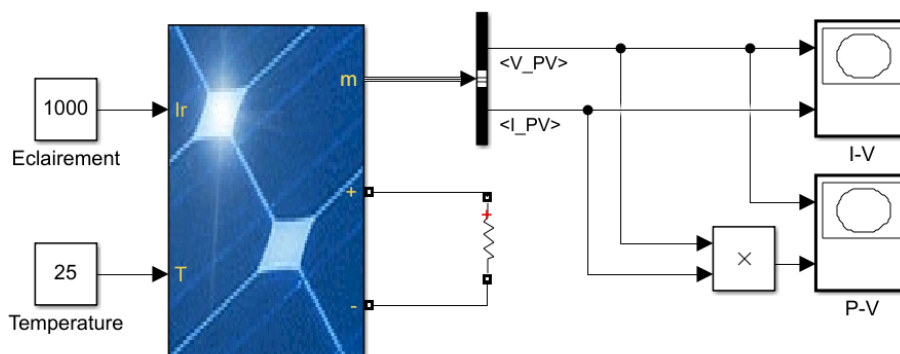


Figure I-16 Bloc Simulink pour l'obtention des courbes I-V et P-V.

Le générateur utilisé se compose de 17 cordes en parallèle, chaque corde contient 14 module connecté en série.

Les figures (I-17) et (I-18) illustre les courbes pour divers niveaux d'éclairement à une température constante de référence de 25°C, et la figure (I-19) et (I-20) représente les courbes pour différentes températures à un éclairement de référence de 1000 W/m².

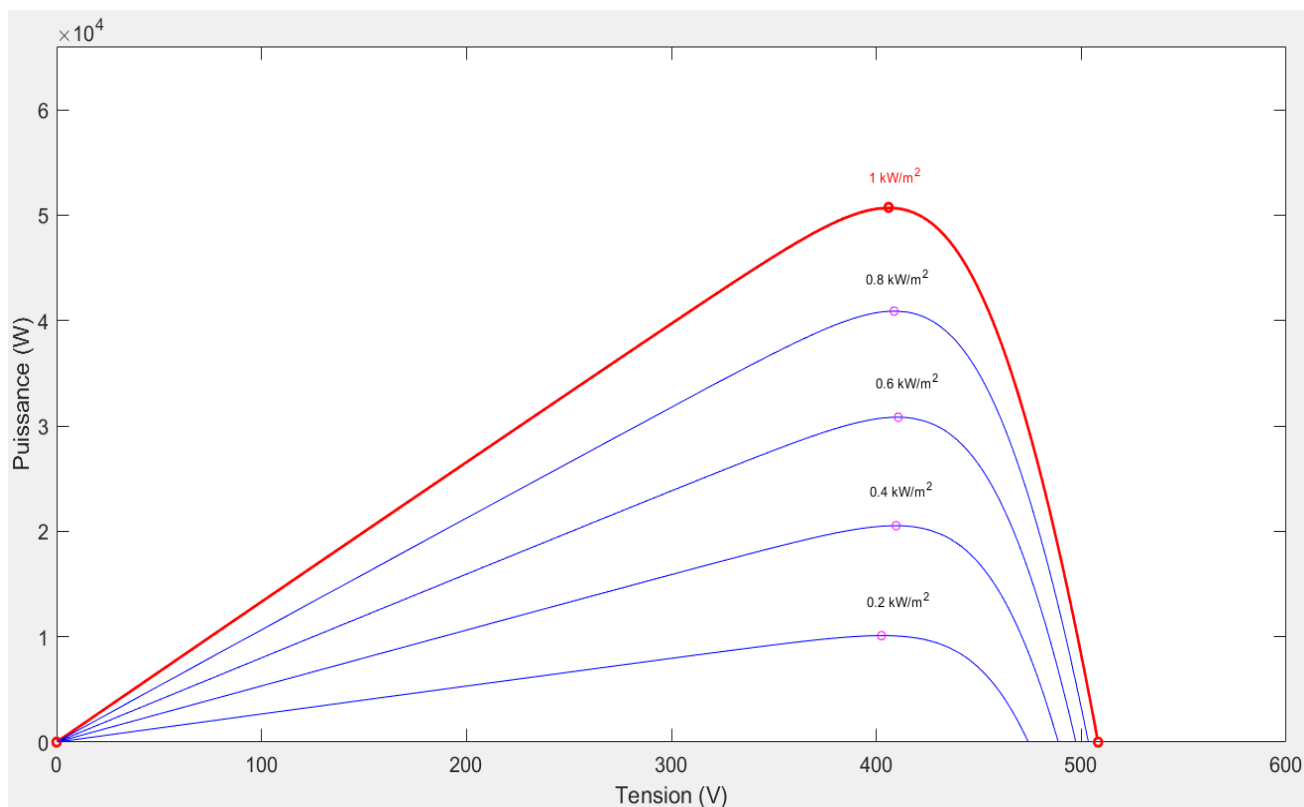


Figure I-17 Caractéristique P-V du module pour des différentes valeurs de l'eclairement.

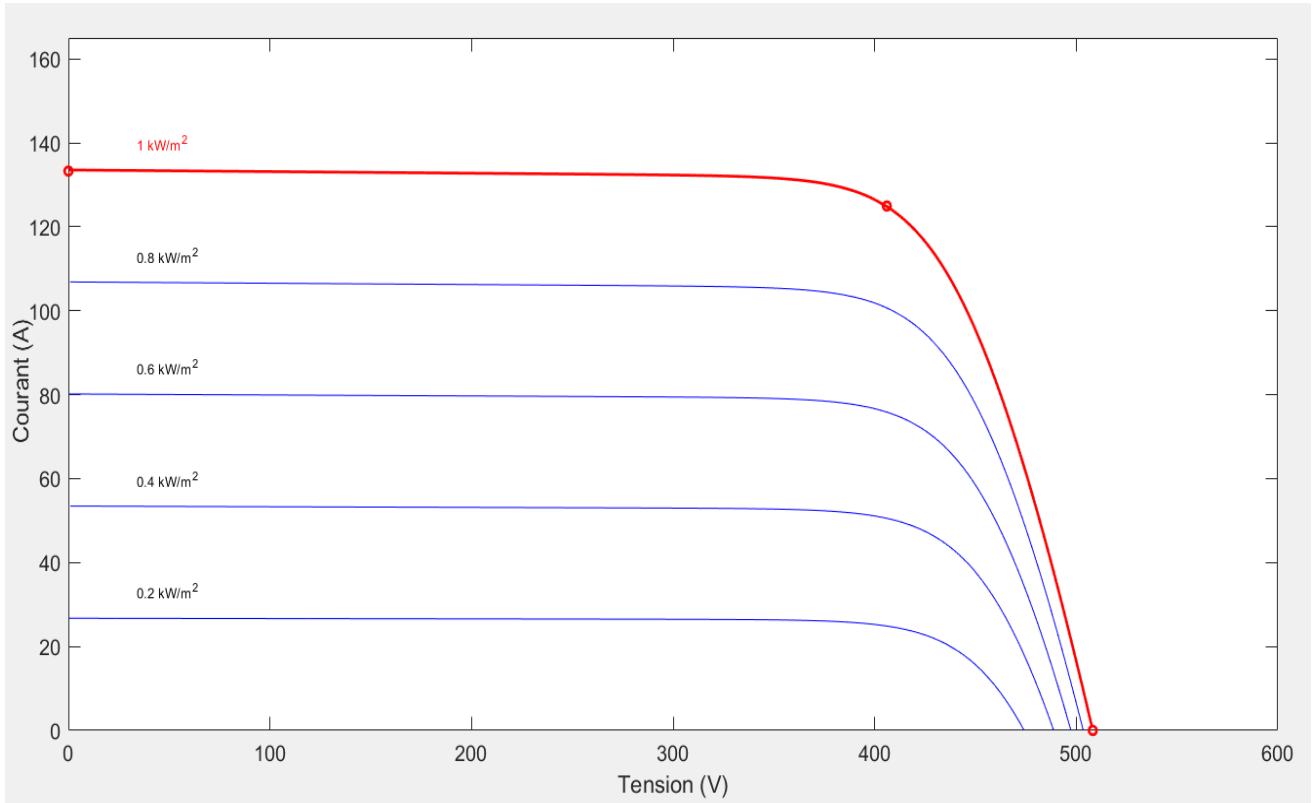


Figure I-18 Caractéristique I-V du module pour des différentes valeurs de température.

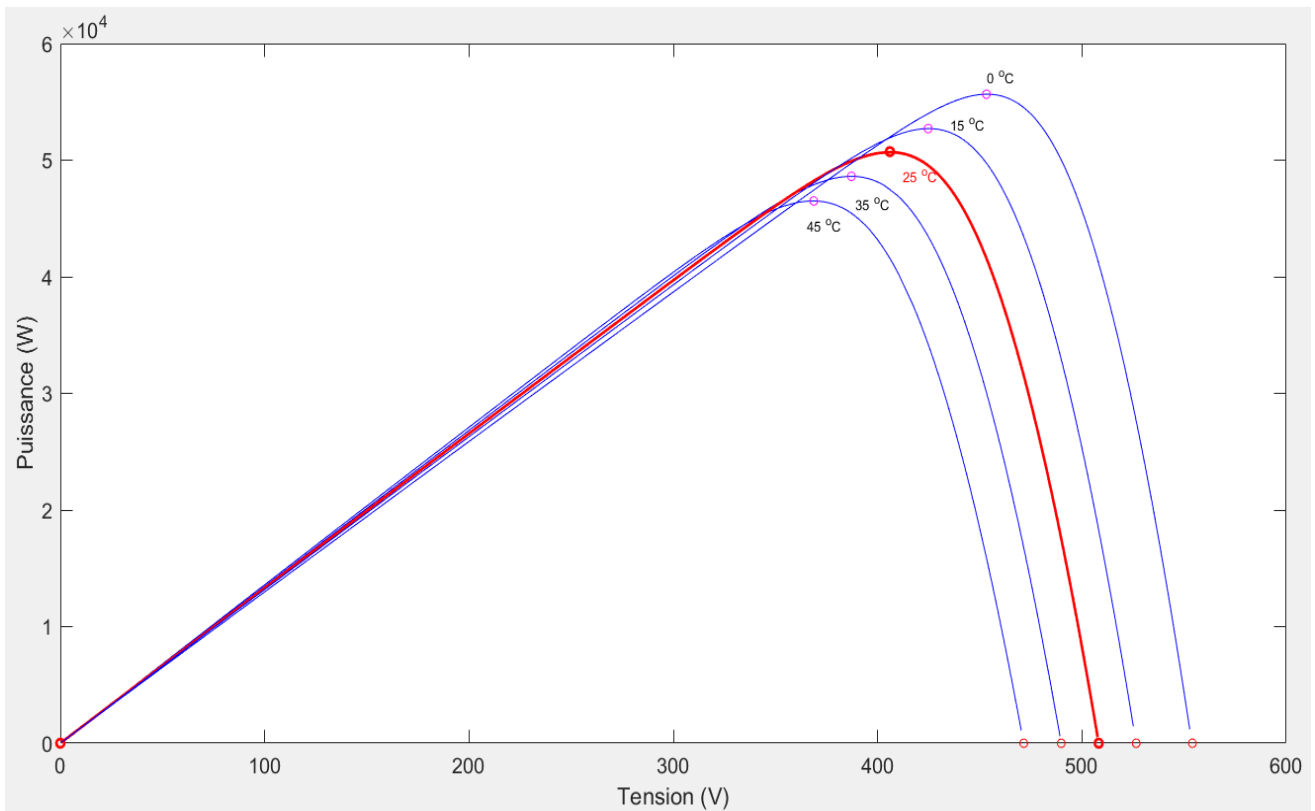


Figure I-19 Caractéristique P-V du module pour des différentes valeurs d'éclairement.

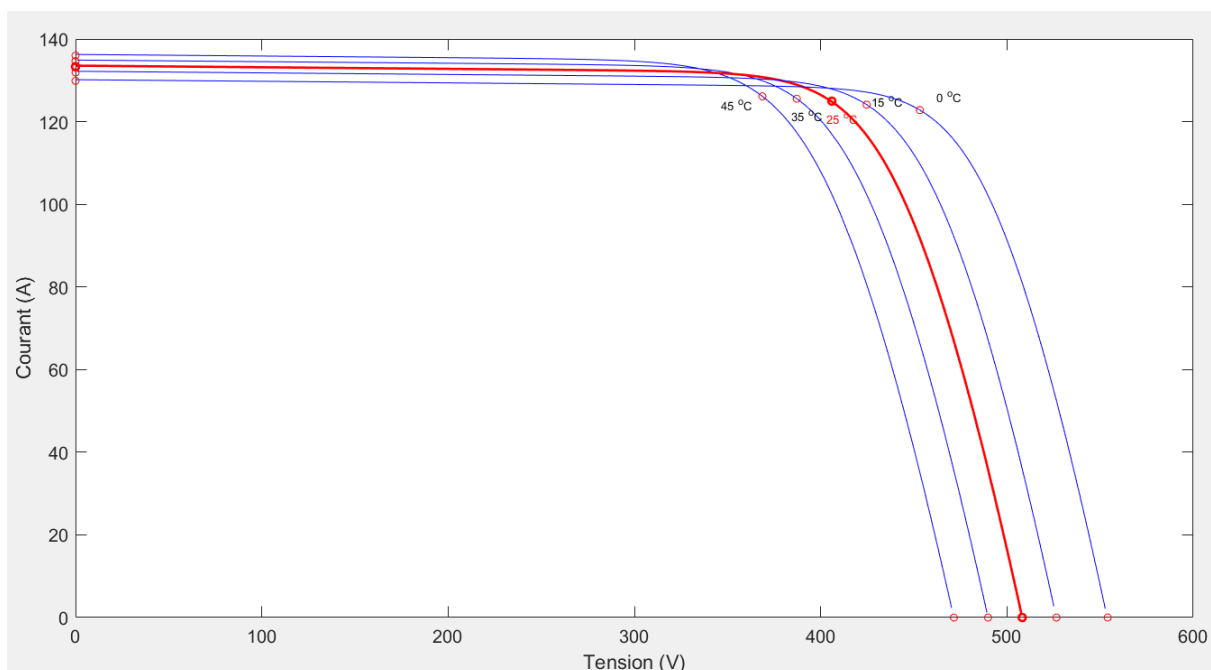


Figure I-20 Caractéristique I-V du module pour des différentes valeurs d'éclairement.

- Dans les figures (I-17) et (I-18), il est noté que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement. En revanche, la tension en circuit ouvert reste presque constante même à faible éclairement. De même, les caractéristiques $P(V)$ illustrées dans la même figure révèlent que le niveau de la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'éclairement.
- Il est observé que la température a peu d'impact sur la valeur du courant de court-circuit. Cependant, la tension en circuit ouvert diminue significativement avec l'augmentation de la température, entraînant ainsi une diminution de la puissance extractible, comme illustré dans les figures (I-19) et (I-20).

I.3.2. Simulation du module PV avec la commande MPPT :

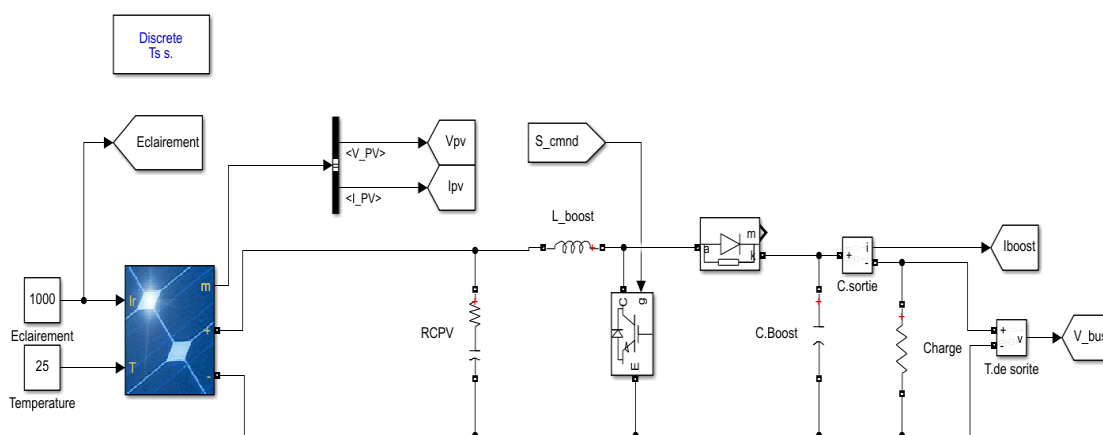


Figure I-21 Bloc Simulink d'un module PV commandé par MPPT.

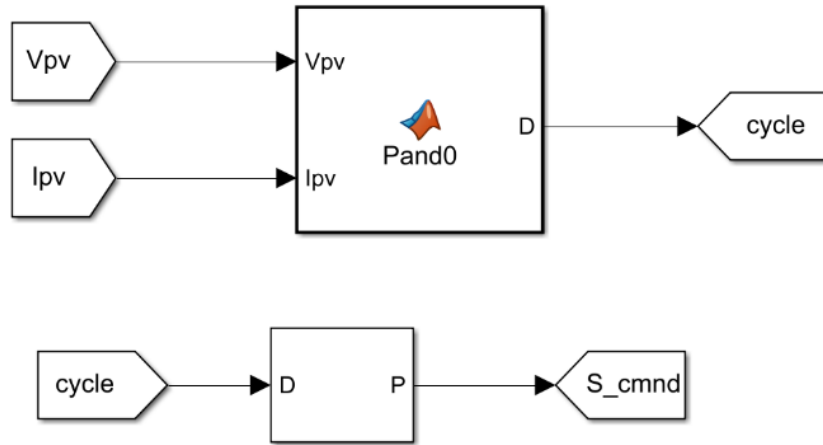


Figure I-22 Bloc Simulink de command MPPT.

I.3.2.1. Détermination des paramètres d'hacheur survolteur (Boost) :

Pour déterminer les paramètres du convertisseur DC/DC, nous devons déterminer les valeurs de L_{boost} et C_{boost} . Les équations qui permettent de les déterminer :

$$L_{boundary} = \frac{(1-D)^2 \times D \times V_o^2}{2 \times f_{sw} \times P} \quad (I-7)$$

$$C_{min} = \frac{D \times P}{V_o^2 \times \%ripple \times f_{sw}} \quad (I-8)$$

$$D = 1 - \frac{V_{in}}{V_o} \quad (I-9)$$

Avec :

D : Le rapport cyclique.

V_o : La tension de sortie désirée en Volts (V).

V_{in} : La tension d'entrée de convertisseur (délivrée par de GPV) en Volts (V).

P : La puissance délivré par le générateur PV en watts (W).

f_{ew} : La fréquence de commutation en Hertz (Hz).

Les valeurs de C_{boost} et L_{boost} doivent être supérieures à C_{min} et $L_{boundary}$ respectivement, pour notre simulation :

$$L_{boundary} = 1.63 \times 10^{-4} H \quad \text{Donc on mettre} \quad L_{boost} = 20 \times L_{boundary} = 3.2 \text{ mH}$$

$$C_{min} = 7.7 \times 10^{-4} F \quad \text{Donc on mettre} \quad C_{boost} = 10^{-4} F$$

I.3.2.2. Résultats de simulation :

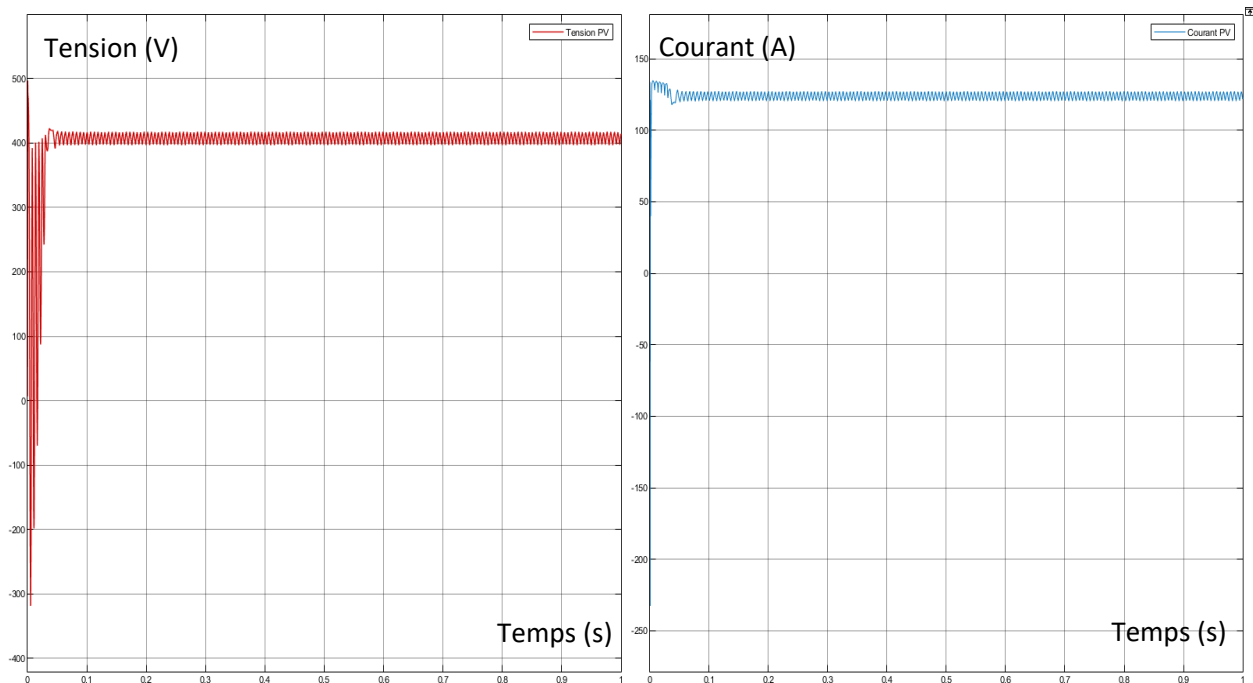


Figure I-23 Courbes $V_{pv}(t)$ et $I_{pv}(t)$. (Courant et tensio de GPV)

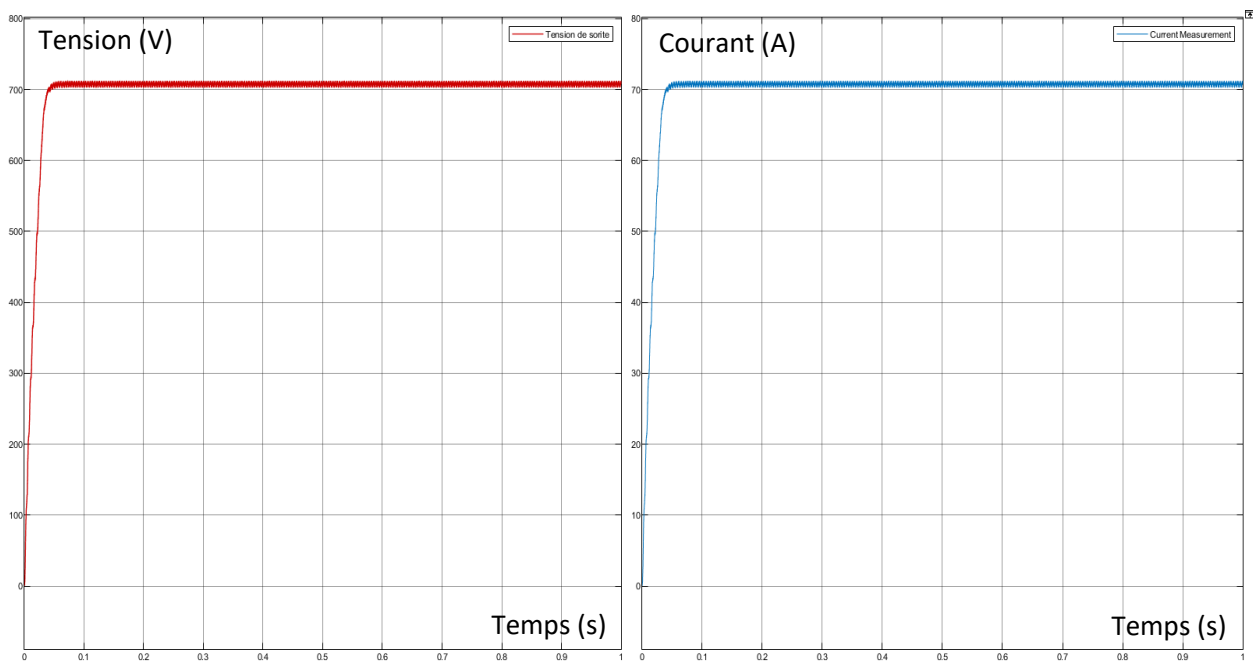


Figure I-24 Courbes $V(t)$ et $I(t)$. (Courant et tension de sortie)

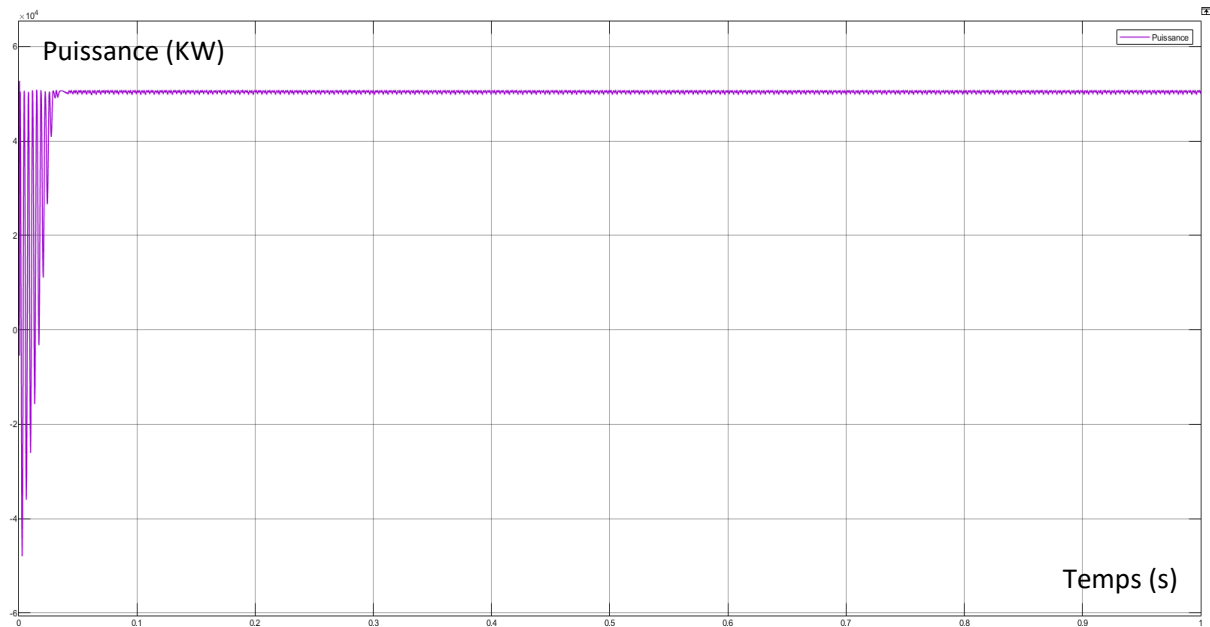


Figure I-25 Courbe P(t). (Puissance delivrée par le GPV)

I.3.2.3. Interprétation des résultats :

- Il est observé que la tension et la puissance convergent progressivement vers le point de puissance maximale au fur et à mesure que le processus MPPT s'ajuste, comme illustré dans les figures I-23, I-24, et I-25. Cette convergence témoigne de l'efficacité de la méthode MPPT à suivre et à maintenir le point de puissance.
- Les résultats obtenus par la méthode de Perturbation et Observation (P&O) révèlent des oscillations dans les courbes, attribuables à la perturbation continue de la tension de fonctionnement. Ces oscillations sont caractéristiques de la nature réactive du processus MPPT, où des ajustements continus sont effectués pour maximiser l'extraction de puissance du générateur photovoltaïque, même en présence de fluctuations environnementales.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les aspects de base des cellules photovoltaïques. Nous avons expliqué le fonctionnement de la cellule et énuméré ses caractéristiques, puis présenté un modèle équivalent de la cellule. Ensuite, nous avons abordé les aspects fondamentaux du générateur photovoltaïque.

Par simulation, nous avons analysé l'effet de la température et de l'éclairement sur la performance de la cellule. Nous avons constaté que la puissance maximale augmente avec l'augmentation de l'éclairement et diminue avec l'élévation de la température et que la méthode MPPT ajuste le fonctionnement de la cellule continuellement pour maximiser son rendement.

Chapitre II

Les convertisseurs statiques

Chapitre II. Les convertisseurs statiques

II.1. Introduction :

Ce chapitre abordera les convertisseurs statiques dans leur ensemble, en présentant leurs composants de base, leur fonctionnement et les différents types disponibles. Nous nous concentrerons notamment sur les hacheurs et les onduleurs, qui jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques. Une attention particulière sera accordée aux onduleurs multicellulaires, ainsi qu'aux stratégies de commande associées.

II.2. Généralités sur les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques qui permettent de modifier les caractéristiques électriques d'un signal en entrée pour obtenir un signal de sortie adapté à une application spécifique. La conception des convertisseurs statiques implique l'utilisation de composants électroniques semi-conducteurs tels que les diodes, les transistors ou les thyristors, les inductances, et les condensateurs. Ces composants sont agencés selon différentes topologies pour répondre aux besoins spécifiques de l'application, en permettant par exemple la conversion de tension, de courant ou de fréquence. En outre, ces convertisseurs sont généralement associés à des techniques de commande sophistiquées pour réguler efficacement leur fonctionnement et optimiser leurs performances. La figure II-1 illustre les différents convertisseurs :

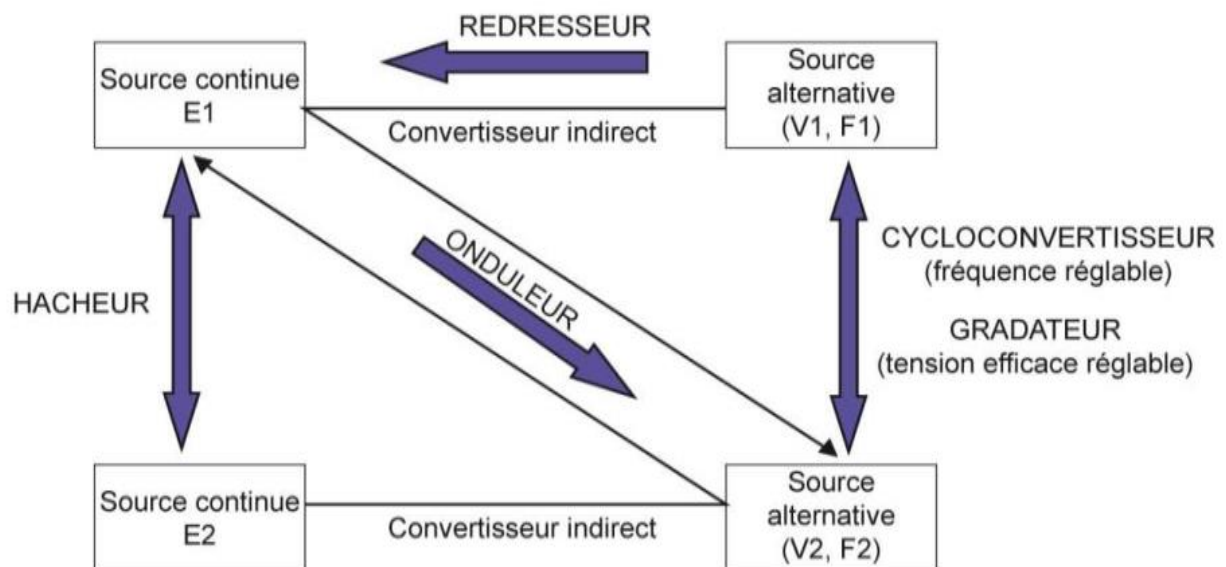


Figure II-1 Les différent types de convertisseurs statiques

II.3. Les composants électronique semi-conducteur :

II.3.1. La Diode :

Les diodes sont des composants électronique semi-conducteur qui permet de contrôler le flux de courant électrique dans un circuit. Lorsque la diode est polarisée dans le sens direct, elle permet le passage du courant avec une faible résistance. En revanche, lorsqu'elle est polarisée dans le sens inverse, elle bloque le courant en offrant une résistance très élevée. Elles sont couramment utilisées dans les circuits de redressement, de commutation de signal, et de régulation de tension.

Les caractéristiques des diodes sont :

- La tension direct V_F ou V_d .
- Le courant direct I_F ou I_d .
- Tension inverse maximale répétitive V_{RRM} .
- Tension inverse maximale non répétitive V_{RSM} .

La figure II-2 illustre le symbole de diode et sa courbe caractéristique :

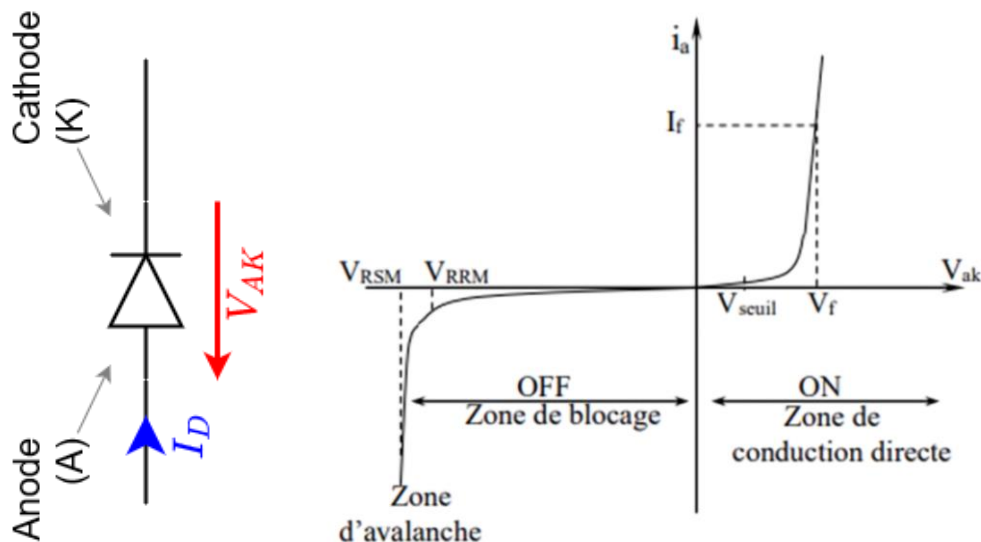


Figure II-2 Symbole et courbe caractéristique d'une diode.

II.3.2. Le Thyristor :

Un thyristor est un composant électronique semi-conducteur à quatre couches de silicium dopées alternativement pour former des jonctions PNPN. Il possède trois bornes : une anode, une cathode et une grille de commande. Lorsqu'une tension est appliquée entre l'anode et la cathode, le thyristor reste inactif jusqu'à ce qu'une impulsion de courant soit appliquée à la grille de

commande, après quoi il devient conducteur dans le sens de la tension appliquée et conserve cet état, même si la tension de grille est retirée. Ils sont largement utilisés dans les applications de commutation de puissance. Parmi les types des thyristors on distingue : Les thyristors SCR (Silicon controlled rectifier) et les thyristors GTO (Gate turn-off).

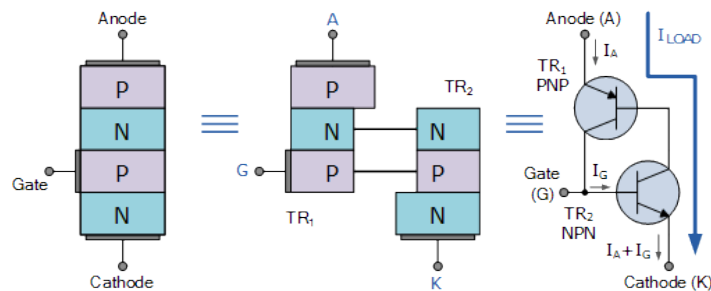


Figure II-3 Thyristor SCR.

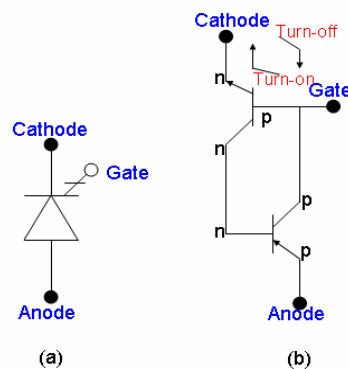


Figure II-4 Thyristor GTO.

II.3.3. Le Transistor :

Les transistors sont des composants électroniques utilisée comme des interrupteurs, ils peuvent être commandable a la fermeture ou à l'ouverture. Ils existent différents types de transistor :

- **Transistors bipolaires (BJT) :** Ils sont composés de trois régions de matériau semi-conducteur : l'émetteur, la base et le collecteur. Le courant entre l'émetteur et le collecteur peut être contrôlé par un faible courant appliquer à la base.

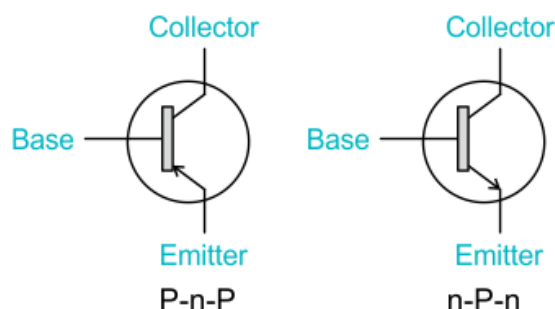


Figure II-5 Symbole de transistor BJT à jonction NPN et PNP

- **Transistors à effet de champ (FET) :** Ils sont également composés de trois régions de matériau semi-conducteur : la source, la grille et le drain. Le courant entre la source et le drain peut être contrôlé par une tension appliquée à la grille. Ils sont catégorisés en deux principaux types : les transistors à effet de champ à grille métal-oxyde-semiconducteur (MOSFET) et les transistors à effet de champ à jonction (JFET).

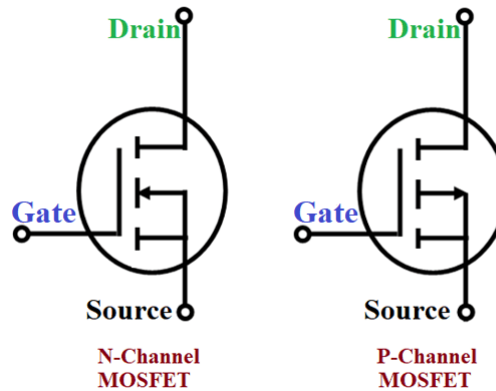


Figure II-6 Symbole d'un transistor MOSFET à canal P et à canal N.

- **IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) :** Il s'agit d'un type de transistor qui combine les caractéristiques des MOSFET et des transistors bipolaires à jonction (BJT). Il possède une entrée MOSFET et une sortie bipolaire et est couramment utilisé dans les applications haute puissance telles que les commandes de moteurs et les onduleurs de puissance.

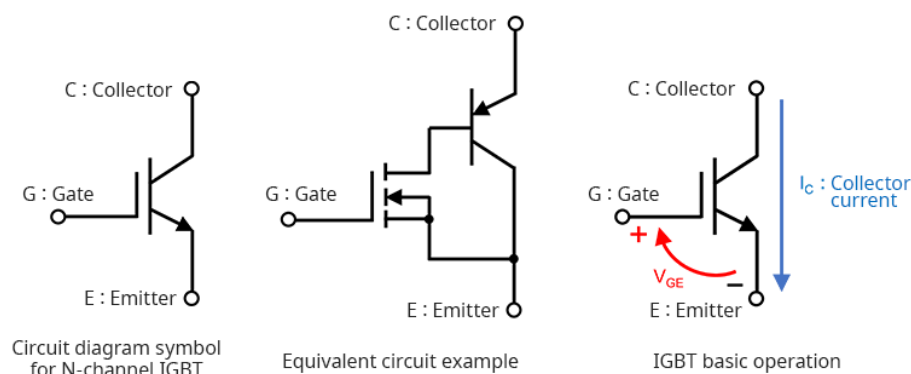


Figure II-7 Symbole de transistor IGBT et son circuit équivalent

II.3.4. Critères de choix des composants semi-conducteur :

Les composants semi-conducteurs sont choisis en fonction de critères tels que la plage de puissance et la fréquence de commutation. Les IGBT sont préférés pour des applications jusqu'à 10 kW et des fréquences allant jusqu'à 20 kHz, offrant une combinaison d'avantages de commande

MOS et de performances de conduction bipolaire. Pour gérer des courants élevés, des modules de puissance sont utilisés, regroupant plusieurs semi-conducteurs dans un seul boîtier.

Les transistors MOS sont généralement privilégiés pour les applications à faible puissance et à haute fréquence. Leur mode de conduction unipolaire leur confère des pertes de commutation réduites, bien que cela soit accompagné d'une chute de tension élevée en conduction à tension de claquage élevée [5].

Composant	Commande	Perte de conduction	Perte de commutation	Puissance d'utilisation	Fréquence d'utilisation
MOSFET	On/Off	Élevé	Faible	$100W < P < 1\text{ KW}$	$10\text{ kHz} < f < 100\text{ kHz}$
IGBT	On/Off	Moyenne	Moyenne	$100W < P < 10\text{ KW}$	$1\text{ kHz} < f < 20\text{ kHz}$
Thyristor	On	Faible	Élevé	$100W < P < 10\text{ MW}$	$100\text{ Hz} < f < 1\text{ kHz}$

Tableau II-1 Comparaison entre : Thyristor, MOSFET et IGBT [7].

II.4. Les hacheurs :

Les hacheurs sont des convertisseurs DC-DC qui permet de réguler la tension continue. Ils opèrent en modulant le rapport cyclique d'un signal de commutation, ce qui permet de contrôler la tension moyenne de sortie. Cette modulation permet ainsi de transformer une tension continue d'entrée en une tension continue de sortie à valeur différente. Ils sont couramment utilisés en particulier dans les systèmes d'énergie renouvelable tels que les panneaux solaires et les éoliennes.

II.4.1. Les différents types d'hacheurs :

- **Hacheur série ou dévolteur (Buck) :** Un hacheur série (Figure II-8), est un dispositif qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [8].

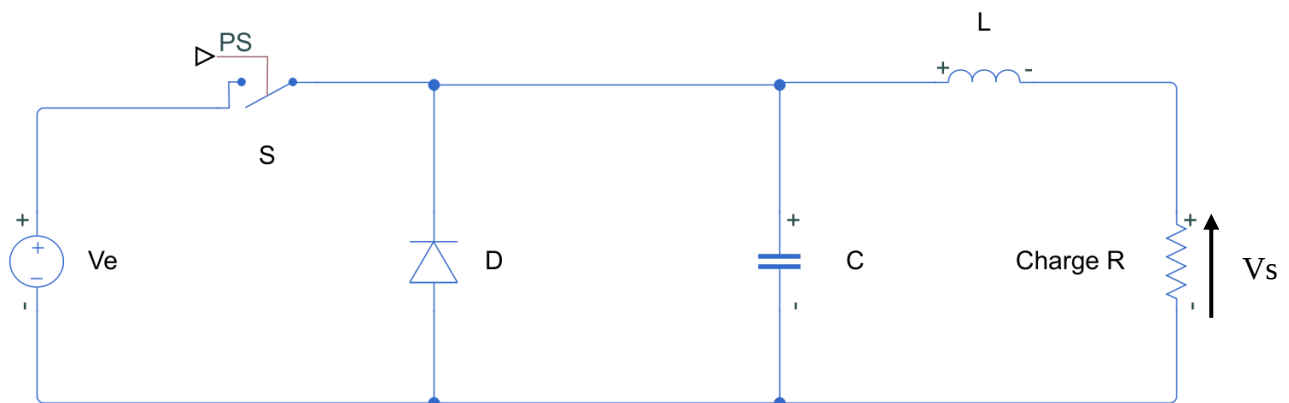


Figure II-8 Schéma d'un hacheur séries (Buck).

- **Hacheur parallèle ou survolteur (Boost) :** Un hacheur parallèle (Figure II-9), est un dispositif qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [8].

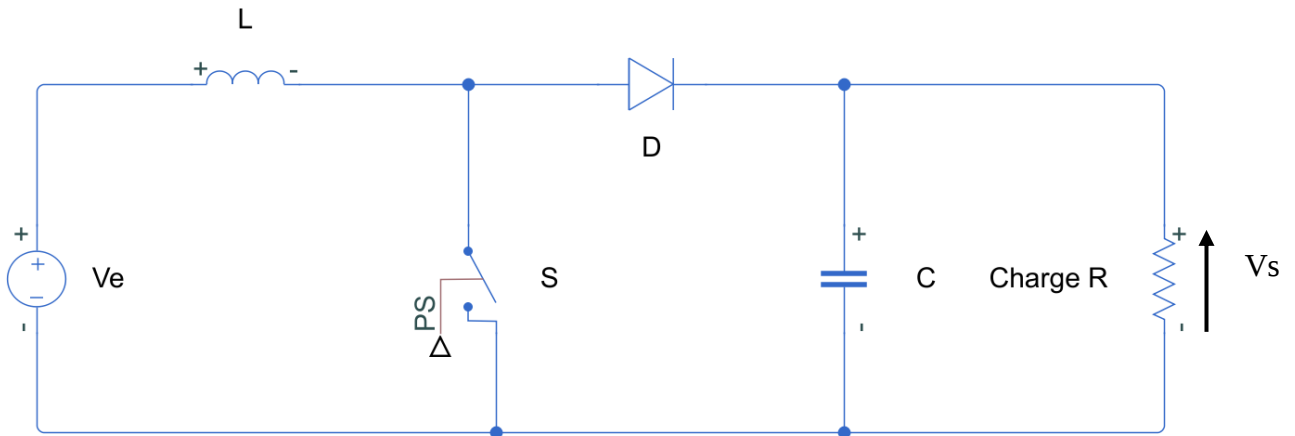


Figure II-9 Schéma d'un hacheur parallèle (Boost).

- **Hacheur survolteur-dévolteur :** le convertisseur abaisseur-élevateur (Figure II-10) est un dispositif qui convertit une tension continue en une autre tension continue plus faible, ou plus élevée en valeur. Ceci dépend de la valeur du rapport cyclique [8].

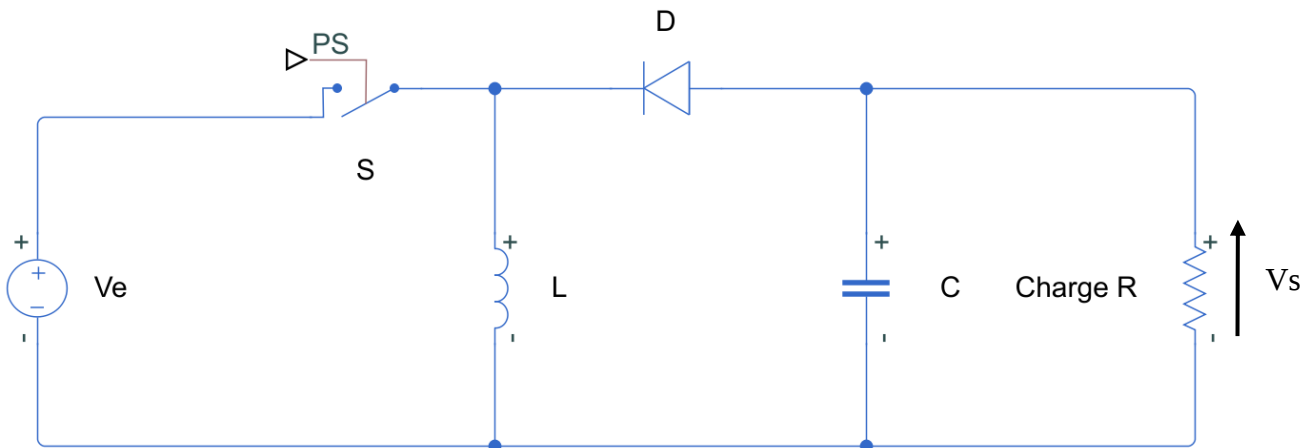


Figure II-10 Schéma d'un hacheur survolteur-dévolteur (Buck-boost).

II.5. Les onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion DC-AC, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir de l'alternatif à la sortie. Les onduleurs sont largement utilisés dans les systèmes d'alimentation de secours pour assurer un fonctionnement continu des équipements électriques en cas de panne de courant, ainsi que dans les systèmes d'énergie solaire et éolienne pour convertir l'énergie

produite en courant alternatif utilisable. Selon l'application désiré, on peut distinguer les onduleurs de courant ou les onduleurs de tension.

II.5.1. Principe de fonctionnement :

Les onduleurs se composent principalement de ponts d'interrupteurs électroniques, souvent des IGBT, des transistors de puissance ou des thyristors. En contrôlant ces interrupteurs par le biais de commutations précises, généralement grâce à une modulation de largeur d'impulsion, on peut transformer le courant continu d'entrée en un signal alternatif de la fréquence désirée. [9]

II.5.2. Classification des onduleurs :

II.5.2.1. Selon la grandeur transformée :

- **Onduleur de tension [10] :**

Un onduleur de tension est alimenté par un générateur à courant continu du type source de tension. Dans l'idéal, la tension U à son entrée reste constante, indépendamment du courant i absorbé par l'onduleur. À la sortie, le courant dépend de la charge connectée du côté alternatif. Cette charge peut être quelconque, mais elle ne doit pas constituer une autre source de tension.

- **Onduleur de courant [10] :**

Un onduleur de courant est alimenté par un générateur de courant continu, fournissant un courant de sortie ajustable et stable, indépendamment de la charge, contrairement à la tension de sortie qui varie en fonction de la charge. Ces onduleurs sont couramment employés dans les systèmes d'entraînement à vitesse variable des moteurs à courant alternatif.

II.5.2.2. Selon le mode de commutation et les interrupteurs :

- **Onduleur autonome :**

Un onduleur autonome fournit une tension de fréquence fixe ou réglable, sans nécessiter de réseau électrique pour son fonctionnement. Il est composé d'interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture, avec des instants de commutation déterminés par des circuits externes.

- **Onduleur non autonome :**

Les onduleurs non autonomes se distinguent par leur configuration à base de simples thyristors, commandés uniquement à la fermeture en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé. Principalement utilisés dans les variateurs de vitesse pour les moteurs synchrones de très forte puissance. [9]

II.5.3. Les différentes topologies d'onduleur de tension :

II.5.3.1. Les onduleurs monophasés à demi-pont :

L'onduleur en demi-pont est réalisé à l'aide de deux interrupteurs et d'un diviseur capacitif. Il permet une commande simple étant donné qu'il n'y a qu'un bras à commander cependant on a seulement accès à la commande bipolaire et on ne peut donc pas faire de commandes plus élaborées.

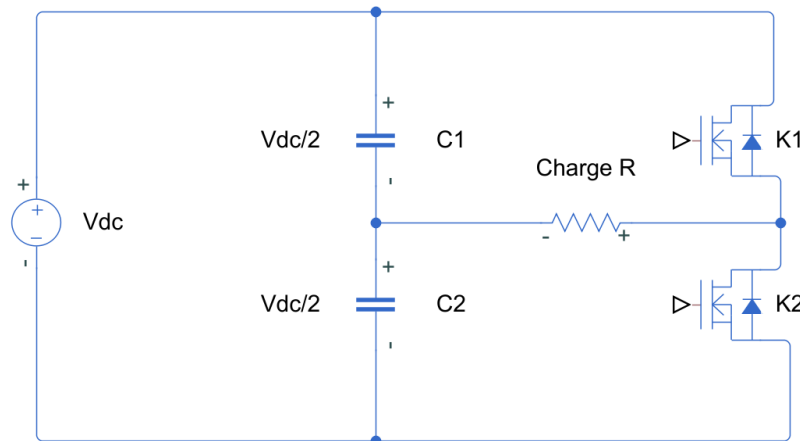


Figure II-11 Schéma de circuit d'un onduleur monophasé de tension à demi-pont.

II.5.3.2. Les onduleurs monophasés en pont H :

Cet onduleur est constitué de deux bras, chacun contenant deux interrupteurs avec une diode montée en antiparallèle, assurant ainsi la réversibilité du courant dans la charge. À partir de la source principale de tension continue, l'onduleur permet d'obtenir une tension de sortie plus proche de la sinusoïde car cette configuration permet de réaliser des commandes de type 3 états. En commandant simultanément les interrupteurs 1 et 2 ou 3 et 4, on obtient un niveau 0 aux bornes de la charge.

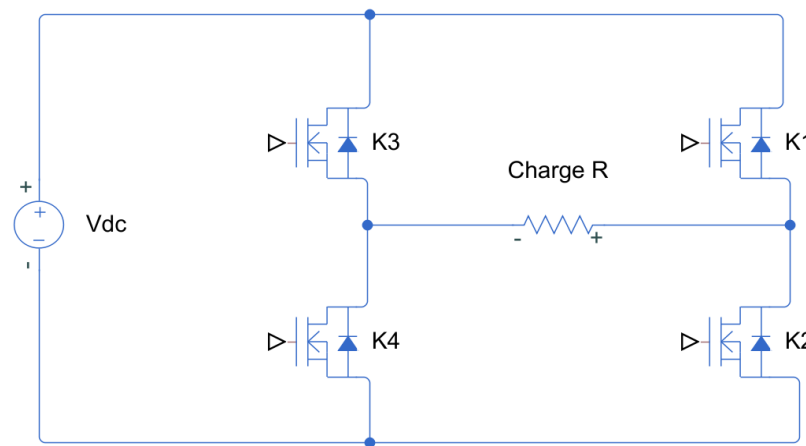


Figure II-12 Schéma de circuit d'un onduleur monophasé en pont H.

II.5.3.3. Onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu

Appelé aussi onduleur Push-Pull, Ce type d'onduleur utilise un transformateur pour séparer la charge du circuit de commande. Le transformateur a un enroulement central connecté à la charge, tandis que les deux côtés de l'enroulement reçoivent alternativement des signaux de tension déphasés de 180 degrés.[1]

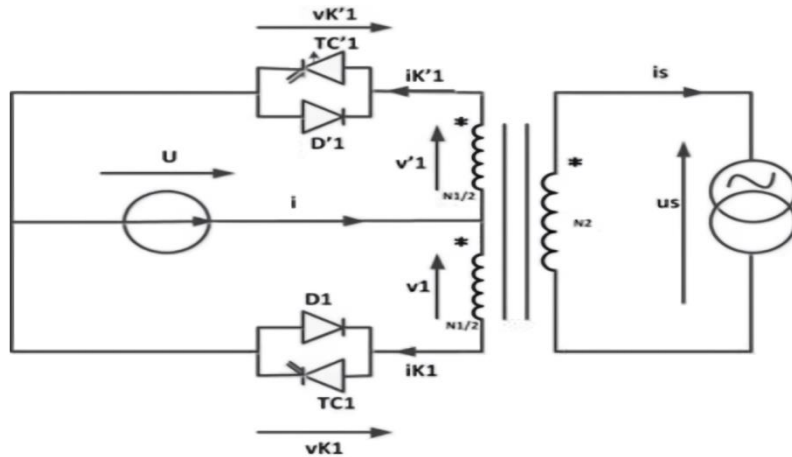


Figure II-13 Schéma de circuit d'un onduleur Push-Pull.

II.5.3.4. Les onduleurs triphasés :

Il est possible de créer un onduleur triphasé en combinant trois onduleurs monophasés, soit en pont H soit en demi-point, et en commandant les interrupteurs de chacun pour obtenir trois phases de sortie décalées de 120° . En regroupant trois demi-pont monophasés, on forme un onduleur en pont triphasé à six interrupteurs, tel qu'illustré dans la figure II-14. Les interrupteurs du même bras de l'onduleur doivent être complémentaires afin d'éviter les courts-circuits de la tension continue.

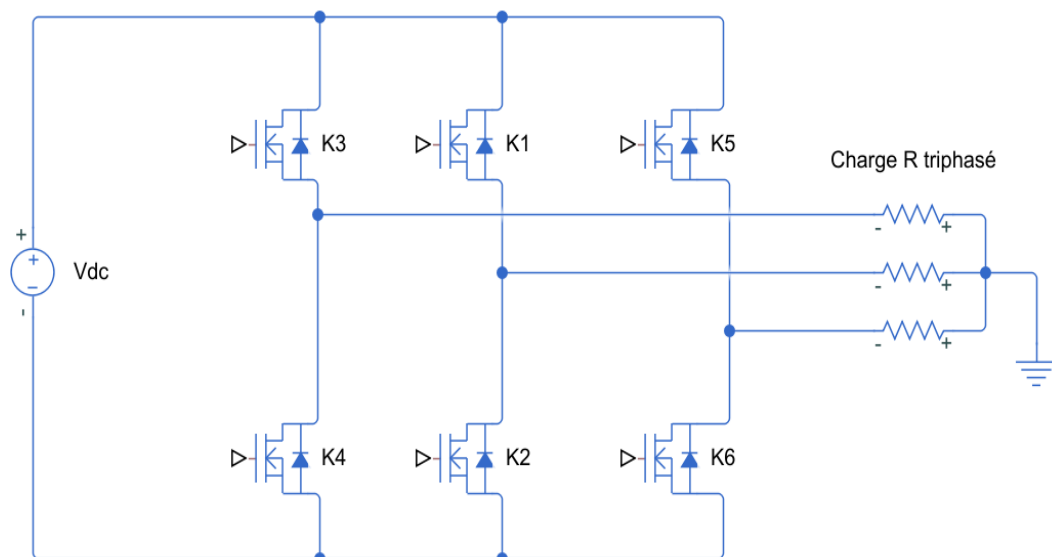


Figure II-14 Schéma de circuit d'un onduleur triphasé alimentant une charge R.

II.6. Introduction aux onduleurs multi-niveaux :

Les onduleurs multiniveaux sont un type d'onduleur qui produisent un signal de sortie sinusoïdal en appliquant plusieurs niveaux de tension. Ils utilisent plusieurs commutateurs multi-états contrairement aux onduleurs traditionnels à deux états afin de fournir une forme d'onde plus précise dans la sortie. Le range commun pour les niveaux générés par ces onduleurs est de trois à sept niveaux.

Ils sont largement utilisés dans diverses applications, notamment les réseaux électriques, les moteurs électriques, les éoliennes et les systèmes solaires.

Les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux sont :

- L'onduleur a structure NPC (Neutral point clamped) ou onduleur diode de bouclage.
- L'Onduleur multicellulaire.
- Onduleur a cellule en cascade.

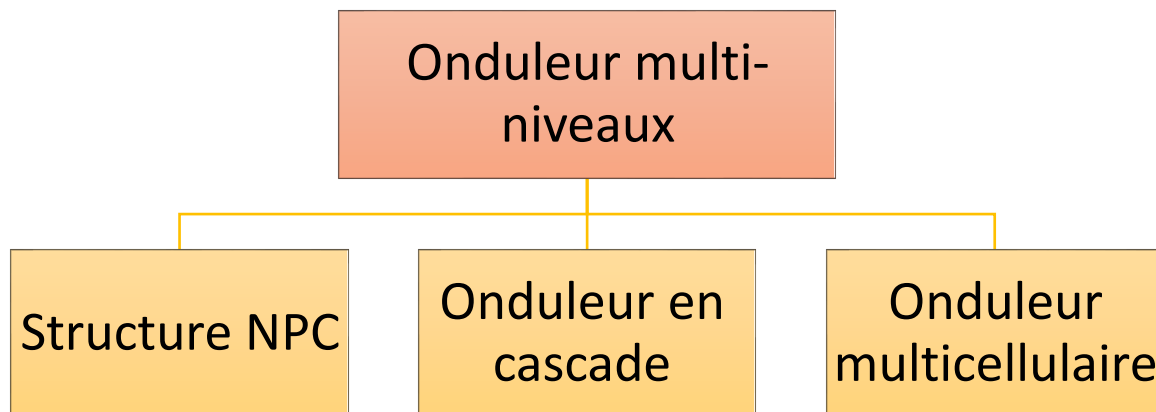


Figure II-15 Topologies principales des onduleurs multi-niveaux

Ces onduleurs présentent de nombreux avantages par rapport aux onduleurs conventionnelle. Parmi ces avantages on peut citer [11] :

- Réduction des contraintes en tension pour les interrupteur grâce à la répartition de la tension entre plusieurs niveaux.
- Ils réduisent l'amplitude des fronts de tension, ce qui diminue les harmoniques dans la tension de sortie. De plus, une commande précise permet d'éliminer sélectivement certaines familles d'harmoniques, réduisant ainsi la distorsion harmonique.

- Possibilité d'utilisation des fréquences de commutation élevée a fiable puissance.

II.7. Généralités sur les topologies d'onduleurs multi-niveaux :

II.7.1. L'Onduleur a structure NPC :

La plus ancienne, et appeler convertisseur clampé par le neutre, la structure du convertisseur NPC a été introduite par Nabae, Takahashi et Akagi en 1981 pour la génération de N niveaux de tension [12]. Cette topologie utilise des diodes (clamps) connectées à des points milieux capacitifs afin d'assurer une répartition équitable de la tension d'alimentation du convertisseur sur les différents interrupteurs connectés en série. L'utilisation de ces diodes augmente non seulement le prix de ce type de convertisseur, mais entraîne également des problèmes d'encombrement. La figure II-16 illustre la structure d'un onduleur NPC a trois niveaux.

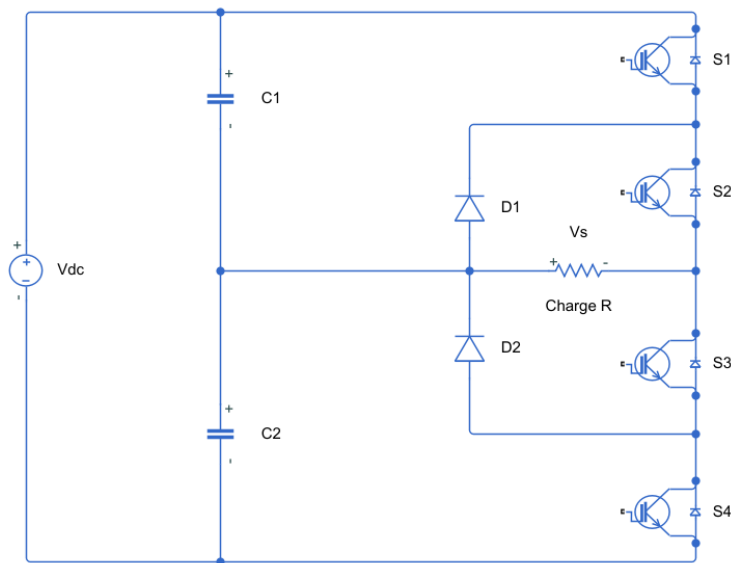


Figure II-16 Bras d'un onduleur NPC à 3 niveaux alimentant une charge R.

II.7.2. L'onduleur à condensateur flottant FCMC :

C'est l'une des topologies d'onduleurs multi-niveaux proposées par T. Meynard et H. Foch en 1992. Sa structure est très similaire à la structure NPC mais elle utilise des condensateurs au lieu de diodes d'où le nom. Cette structure a été proposée pour faciliter l'équilibrage de tension et réduire le nombre de diodes utilisées dans sa conception [13]. L'une des avantages de cette topologie est la facilité d'appliquer la plupart des stratégies de commande.

La figure II-17 illustre un onduleur FC à 3 niveaux alimentant une charge R :

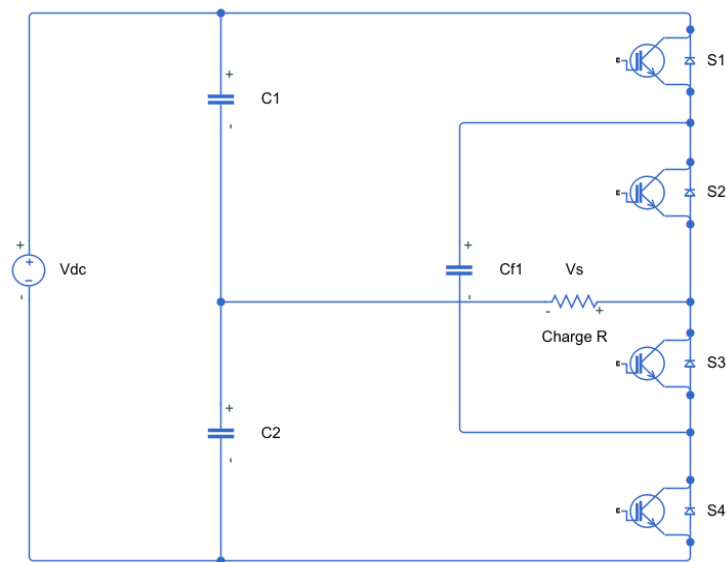


Figure II-17 Bras d'onduleur FC à 3 niveaux alimentant une charge R.

II.7.3. L'Onduleur en cascade :

Ce type d'onduleur a été proposé en 1975, il utilise plusieurs ponts à deux niveaux de tension monophasé, chaque pont possède sa propre source DC. La figure II-18 montre le schéma de base d'un onduleur N niveaux en cascade formé par l'association en série de $N-1/2$ ponts à deux niveaux. La tension en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des $N-1/2$ tensions en sortie de ces ponts [14].

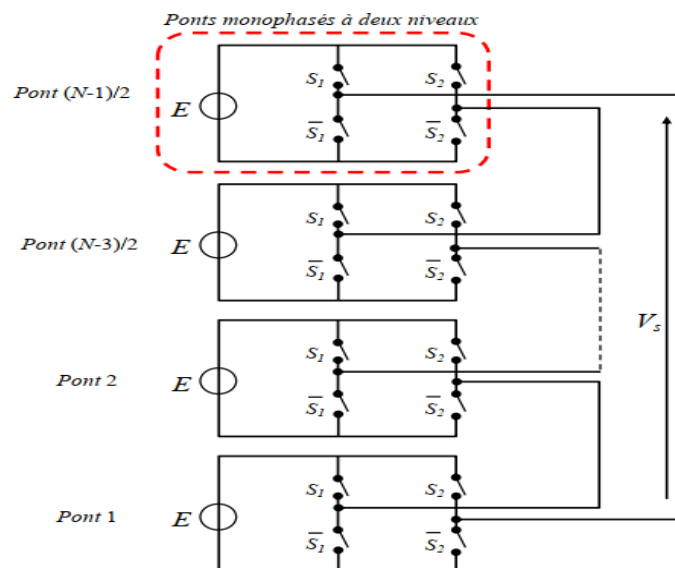


Figure II-18 Onduleur en cascade.

II.8. Etude théorique des onduleurs multicellulaires :

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, parmi les topologies multicellulaires on distingue :

- Les onduleurs multicellulaires séries FCMC (Flying Capacitor Multilevel Converters).
- Onduleurs multicellulaires superposés SMC (Stacked Multicellular Converters).
- Onduleurs multicellulaires parallèles PMC (Parallel Multicellular Converter).

Nous ferons une brève présentation pour les convertisseurs parallèles et superposé, puis nous ferons une étude approfondie pour les convertisseurs multicellulaires série.

II.8.1. Les onduleurs multicellulaires superposés SMC :

Le convertisseur multicellulaire superposé (SMC) a été développé au début des années 2000. P cellules de commutation sont connectées en série pour produire chacun de ses n étages, qui sont divisés par $P-1$ condensateurs flottants. Ce convertisseur est noté « SMC $P \times n$ », est capable de produire $(P \times n) + 1$ niveaux de tension [15].

En divisant la tension d'entrée en fractions et en répartissant les contraintes de tension entre plusieurs cellules de commutation, cette nouvelle architecture minimise le nombre de commutation pour les interrupteurs semi-conducteurs [16]. La fréquence de tension hachée et le nombre de niveaux plus élevés du convertisseur SMC offrent des performances dynamiques supérieures par rapport aux autres topologies. La figure II-19 illustre un onduleur SMC $P \times 2$:

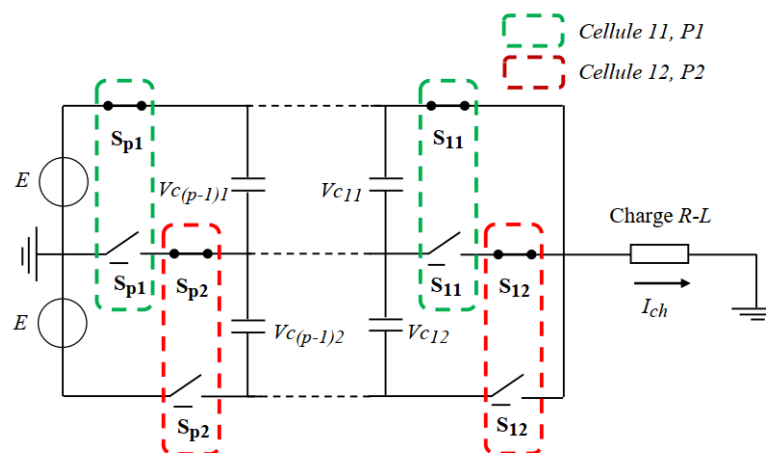


Figure II-19 Onduleur SMC $P \times 2$.

II.8.2. Les onduleurs multicellulaires parallèle PMC :

L'onduleur multicellulaire parallèle est apparu pour la première fois au début des années 1990. Sa structure était constituée de P inductances indépendantes reliant des cellules de commutation, également appelées inductances de liaison. Étant donné que les cellules sont connectées en parallèle, chaque cellule fonctionne sous une contrainte égale à I_E/P , ce qui abaisse efficacement les contraintes de courant sur les commutateurs électroniques [17]. La figure II-20 illustre un onduleur multicellulaire parallèle de P cellule de commutation :

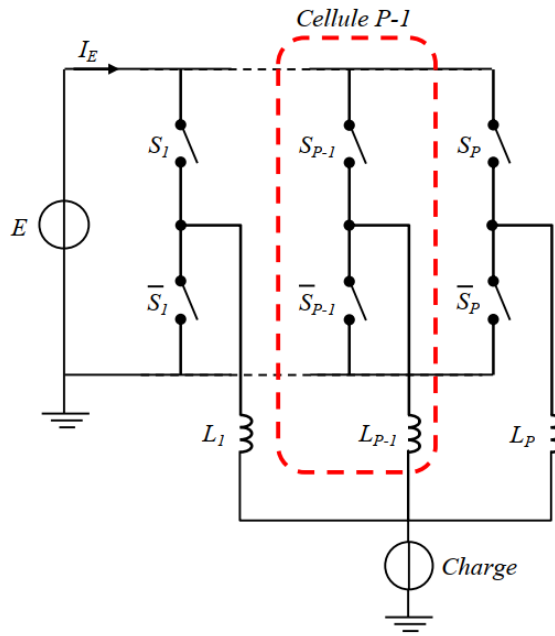


Figure II-20 Onduleur PMC à P cellule de commutation.

II.8.3. Les onduleurs multicellulaire séries FCMC :

Une topologie multicellulaire comportant P cellules de commutation distinctes, chacune séparée par $(P-1)$ condensateurs flottants, est illustré par l'architecture représentée sur la Figure II.20 :

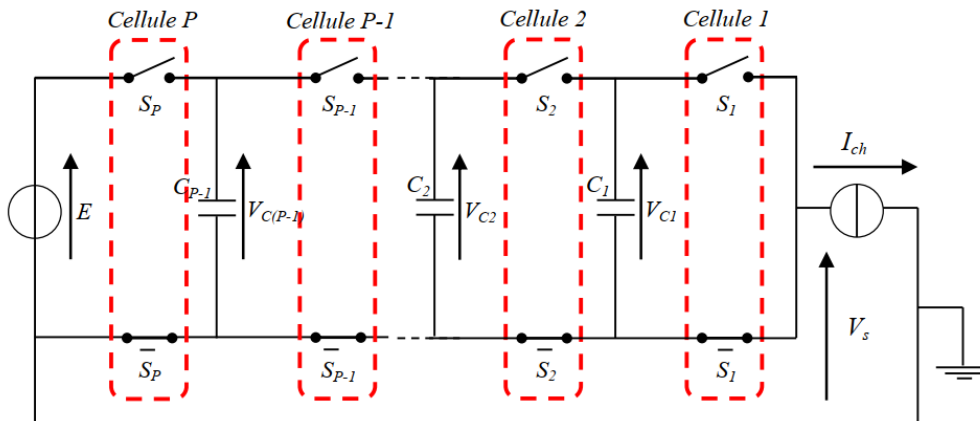


Figure II-21 Bras multicellulaire à P cellule de commutation.

Le convertisseur est composé de P cellules, chacune possédant une source de tension et deux interrupteurs. Les commutateurs fonctionnent en tandem, bloquant l'autre lorsque l'un est conducteur.

Lors de la connexion en série de composants semi-conducteurs, il est nécessaire d'assurer une répartition équilibrée de la tension d'alimentation entre les différents commutateurs. Si l'on remplace un seul interrupteur capable de supporter la tension E par deux interrupteurs évalués à $E/2$, il devient nécessaire de s'assurer que la tension appliquée à ces interrupteurs est équilibrée à $E/2$ [17]. Une solution consiste à incorporer une source de tension, comme illustré dans la Figure II.22 :

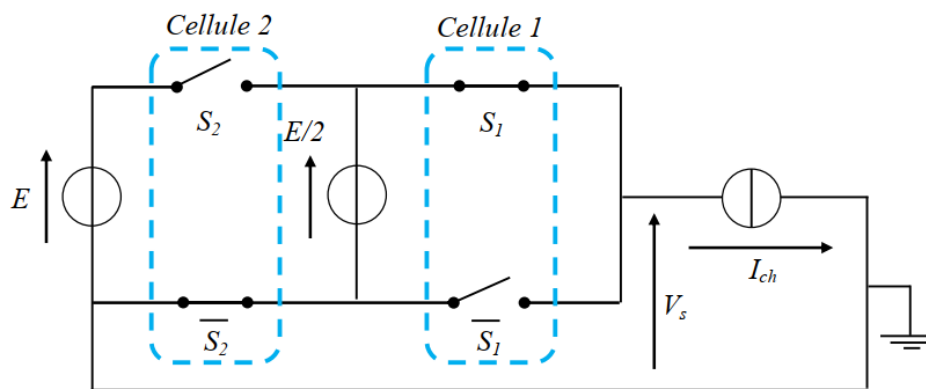


Figure II-22 Bras d'onduleur multicellulaire séries a deux cellule.

La source de tension flottant doit délivrer une tension de $E/2$ pour que le système soit équilibré.

II.8.3.1. Dynamique idéale des tensions des condensateurs flottants :

La dynamique des tensions flottantes doit suivre la dynamique de la tension d'alimentation principale E afin de garantir le fonctionnement prévu du convertisseur multicellulaire, ceci est essentiel pour maintenir une répartition équitable des contraintes de tension entre les différents semi-conducteurs de puissance au sein de la structure multiniveau. Cet équilibrage de tension doit être garanti en régime transitoire comme en régime permanent [18]. La Figure II.23 représente la dynamique idéale des tensions des condensateurs flottants lorsque on associe 5 cellules de commutation :

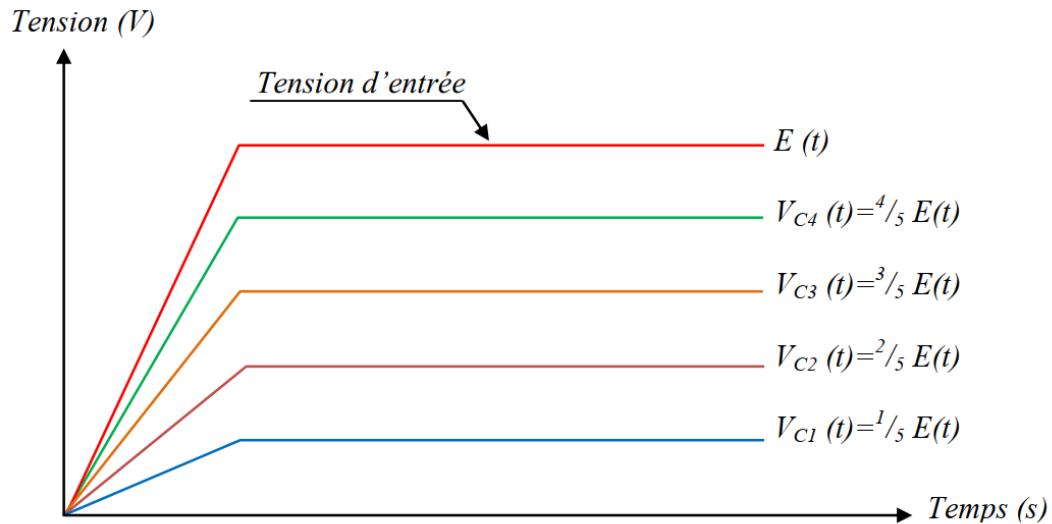


Figure II-23 Dynamique idéale des tensions flottantes.

II.9. Modélisation des onduleurs multicellulaire séries :

Il existe quatre modèles de modélisation différentes pour un convertisseur multicellulaire séries :

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

Dans cette recherche, on va présenter le modèle aux valeurs instantané.

II.9.1. Modèle aux valeurs instantanés :

Le modèle aux valeurs instantanées nous permettra de mettre en évidence le phénomène d'équilibrage naturel des tensions générées par les condensateurs [19].

Les hypothèses retenues pour la mise en œuvre du modèle aux valeurs instantanées d'un convertisseur multicellulaire série 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 façon complémentaire.
- La tension d'alimentation E est constante.
- Le point milieu est idéal.

II.9.1.1. Formulation générale :

Le convertisseur peut avoir jusqu'à 2^P configurations différentes du fait de la présence de P cellules, chacune ayant deux états possibles (avec des interrupteurs S_i et $\bar{S}_i$ dans des états complémentaires à tout moment).

Nous ferons référence au signal de commande connecté au commutateur S_i comme s_i . Si l'interrupteur S_i est passant, ce signal sera à l'état 1, et si l'interrupteur S_i est bloqué, il sera à l'état 0.

Ces 2^P configurations peuvent être rassemblées dans un système d'équations différentielles représentant l'évolution des tensions V_{ci} et du courant de charge I_{ch} .

Ce modèle peut être modélisé pour fonctionner comme un hacheur ou comme un onduleur, on s'intéresse au fonctionnement comme onduleur.

II.9.1.2. Fonctionnement onduleur :

La figure II.24 présente un onduleur multicellulaire à P cellules à point milieu capacitif, associé à une charge R - L .

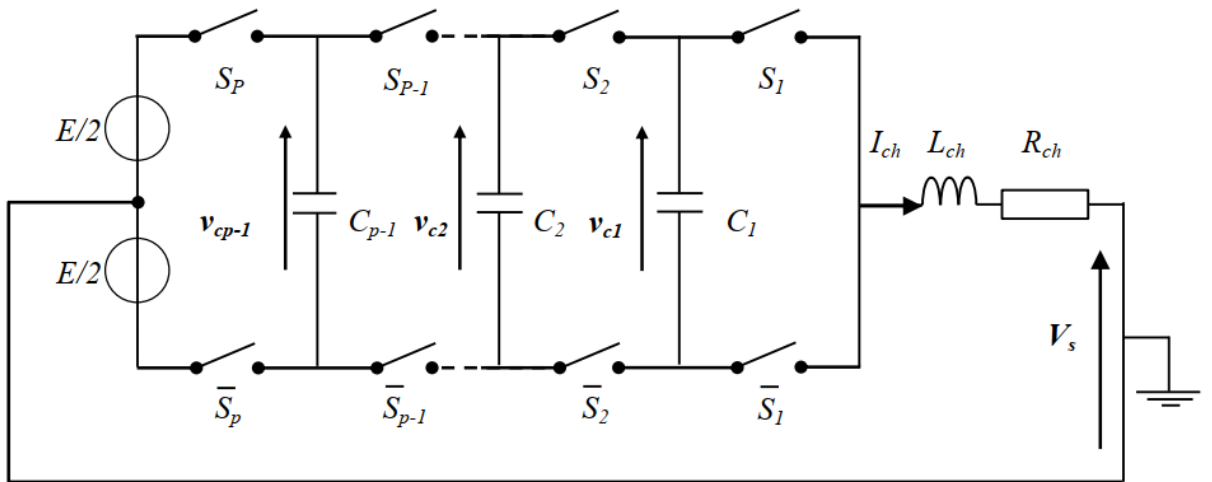


Figure II-24 Bras onduleur à P cellules, à point milieu capacitif, associé à une charge R - L .

La tension aux bornes de la charge V_{ch} devient :

$$V_{ch} = V_s - \frac{E}{2} = R_{ch}I_{ch} + L_{ch} \frac{d}{dt} I_{ch}$$

Ce qui donne une nouvelle expression de l'évolution du courant I_{ch} :

$$\frac{d}{dt} I_{ch} = \frac{V_s}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} I_{ch} - \frac{E}{2L_{ch}}$$

A partir de l'équation suivante :

$$V_s = \sum_{i=1}^P V_{\bar{s}i} = \sum_{i=1}^P S_i [V_{c_i} - V_{c_{(i-1)}}]$$

Nous obtenons la nouvelle expression générale de l'évolution du courant I_{ch} :

$$\frac{d}{dt} I_{ch} = S_1 \frac{V_{C1}}{L_{ch}} + S_2 \frac{[V_{C2} - V_{C1}]}{L_{ch}} + \dots + S_{P-1} \frac{[V_{C_{P-1}} - V_{C_{P-2}}]}{L_{ch}} + S_P \frac{[E - V_{C_{P-1}}]}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} I_{ch} - \frac{E}{2L_{ch}}$$

L'évolution des tensions V_{ci} est régie par l'équation :

$$C_i \frac{d}{dt} V_{c_i} = I_{c_i} = [S_{i-1} - S_i] I_{ch} = \frac{d}{dt} V_{c_i} \frac{[S_{i+1} - S_i]}{C_i} I_{ch}$$

Ainsi, le système d'équation représentant le modèle d'un onduleur à P cellules à point milieu est :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{c_1} = \frac{[S_2 - S_1]}{C_1} I_{ch} \\ \frac{d}{dt} V_{c_2} = \frac{[S_3 - S_2]}{C_2} I_{ch} \\ \vdots \\ \frac{d}{dt} V_{c_{P-1}} = \frac{[S_P - S_{P-1}]}{C_{P-1}} I_{ch} \\ \frac{d}{dt} I_{ch} = S_1 \frac{V_{C1}}{L_{ch}} + S_2 \frac{[V_{C2} - V_{C1}]}{L_{ch}} + \dots + S_{P-1} \frac{[V_{C_{P-1}} - V_{C_{P-2}}]}{L_{ch}} + S_P \frac{[E - V_{C_{P-1}}]}{L_{ch}} - \frac{R_{ch}}{L_{ch}} I_{ch} - \frac{E}{2L_{ch}} \end{cases}$$

L'expression de l'équation d'état avec les matrices :

$$\dot{X} = A \cdot X + B(X) \cdot S$$

$$X = [V_{C1} \quad V_{C_{V_{C1}}} \quad \dots \quad V_{C_{P-1}} \quad I_{ch}]^T, \quad S = [S_1 \quad S_2 \quad \dots \quad S_{P-1} \quad S_P]^T$$

$$B(X) = \begin{bmatrix} -\frac{I_{ch}}{C_1} & \frac{I_{ch}}{C_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{I_{ch}}{C_2} & \frac{I_{ch}}{C_2} & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & \vdots & \vdots & 0 \\ 0 & \vdots & 0 & -\frac{I_{ch}}{C_{P-1}} & \frac{I_{ch}}{C_{P-1}} \\ \frac{V_{C1}}{L_{ch}} & \frac{V_{C2} - V_{C1}}{L_{ch}} & \vdots & \frac{V_{C_{P-1}} - V_{C_{P-2}}}{L_{ch}} & \frac{E - V_{C_{P-1}}}{L_{ch}} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{R_{ch}}{L_{ch}} - \frac{E}{2L_{ch}} \end{bmatrix}$$

II.10. Avantages des onduleurs multicellulaire séries :

- Génération d'un plus grand nombre de niveaux de tension avec moins de composants, entraînant une meilleure qualité de tension et un (THD) réduite.
- Redondance inhérente grâce aux multiples condensateurs et états de commutation, permettant une continuité de fonctionnement en cas de défaillance de composants.
- Support de diverses stratégies de contrôle.

II.11. Stratégies de commande des onduleurs multicellulaire séries :

Les techniques de commande pour les onduleurs sont principalement utilisées pour obtenir une forme d'onde avec une amplitude et une fréquence réglable, et pour limiter ou éliminer les harmoniques causées par le découpage. La commande peut être en boucle fermée ou en boucle ouverte.

Il existe plusieurs techniques de commande, dans ce qui suit, on va présenter certaines de ces techniques, en boucle ouverte et en boucle fermée, puis on va choisir une de chaque type et l'étudier en profondeur.

II.11.1. Commande en boucle ouverte :

Le convertisseur multicellulaire est dit contrôlé en boucle ouverte lorsque le système n'utilise pas une boucle de retour pour ajuster ou réguler ses paramètres internes. Dans ce mode de fonctionnement, les variables de commande sont déterminées en fonction d'un ensemble prédéfini de conditions ou de commandes, sans tenir compte des résultats réels du système en temps réel.

A fine de produire de tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par des différents auteurs pour l'onduleur de tension, telle que :

- Commande MLI (Modulation de largeur d'impulsion).
- Commande symétrique.

- Commande décalée.
- Commande par élimination sélective d'harmoniques.

Dans ce qui suit, nous étudierons la technique MLI en profondeur comme exemple d'une technique de contrôle en boucle ouverte.

II.11.1.1. Commande par modulation de largeur d'impulsion :

La modulation de largeur d'impulsion consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable. [11]

A) Principe de la modulation de largeur d'impulsion :

La conversion alternative continue est assurée par les commutations des interrupteurs de l'onduleur, qui établissent ainsi des connexions temporaires entre les bornes positive et négative de la source d'alimentation continue et les lignes de la charge triphasée alternative. Le transfert d'énergie est contrôlé par le rapport entre les intervalles d'ouverture et de fermeture (rapport cyclique) de chaque interrupteur, donc par la modulation de largeurs d'impulsions de contrôle de ces interrupteurs. Cette technique repose sur la comparaison d'un signal de référence, également appelé modulatrice d'amplitude A_r et de fréquence F_r , avec un signal appelé porteuse d'amplitude A_p et de fréquence F_p très élevée.

Cette technique 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. [20]

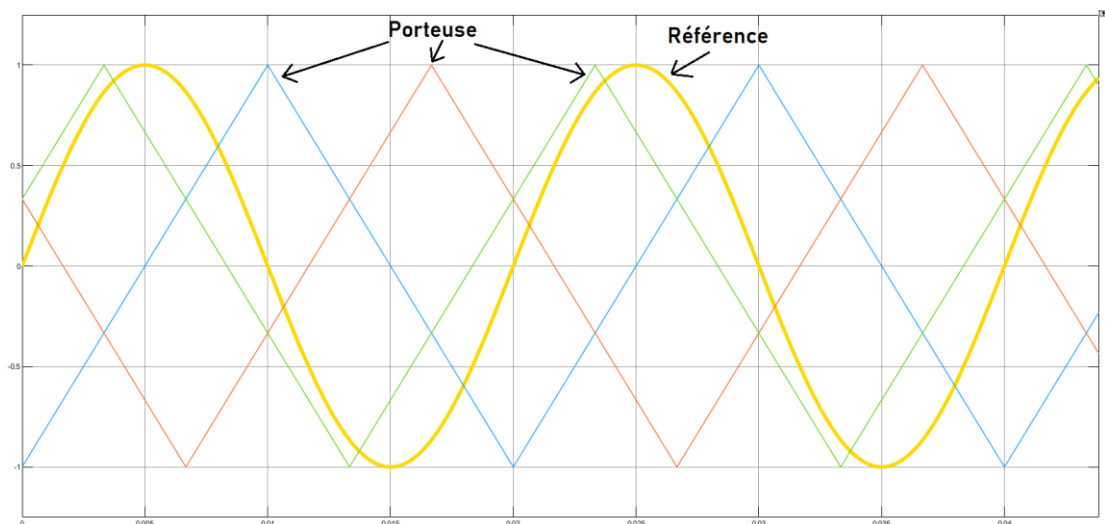


Figure II-25 Principe de MLI.

B) Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion :

- Les paramètres essentiels de la MLI sont :
 - La fréquence de modulation (de porteuses) : f_p
 - La fréquence de la référence : f_r
 - Amplitude de la référence : A_r
 - Amplitude de la porteuse : A_p
 - Le taux de modulation de fréquence : $M_f = \frac{f_p}{f_r}$
 - L'indice de régulation : $r = \frac{A_r}{A_p}$
- Selon la modulation, plus les valeurs de M_f et de r sont élevée, plus l'élimination des harmoniques devient efficace.
- La modulation est dite synchrone lorsque M_f est un nombre entier, ce qui donne une tension de sortie qui se réplique de manière identique à chaque période $T = 1/f$.
- Pour le choix de M_f , il faut prendre en compte les pertes supplémentaires lors des transitions entre les états. Ces pertes augmentent à mesure que la fréquence de modulation augmente.
- On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras.

Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire- sinusoïdale triphasé est donné par la Figure (II-26) :

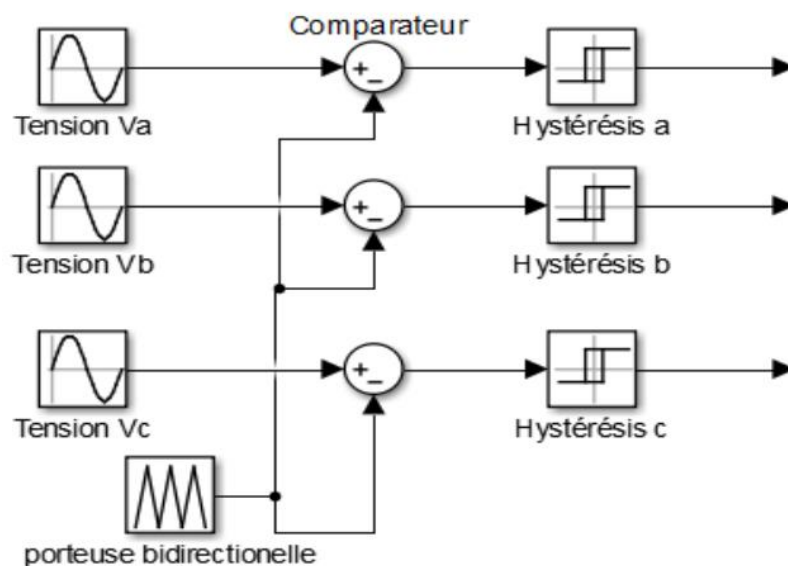


Figure II-26 Schéma synoptique de la commande en MLI.

C) Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsions :

➤ **La modulation linéaire multiple :**

Cette technique compare un signal de référence linéaire avec une porteuse triangulaire [11]. Une séquence d'impulsions carrées de largeur égale constitue la forme d'onde de sortie (Figure II.27).

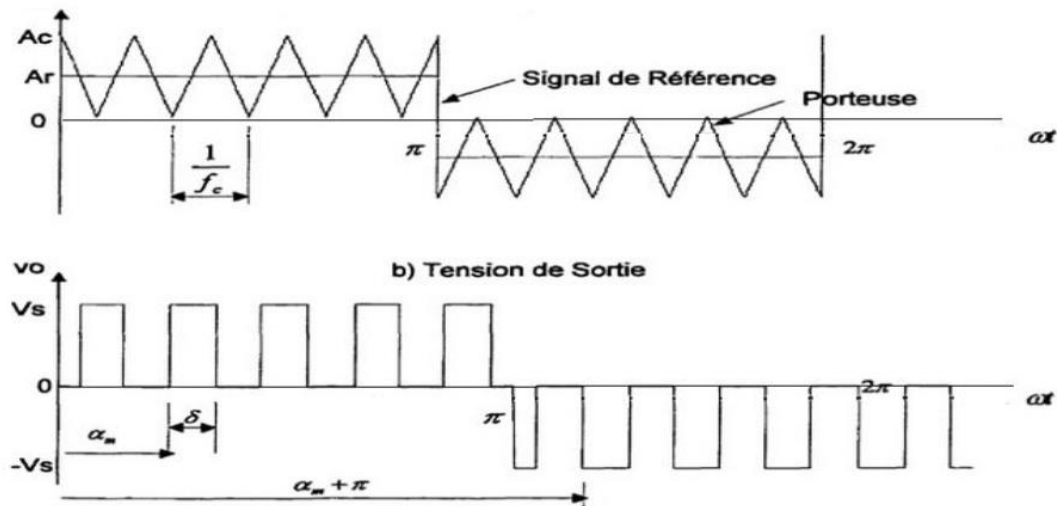


Figure II-27 La modulation de largeur d'impulsions multiples.

➤ **La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire :**

Puisque le signal de référence dans ce cas est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (Figure II-28) [11].

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et le signal modulant.

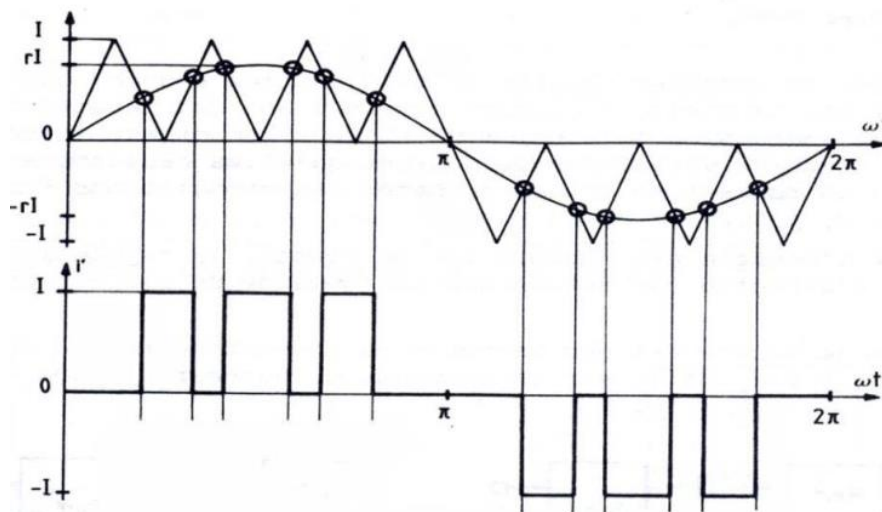


Figure II-28 MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.

➤ **La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) :**

Le signal référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Figure.II-29) [11].

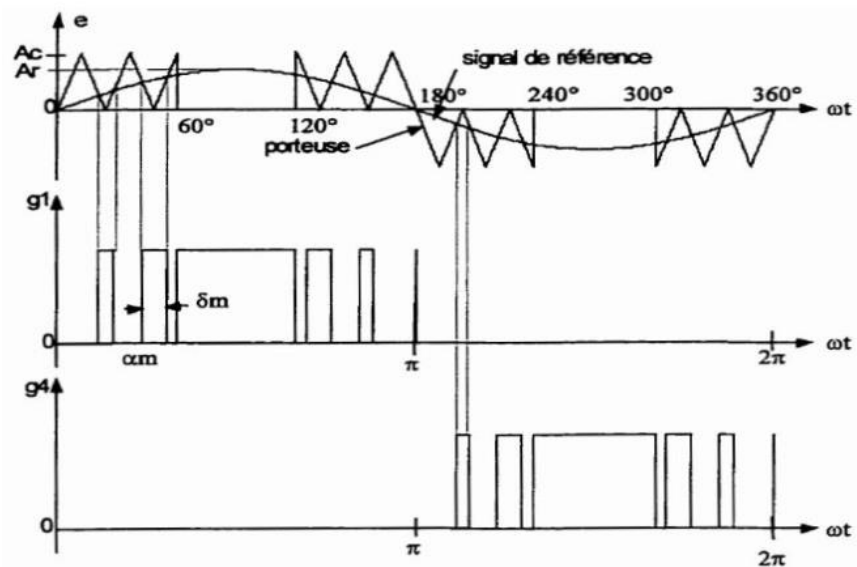


Figure II-29 La modulation sinusoïdale modifiée.

➤ **La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle :**

Le principe de cette technique est le même que celui de la modulation sinusoïdale, sauf que la porteuse triangulaire est bidirectionnelle (bipolaire), (Figure.II-25).

II.11.2. Commande en boucle fermé :

La commande en boucle fermée est une stratégie de commande dans laquelle des signaux de retour sont utilisés pour ajuster et réguler en continu les paramètres du système. En comparant les valeurs mesurées aux valeurs de consigne, cette approche permet d'ajuster la sortie du système pour atteindre et maintenir un état désiré.

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

- **Les commandes en durée :** La commande « en durée » fait référence à une technique de contrôle dans laquelle les valeurs du rapport cyclique, ou les temps de conduction des semi-conducteurs, sont les variables contrôlant le convertisseur. Voici trois types de contrôle 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).
- **Commande en amplitude :** Il comprend tous les types de commande dans lesquels les grandeurs essentielles du convertisseur définissent directement l'état des interrupteurs [21]. Les commandes d'amplitude sont souvent toutes des commandes de fourchette (courant, etc.) et des commandes de valeur de crête.

Nous avons choisi de présenter la commande en amplitude, spécifiquement la commande par mode de glissement.

II.11.2.1. Commande par mode de glissement :

Dans la commande par mode de glissement des systèmes à structure variable, la trajectoire de l'état est orientée vers une surface et est contrainte de rester près de cette surface par la règle de commutation [22]. Cette surface est connue sous le nom de « surface de glissement » et le mouvement le long de celle-ci est appelé mouvement de glissement.

L'objectif du contrôle par mode de glissement peut être décrit en deux points clés :

- Créez une surface $s(x)$ telle que toutes les trajectoires du système suivent le comportement requis en matière de suivi, de régulation et de stabilité.
- Déterminez une loi de contrôle u (commutation) qui attirera et maintiendra toutes les trajectoires d'état sur la surface de glissement.

La conception de la loi de commande peut être réalisée selon trois processus majeurs fortement interdépendants :

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence de la convergence.
- La détermination de la loi de commande.

Choix de la surface de glissement :

On considère le système dynamique représenté par :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad \text{.. (1)}$$

x : est le vecteur d'état.

$x_{réf}$: est le vecteur de référence.

L'erreur $\tilde{x}$ est la différence entre le vecteur de référence et le vecteur d'état.

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence $x_{réf}$,

Slotine propose la forme générale suivante [22] :

$$s(x) = \left(\frac{d}{dt} + \gamma \right)^{r-1} \tilde{x} \quad .. \quad (2)$$

γ : Constante positive.

R : Degré relatif.

Condition d'existence de la convergence :

Pour vérifier cette condition, on utilise l'approche de Lyapunov. Il s'agit de choisir une fonction de Lyapunov $V(x) > 0$ (fonction scalaire positive) pour les variables d'état du système et de choisir une loi de commande qui fera décroître cette fonction (la dérivée de la fonction de Lyapunov est négative) [22].

En définissant, par exemple, une fonction de Lyapunov pour le système comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \quad .. \quad (3)$$

En dérivant cette dernière, on obtient :

$$\dot{V}(x) = \dot{s}(x)s(x) \quad .. \quad (4)$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative

$$\dot{s}(x)s(x) < 0 \quad .. \quad (5)$$

Détermination de la loi de commande :

La dynamique du système devient indépendante de la loi de commande, qui cherche simplement à préserver les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), une fois le mode glissement atteint. Pour cette raison, la surface est établie indépendamment de la commande. Ce qui reste à faire est de déterminer la commande requise pour amener la trajectoire d'état à la surface et éventuellement à son point d'équilibre tout en préservant les critères d'existence du mode glissant [22].

Le régime de glissement ne peut être obtenu qu'avec une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux cotées. Par conséquent, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. Il est vrai que la partie continue peut minimiser l'amplitude de la partie discontinue dans la mesure nécessaire. L'objectif principal de la partie discontinue en présence de perturbation est de confirmer les conditions d'attractivité. Dans ce cas, une commande à mode de glissement est composée de deux parties : l'une qui traite de la stabilité (u_n) et l'autre de la linéarisation précise (u_{eq}).

$$u = u_n + u_{eq} \text{ .. (6)}$$

u_{eq} correspond à la commande proposée par Filipov. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $s(x) = 0$. La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle.

La commande discrète un est déterminée pour vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système.

Afin de mettre en évidence le développement précédent, on considère le système d'état. On cherche à déterminer l'expression analogique de la commande u .

La dérivée de la surface $s(x)$ est :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \text{ .. (7)}$$

En remplaçant les équations (1) et (6) dans (7), on trouve :

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} [f(x) + g(x)u_{eq}] + \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u_n \text{ .. (8)}$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont également nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente.

$$u_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \left[\frac{\partial s}{\partial x} f(x) \right] \text{ .. (9)}$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \neq 0 \text{ .. (10)}$$

La condition d'attractivité $\dot{s}(x)s(x) < 0$ devient :

$$s(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x) u_n < 0 \text{ .. (11)}$$

Afin de satisfaire la condition d'attractivité, le signe de u_n doit être opposé à celui de $s(x) \frac{\partial s}{\partial x} g(x)$. La forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'une fonction *sign*.

$$u_n = K_x \text{sign } s(x) \quad .. \quad (12)$$

Le signe de k_x doit être différent de celui de $\frac{\partial s}{\partial x} g(x)$. La figure II.30 représente la fonction *sign*.

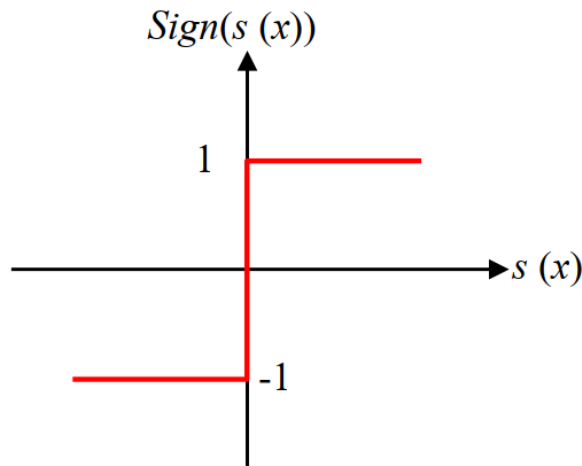


Figure II-30 représentation de la fonction *sign*.

La commande de tels systèmes par mode de glissement a, en général, deux modes de fonctionnement :

- Le mode non-glissant (reaching mode) ou mode d'accès, ou encore mode de convergence.
- Le mode glissant (sliding mode).

Ainsi, la trajectoire de phase partant d'une condition initiale quelconque atteint la surface de commutation en un temps fini (mode non-glissant) puis, tend asymptotiquement vers le point d'équilibre avec une dynamique définie par le mode glissant (figure II-31).

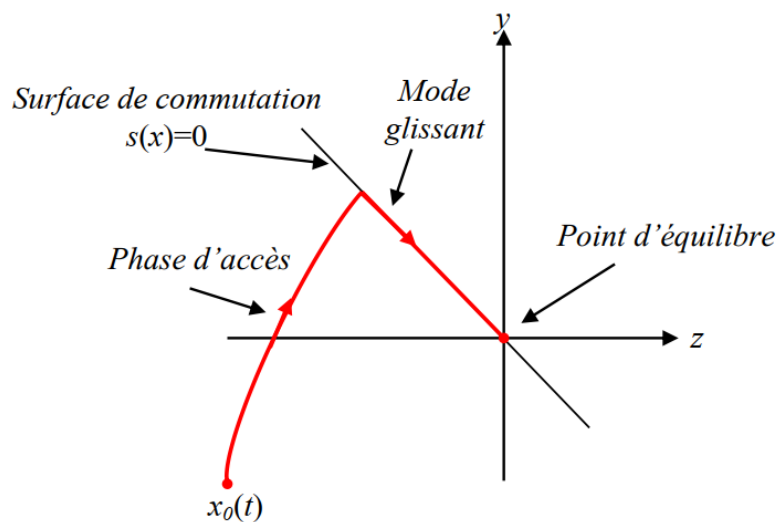


Figure II-31 Modes de fonctionnement.

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants électroniques semi-conducteurs tels que les diodes, les thyristors et les transistors, et les convertisseurs statiques notamment les hacheurs et les onduleurs.

Nous avons ensuite abordé les onduleurs multiniveaux en présentant les différentes topologies telles que la structure NPC et SMC, en expliquant leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons mis l'accent les onduleurs multiniveaux de type multicellulaire et leurs stratégies de commande, en mettant l'accent sur les stratégies de commande MLI-ST et la commande par mode glissant. Cette étude nous a permis de comprendre comment ces stratégies de commande peuvent être appliquées pour optimiser le fonctionnement des onduleurs multiniveaux.

Nous avons conclu que les onduleurs multicellulaires présentent de nombreux avantages. Ils génèrent un plus grand nombre de niveaux de tension avec moins de composants, ce qui améliore la qualité de la tension et réduit le (THD). Leur redondance inhérente, grâce aux multiples condensateurs et états de commutation, permet une continuité de fonctionnement en cas de défaillance de composants. De plus, ces onduleurs supportent diverses stratégies de contrôle, ce qui les rend très flexibles et adaptables à différentes applications.

Chapitre III

Simulation Des Onduleurs Multicellulaires Séries à MLI

Chapitre III. Simulation Des Onduleurs Multicellulaires Séries à MLI

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la simulation des onduleurs multicellulaires série. Nous présenterons les résultats de la simulation de deux types d'onduleurs : un onduleur à 3 cellules et un onduleur à 5 cellules, en utilisant la stratégie de commande MLI-Sinus Triangle (PWM en Anglais). Nous comparerons également les performances des deux onduleurs, en évaluant leur efficacité et leur comportement dans différentes conditions de fonctionnement.

III.2. Paramètres de simulation :

Les simulations sont effectuées à l'aide de MATLAB Simulink (Ver.R2020b). Les onduleurs sont simulés on triphasé alimentant une charge RL. Ce tableau représente les paramètres utilisés :

Temps d'échantillonnage	E	f_r	R_{ch}	L_{ch}	C_f
1 μ s	400V	50Hz	6 Ω	10 mH	100 μ F

Tableau III-1 Paramètres de simulation des onduleurs à 3 et à 5 cellules.

III.3. Onduleur à trois cellules :

III.3.1. Structure :

La structure de l'onduleur (Figure III-1) comprend trois bras, chacun contenant trois cellules de commutation connectées en série. Chaque cellule de commutation est composée de deux interrupteurs bidirectionnel (IGBT). De plus, deux condensateurs flottants dans chaque bras.

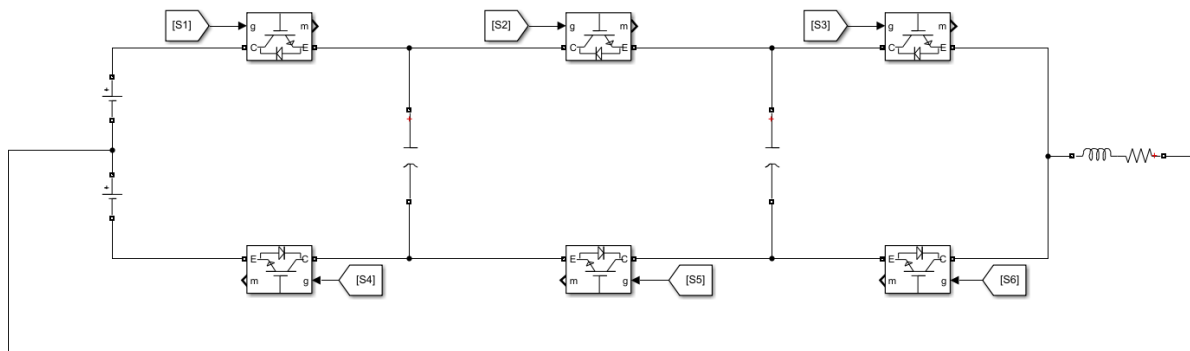


Figure III-1 Bras d'onduleur à 3 cellule.

III.3.2. La commande :

La technique MLI-Sinus Triangle est employée pour la commande des onduleurs. Pour l'onduleur à 3 cellules, trois porteuses sont utilisées, représentées par 3 ondes triangulaire d'amplitude $A_p = 1$, et une onde sinusoïdale de référence avec une amplitude $A_r = 0.9$ et une fréquence $f_r = 50$ Hz. Voici le bloc de commande utilisé pour un bras d'onduleur :

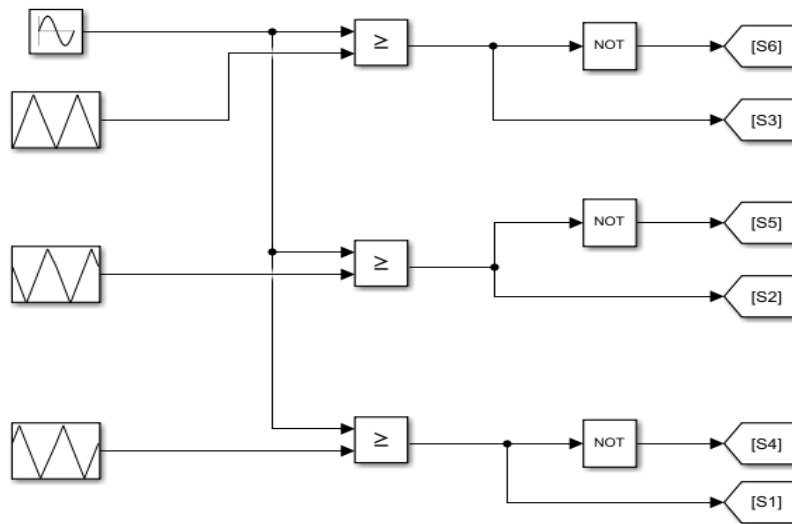


Figure III-2 Bloc de commande d'un bras d'onduleur à 3 cellules

Voici le tableau de vérité, les signaux de porteuses et le signal de référence, et les signaux de commande de chaque groupe d'interrupteur :

Etat	S1	S2	S3	V_s
1	1	1	1	E
2*	1	1	0	$2E/3$
3	1	0	0	$E/3$
4	0	0	0	-E
5	0	1	1	$-E/3$
6*	0	0	1	$-2E/3$
7*	1	0	1	0
8*	0	1	0	0

Tableau III-2 Séquence de fonctionnement des interrupteurs d'onduleur à 3 cellules.

* : Ces cas sont seulement possibles si l'onduleur est en triphasé.

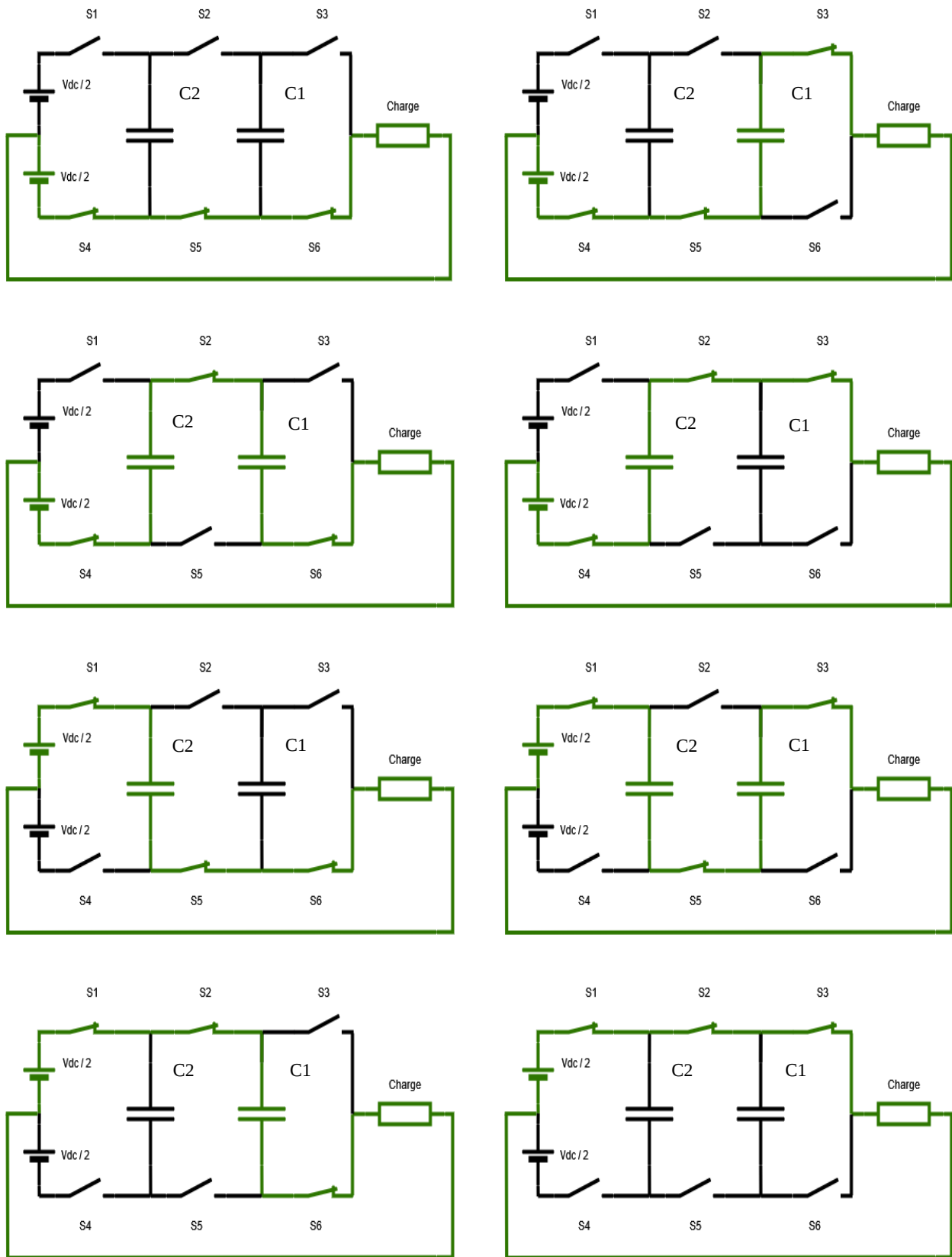


Figure III-3 Représentation graphique des sequence de fonctionnement d'onduleur à 3 cellules.

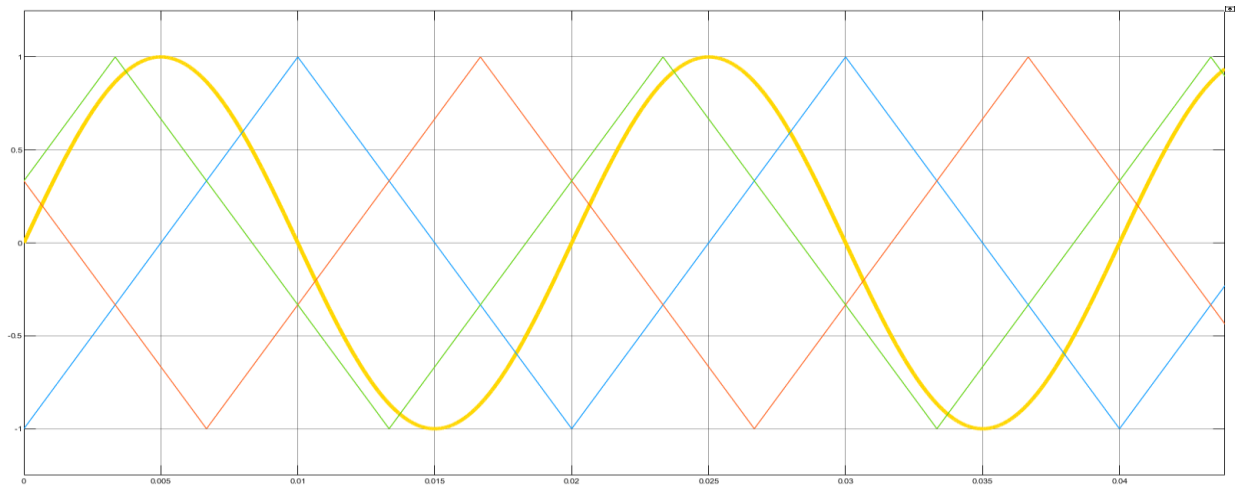


Figure III-4 Signal de référence et signaux de porteuses (à 50Hz) pour l'onduleur à 3 cellule.



Figure III-5 Signaux de commande des interrupteurs superieur.

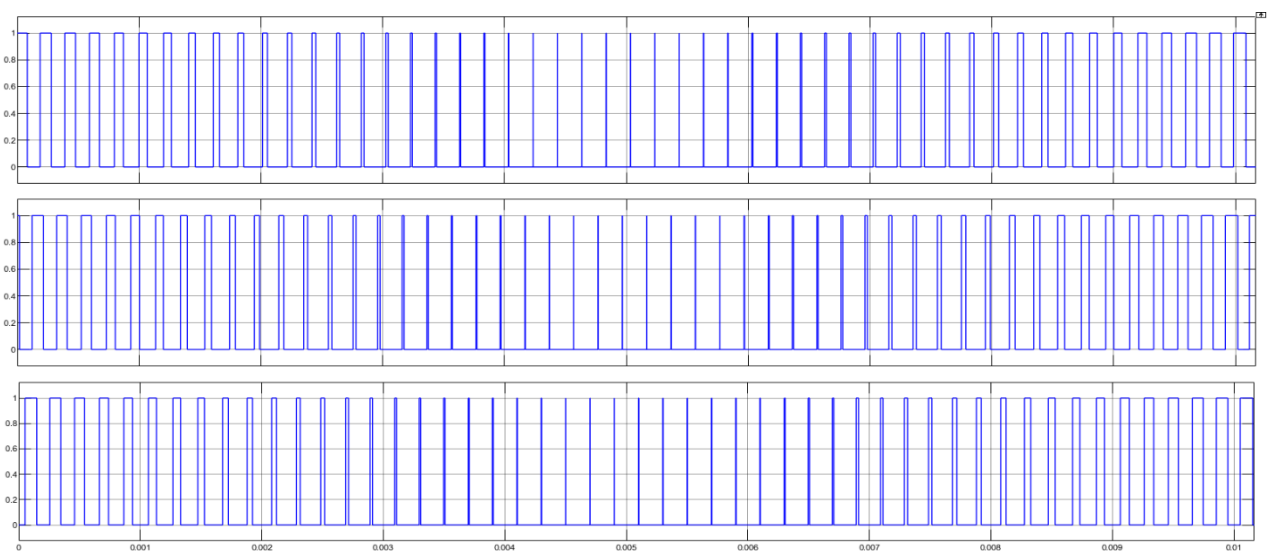


Figure III-6 Signaux de commande des interrupteurs inférieur.

III.3.3. Résultats de simulation :

On simule pour des différentes valeurs de taux de modulation de fréquence M_f et d'indice de régulation r avec :

$$M_f = \frac{f_p}{f_a} \quad \text{Et} \quad r = \frac{A_r}{A_p}$$

f_p : Fréquence de signal de porteuses.

f_a : Fréquence de signal de référence.

A_r : Amplitude de signal de référence.

A_p : Amplitude de signal de porteuses.

❖ Pour $M_f = 45$ ($f_p = 2250\text{Hz}$) :

✓ $r = 0.4$:

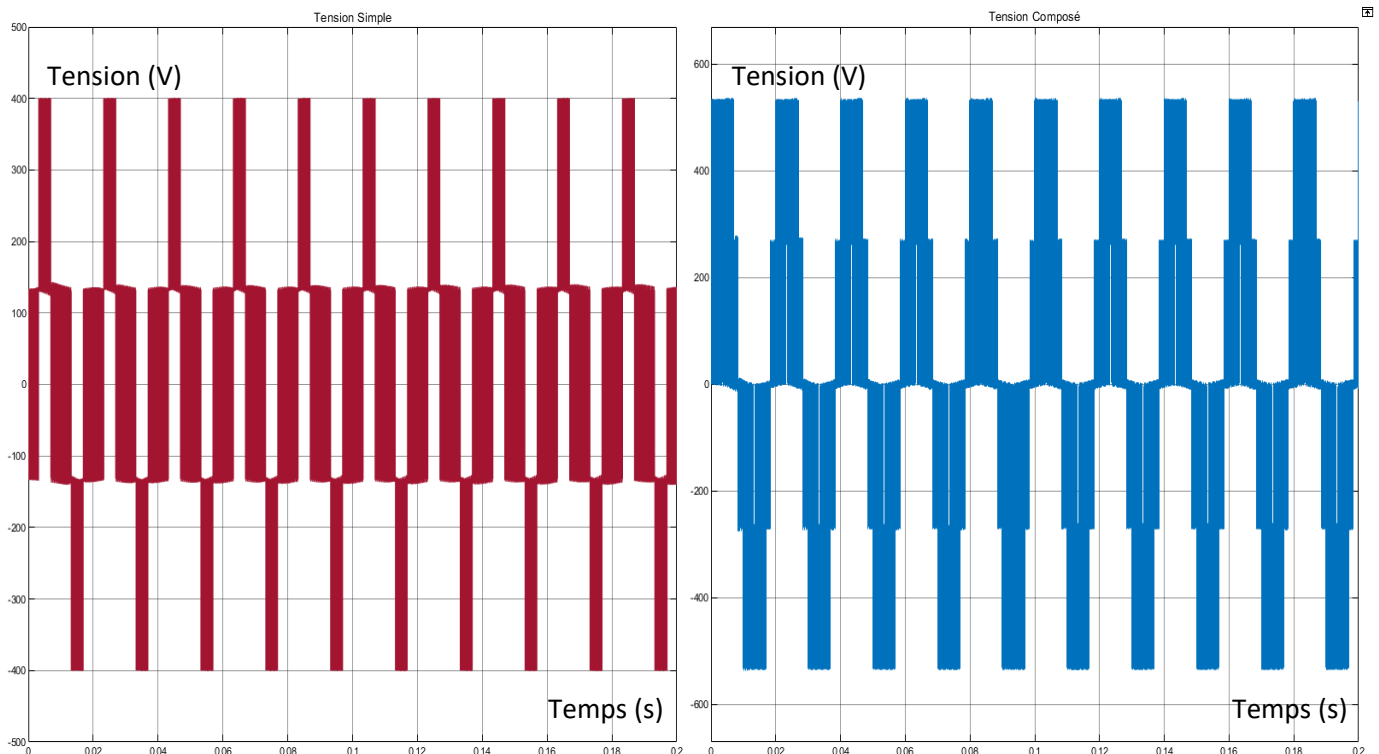


Figure III-7 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 45$ pour l'onduleur à 3 cellules.

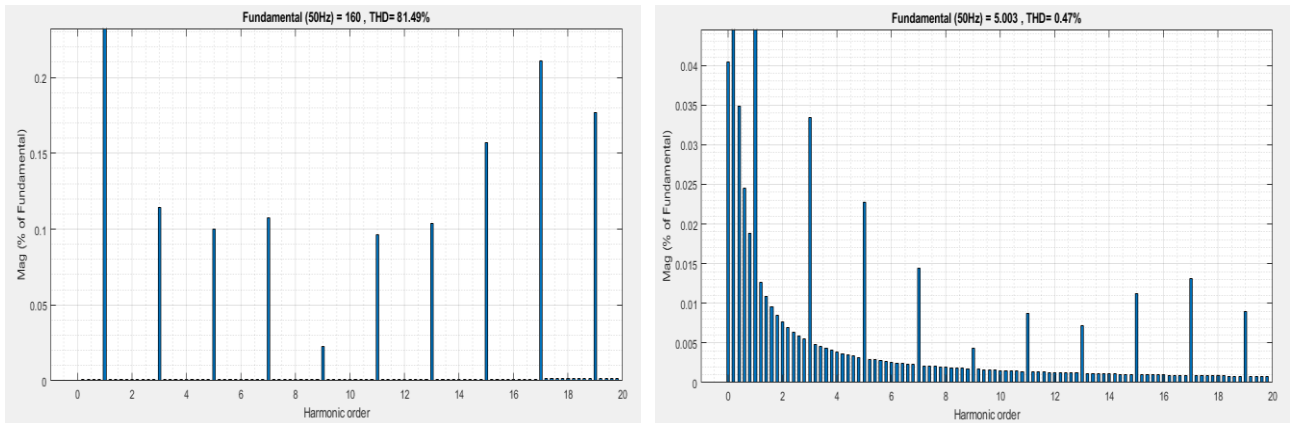


Figure III-8 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.4$)

✓ $r = 0.9$:

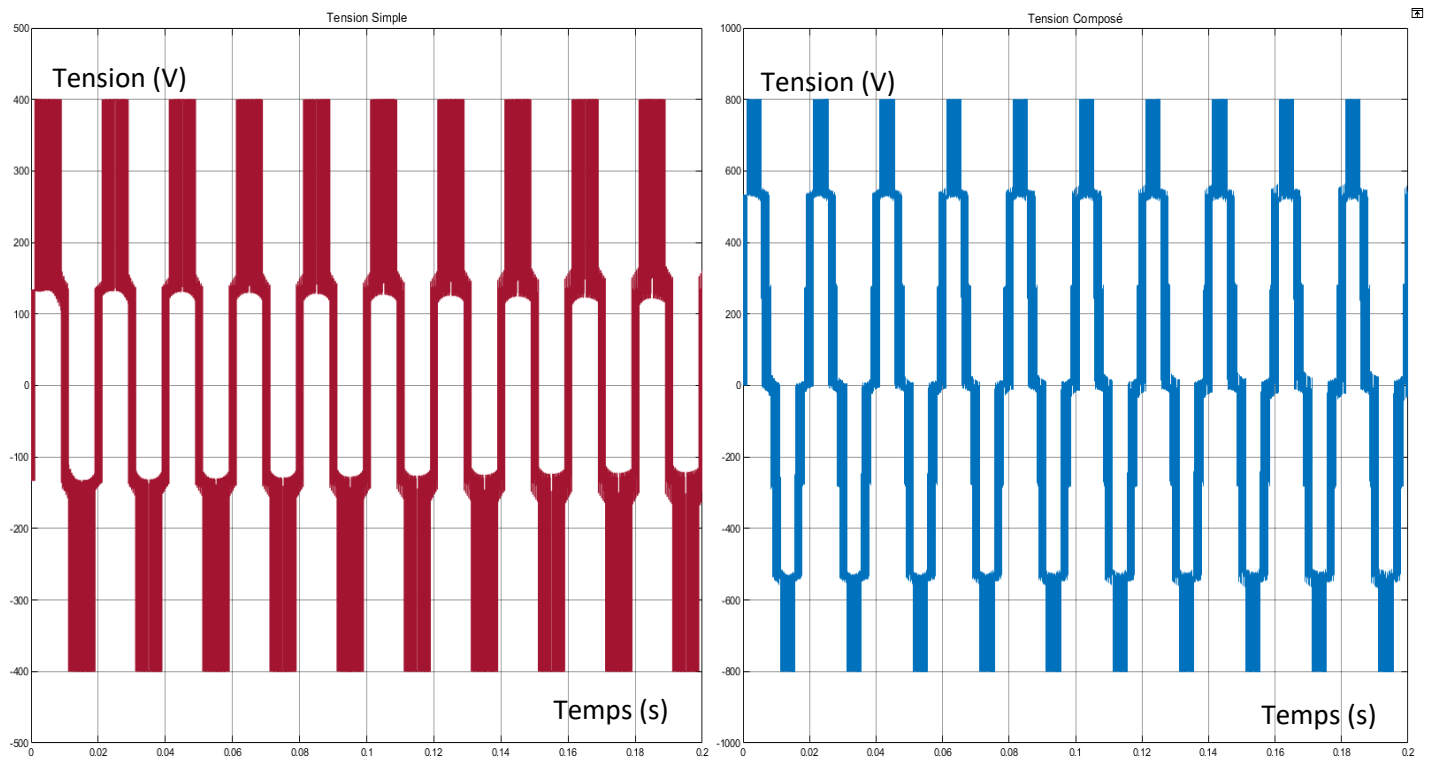


Figure III-9 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 45$ d'onduleur à 3 cellule.

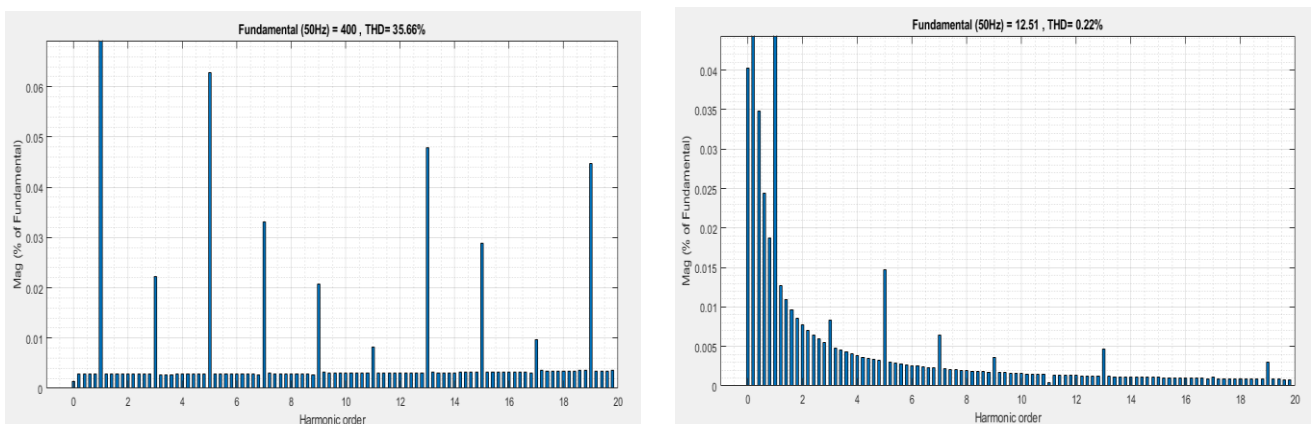


Figure III-10 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.9$)

❖ Pour $M_f = 100$ ($f_p = 5000\text{Hz}$) :

✓ $r = 0.4$:

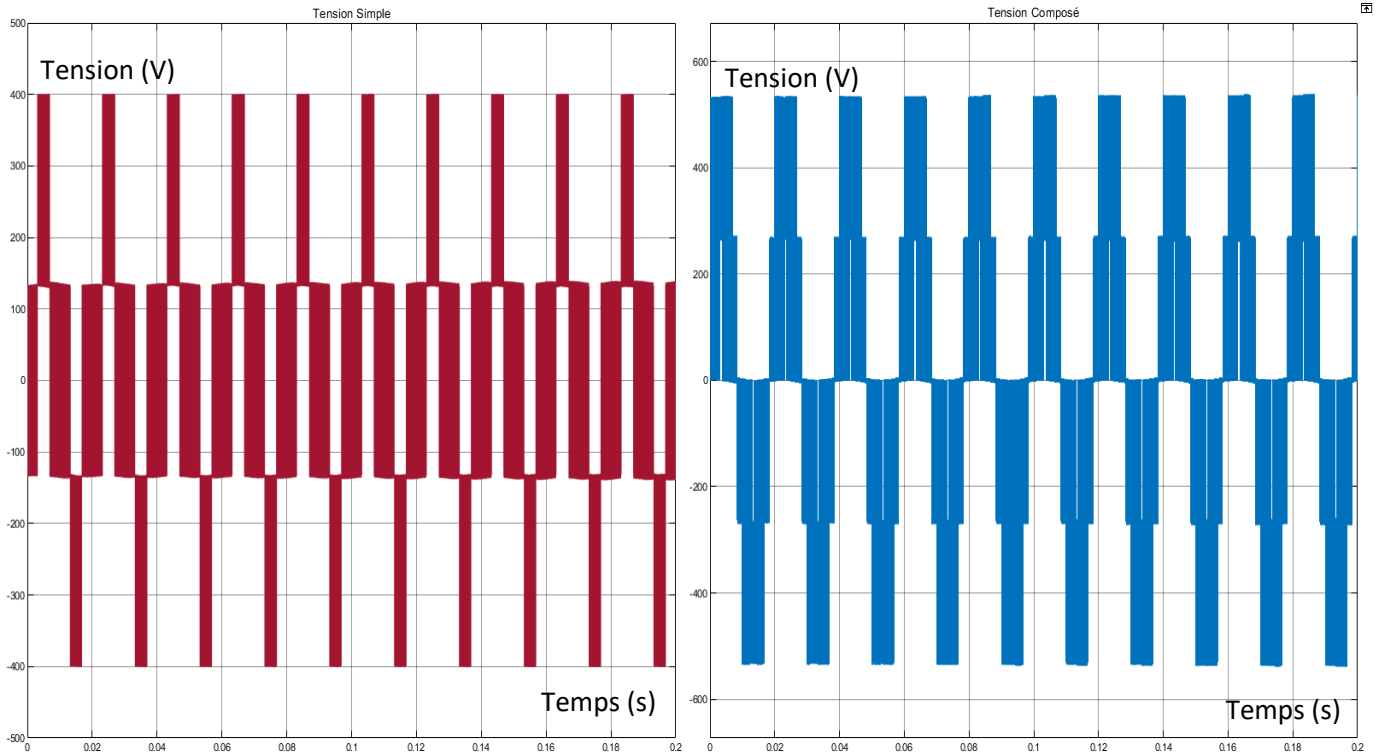


Figure III-11 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 100$ d'onduleur à 3 cellule.

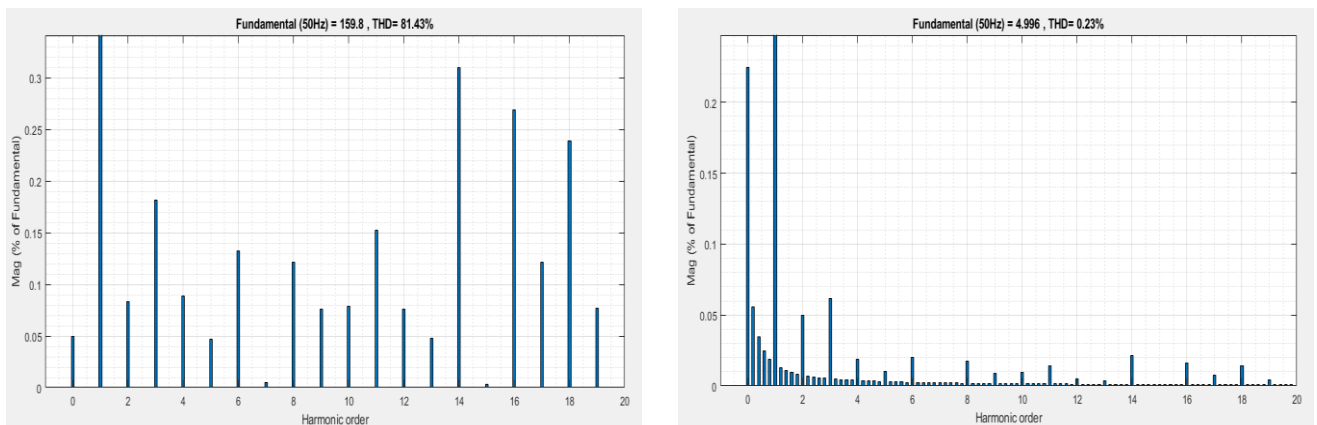


Figure III-12 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.4$)

✓ $r = 0.9$:

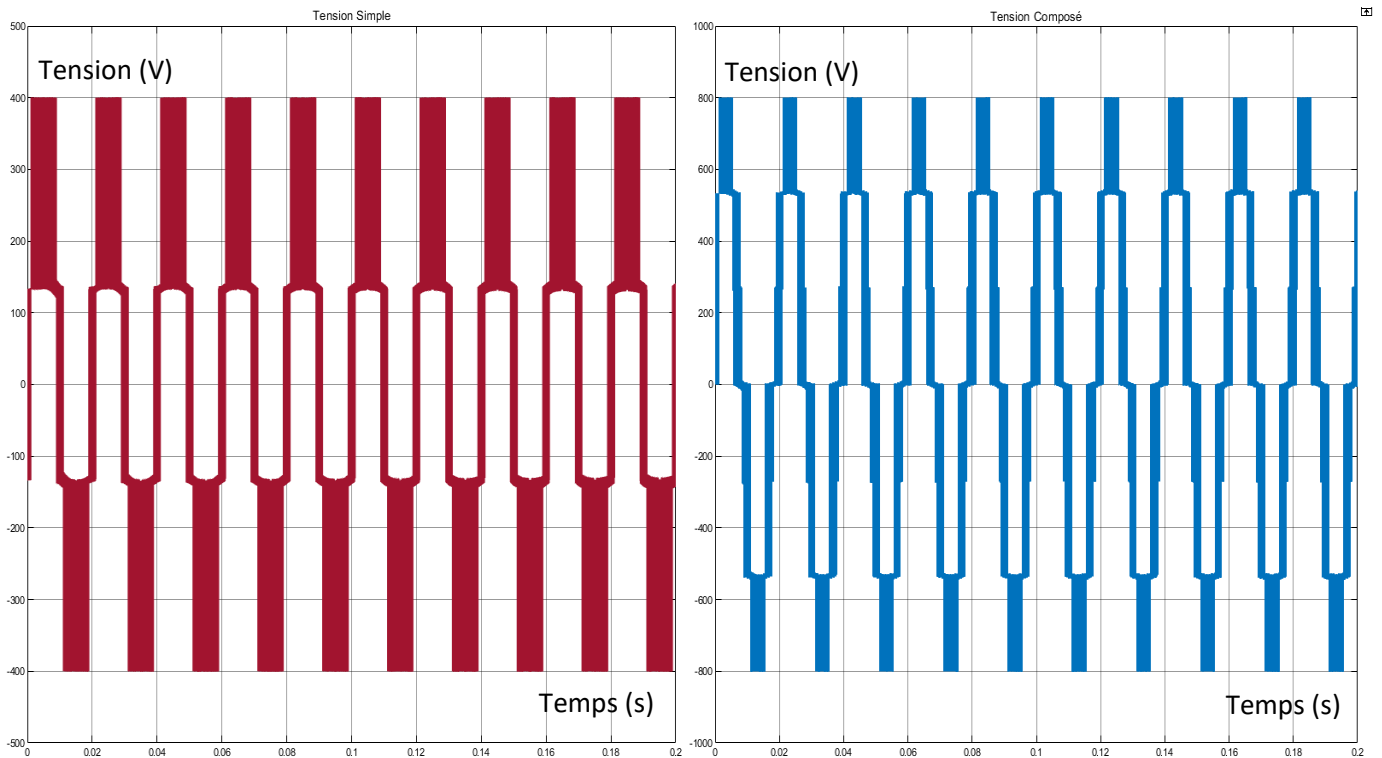


Figure III-13 Tension simple et composé pour $r=0.9$, $M_f=100$ pour l'onduleur à 3 cellule.

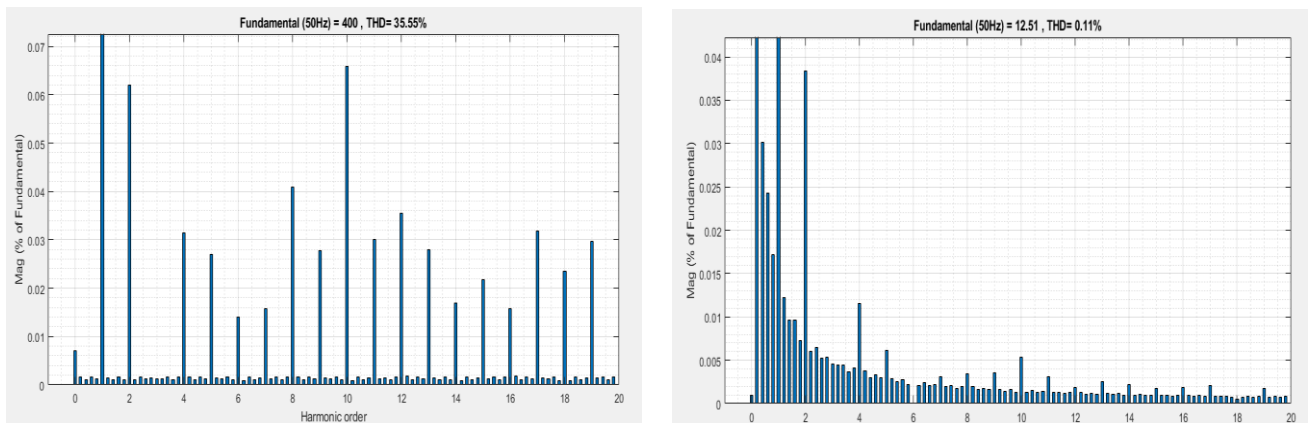


Figure III-14 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 3 cellule. ($M_f=100$, $r=0.9$)

III.3.4. Interprétation des résultats :

- On remarque que la qualité de tension de sortie est liée directement au taux de modulation de fréquence M_f et l'indice de régulation r , avec l'augmentation de M_f et r , la qualité de tension augmente considérablement.
- Pour $r=0.4$, il est difficile de distinguer entre les différents niveaux de tension, surtout dans la courbe de tension composé, contrairement à la valeur appropriée $r=0.9$, où les niveaux sont facilement distingués. La qualité s'améliore encore en augmentant le taux de modulation de fréquence M_f à 5k Hz, où la forme d'onde est beaucoup plus claire et propre.

- La tension simple porte bien les 4 niveaux de tension : $E, E/3, -E/3, -E$.
- La tension composée porte bien les 7 niveaux de tension : $2E, 4E/3, 2E/3, -2E/3, -4E/3, -2E$.
- Le tableau suivant résume les résultats obtenus concernant le THD :

Mf = 45				Mf = 100			
r = 0.4		r = 0.9		r = 0.4		r = 0.9	
THD de courant	THD de tension	THD de courant	THD de tension	THD de courant	THD de tension	THD de courant	THD de tension
0.47%	81.49%	0.22%	35.66%	0.23%	81.43%	0.11%	35.55%

Tableau III-3 Les valeurs de THD% obtenu par simulation de l'onduleur à 3 cellules.

- On remarque que la valeur de THD est liée directement au Mf et r. L'augmentation de ces derniers, améliore le THD considérablement.
- Pour le THD de tension, on remarque que r a un effet considérable ($\sim 81.5\%$ à $\sim 35.6\%$) pour les deux valeurs de Mf, contrairement au Mf qui a un effet négligeable ($81.49\% - 81.43\%$) et ($35.66\% - 35.55\%$).
- Pour le THD de courant, on remarque aussi que r a un effet considérable pour les deux valeurs de Mf (0.47% à 0.22% pour Mf = 45 et 0.23% à 0.11% pour Mf = 100), montrant une réduction significative du THD avec une augmentation de r. En revanche, Mf a également un effet notable (0.47 à 0.23 pour $r = 0.4$ et 0.22 à 0.11 pour $r = 0.9$), montrant que l'augmentation de Mf réduit également considérablement le THD de courant. Comparativement, le THD de tension n'est que faiblement affecté par l'augmentation de Mf, comme indiqué dans le tableau (81.49% à 81.43% pour $r=0.4$ et 35.66% à 35.55% pour $r=0.9$).

III.4. Onduleur à cinq cellules :

III.4.1. Structure :

La structure de l'onduleur à cinq cellules (Figure III-14) est la même avec celle de trois cellules, avec l'ajout de quatre interrupteurs bidirectionnels supplémentaires (IGBT), et deux condensateurs flottants supplémentaires pour les deux cellules supplémentaires pour chaque bras.

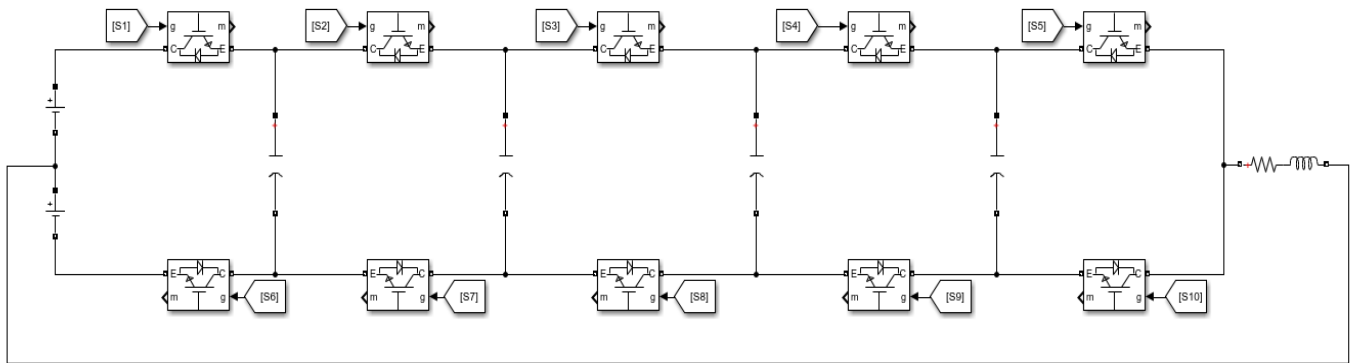


Figure III-15 Bras d'onduleur à 5 cellule.

III.4.2. La commande :

En raison de l'ajout de deux cellules de commutation supplémentaires, deux porteuses supplémentaires sont nécessaires. Les paramètres de commande restent identiques, à l'exception du décalage des porteuses. Voici le bloc de commande pour 5 cellules :

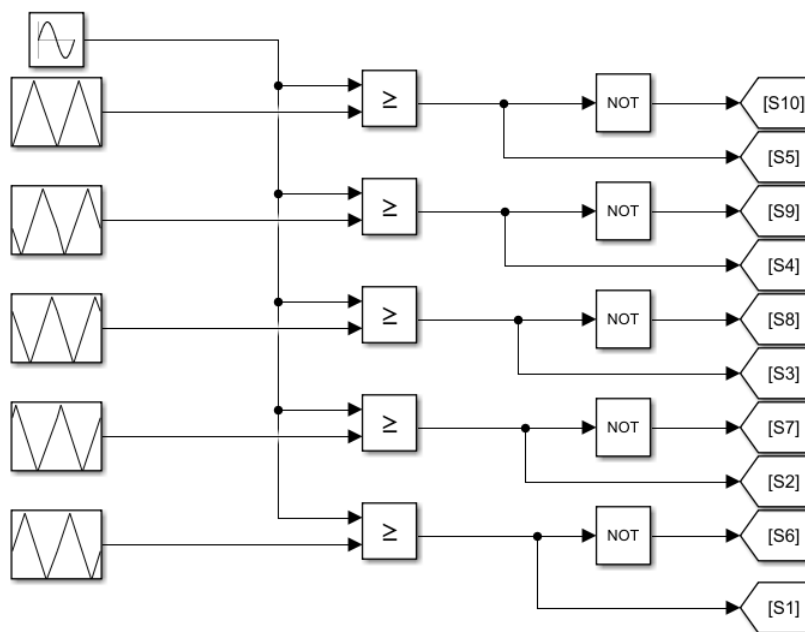


Figure III-16 Bloc de commande d'un bras d'onduleur à 5 cellules

Voici une partie du tableau de vérité, les signaux de porteuses et le signal de référence, et les signaux de commande de chaque groupe d'interrupteur :

Etat	S1	S2	S3	S4	S5	V_s
1	0	0	0	0	0	-E
2*	0	0	0	0	1	-4E/5
3*	0	0	0	1	0	-2E/5
4	0	0	0	1	1	-3E/5
5*	0	0	1	0	0	0
6	0	0	1	0	1	-E/5
7	0	0	1	1	0	-E/5
8*	0	0	1	1	1	-2E/5
9*	0	1	0	0	0	-2E/5
10	0	1	0	0	1	-3E/5
11	0	1	0	1	0	-E
12*	0	1	0	1	1	-4E/5
13	0	1	1	0	0	-E/5
14*	0	1	1	0	1	-2E/5
15*	0	1	1	1	0	0
16	0	1	1	1	1	-E/5
17	1	1	1	1	1	E
18*	1	1	1	1	0	4E/5
19*	1	1	1	0	1	2E/5
20	1	1	1	0	0	3E/5
21*	1	1	0	1	1	2E/5
22*	1	1	0	1	0	0
23	1	1	0	0	1	E/5
24*	1	1	0	0	0	2E/5
25*	1	0	1	1	1	2E/5

26	1	0	1	1	0	3E/5
27	1	0	1	0	1	E
28*	1	0	1	0	0	4E/5
29	1	0	0	1	1	E/5
30*	1	0	0	1	0	2E/5
31*	1	0	0	0	1	0
32	1	0	0	0	0	E/5

Tableau III-4 Séquence de fonctionnement des interrupteurs d'onduleur à 5 cellules.

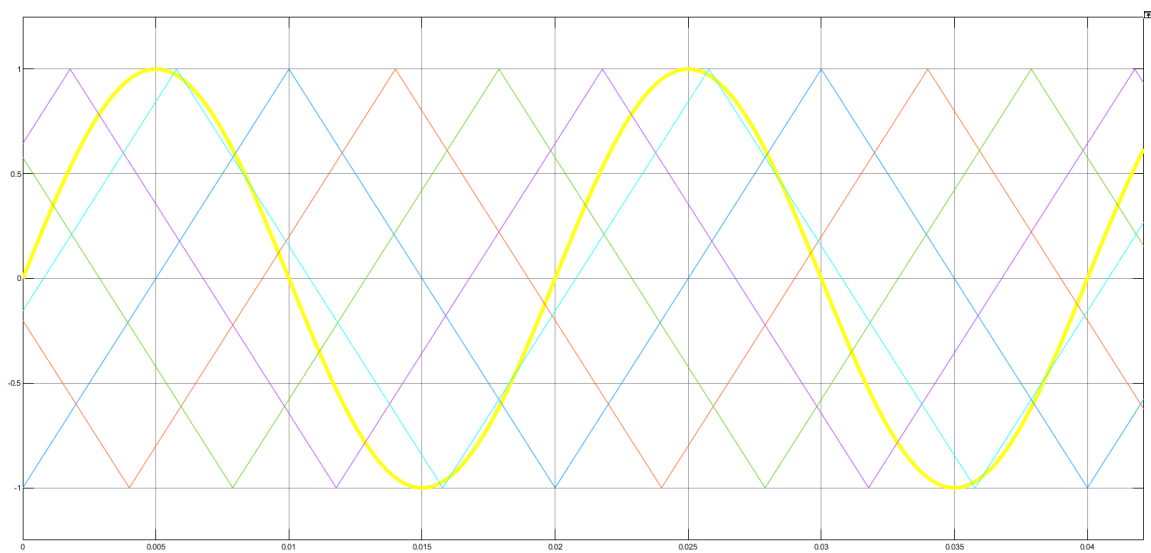


Figure III-17 Signal de référence et signaux de porteuses (à 50Hz) pour l'onduleur à 5 cellule

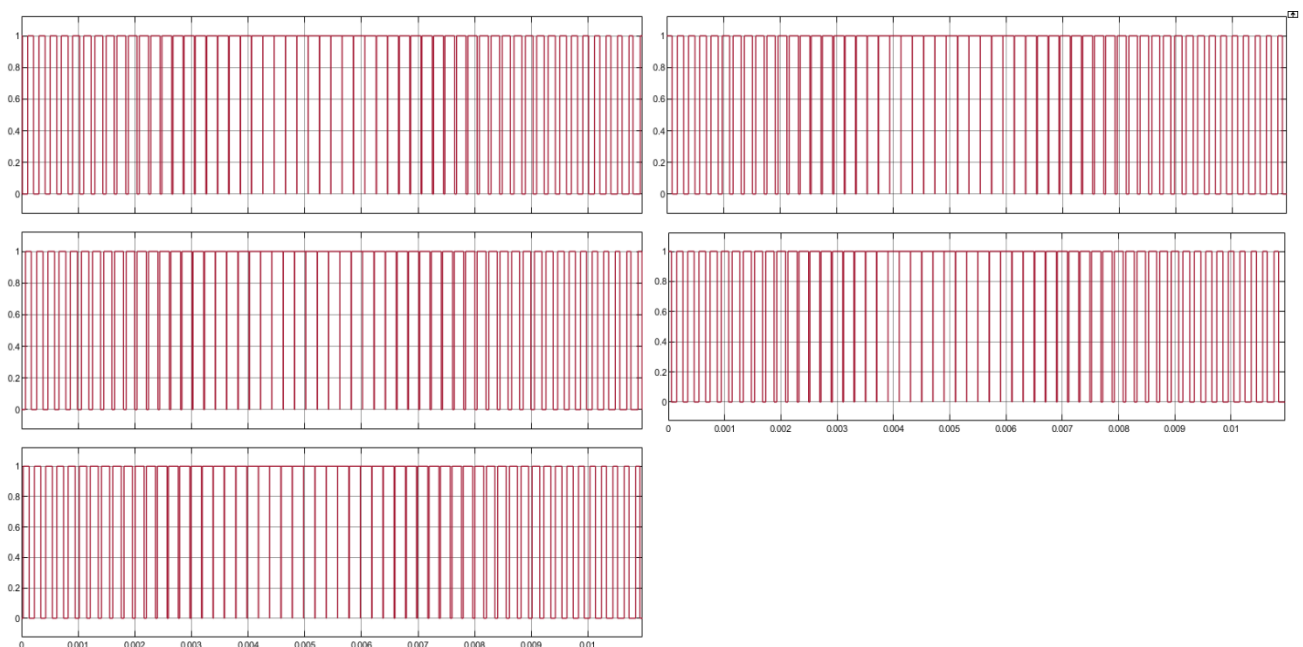


Figure III-18 Signaux de commande des interrupteurs superieur.

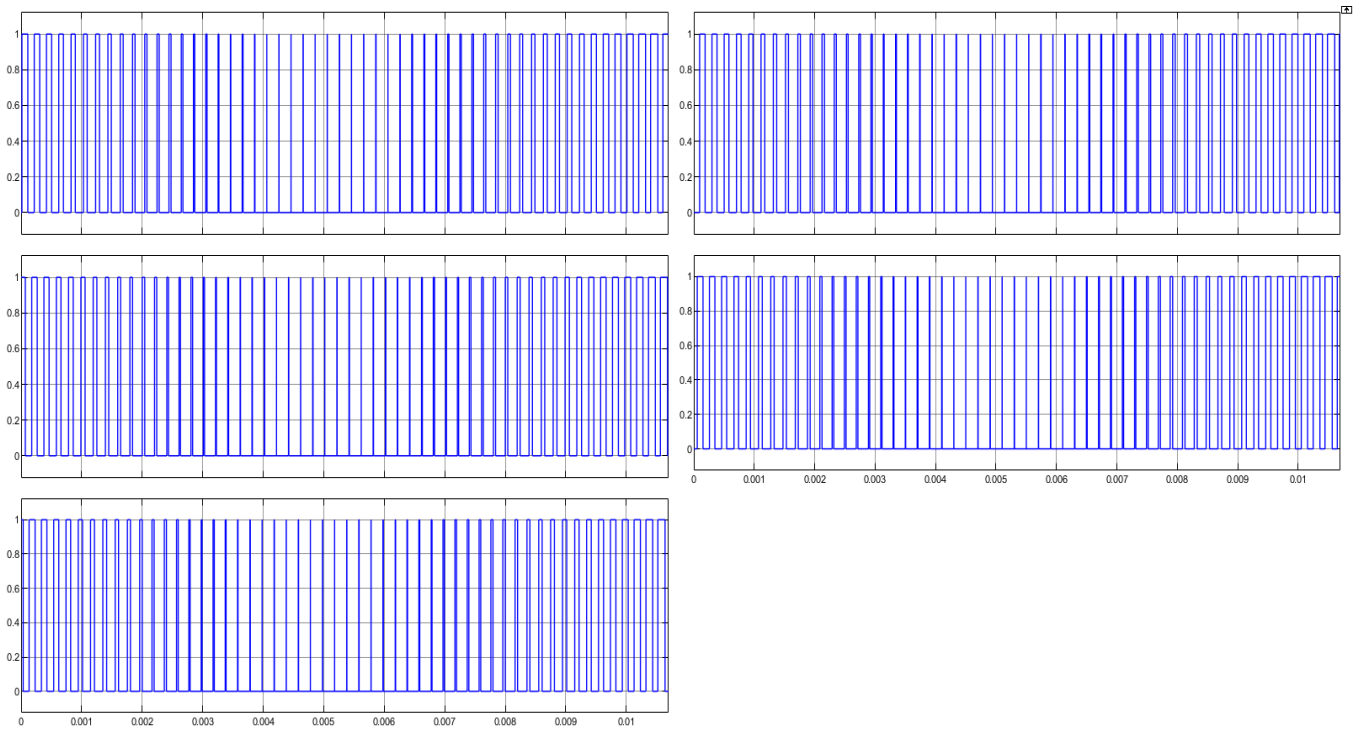


Figure III-19 Signaux de commande des interrupteurs inferieur.

III.4.3. Résultats de simulation :

❖ Pour $M_f = 45$ ($f_p = 2250\text{Hz}$) :

✓ Pour $r = 0.4$:

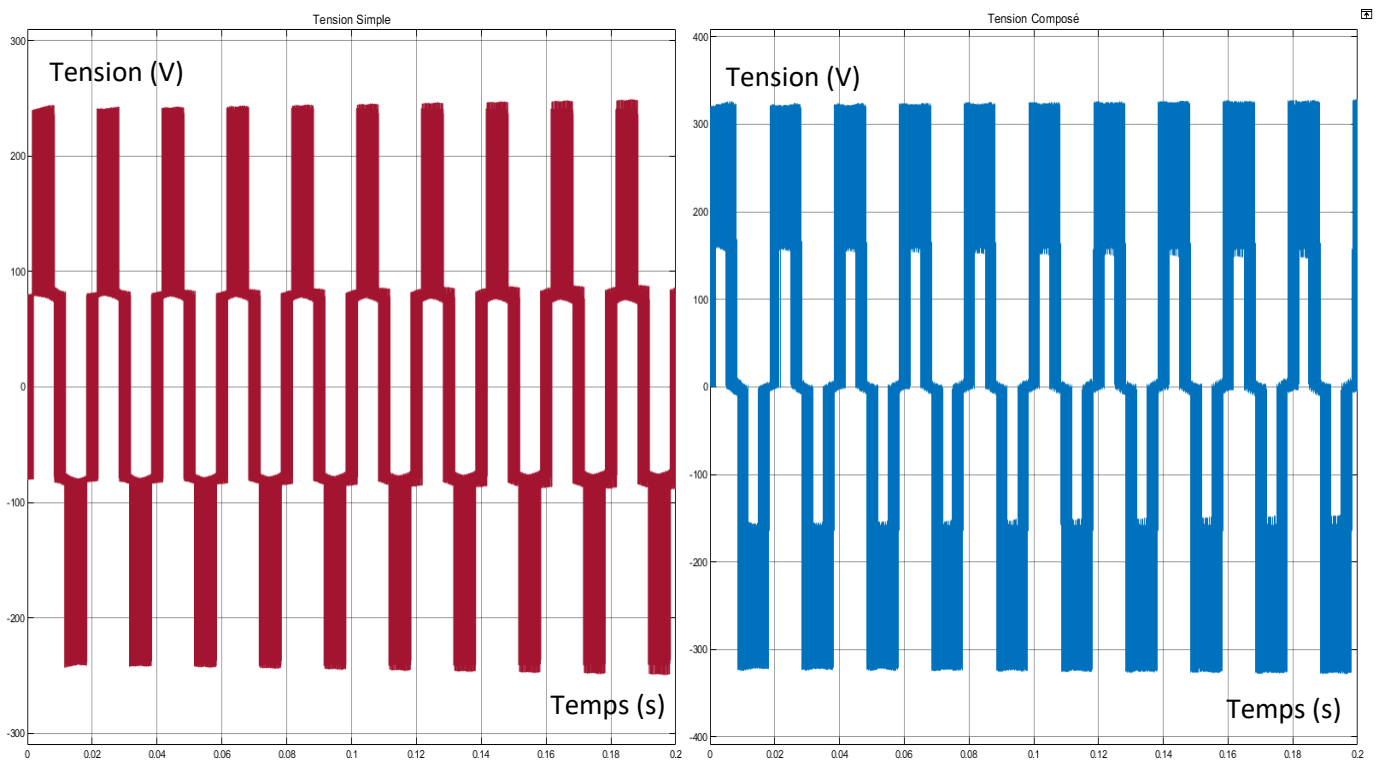


Figure III-20 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 45$ pour l'onduleur à 5 cellule.

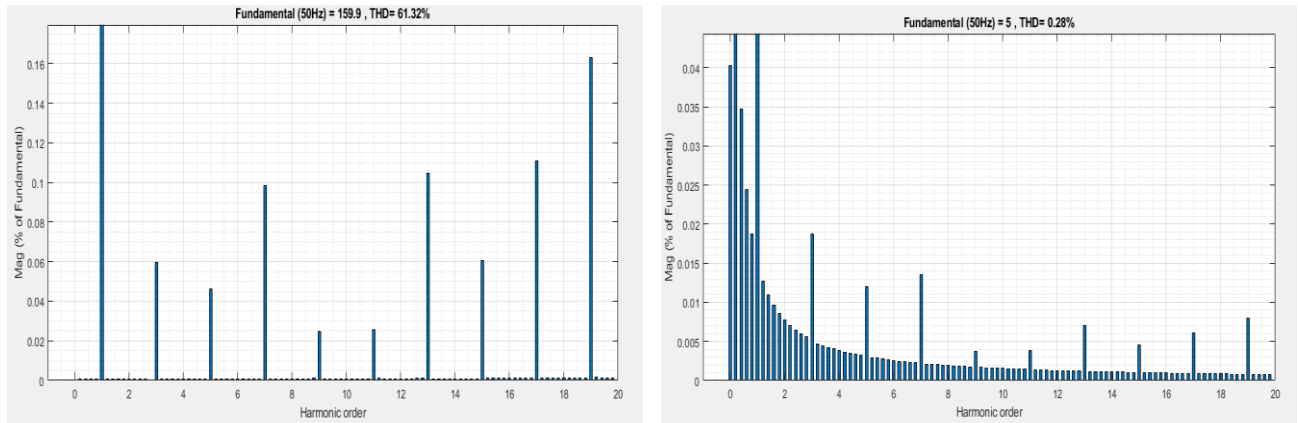


Figure III-21 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.4$)

✓ Pour $r = 0.9$:

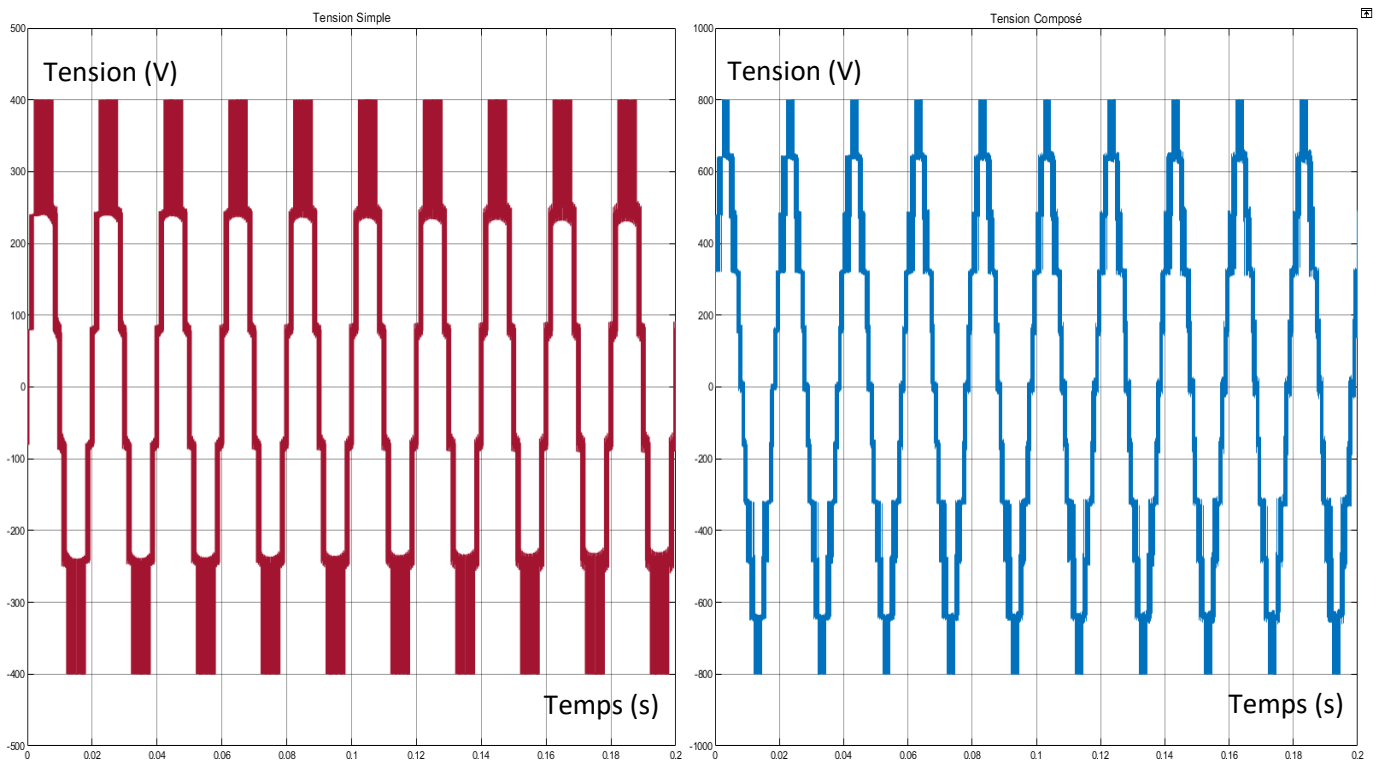


Figure III-22 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 45$ pour l'onduleur à 5 cellule.

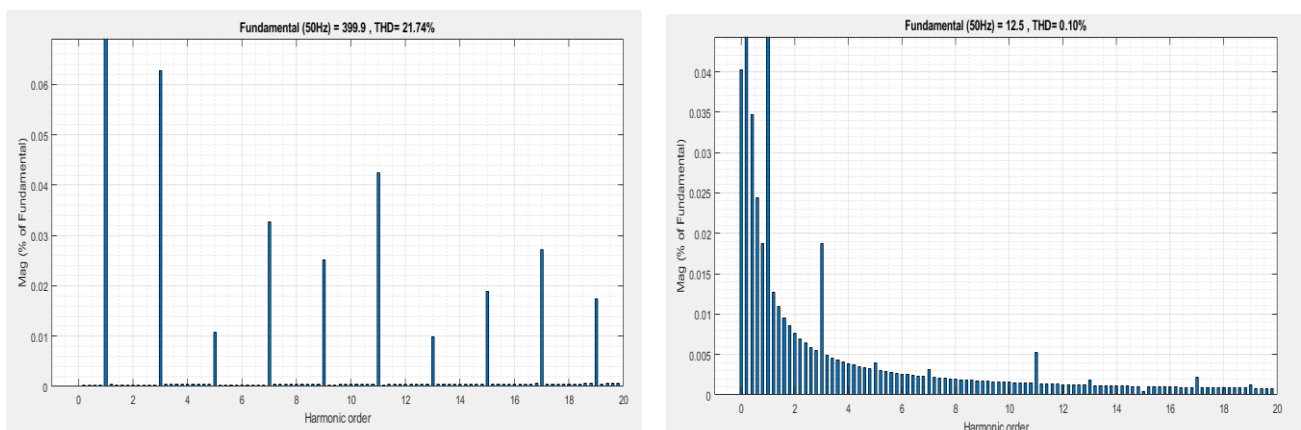


Figure III-23 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 45$, $r = 0.9$)

❖ Pour $M_f = 100$ ($f_p = 5000\text{Hz}$) :

✓ Pour $r = 0.4$:

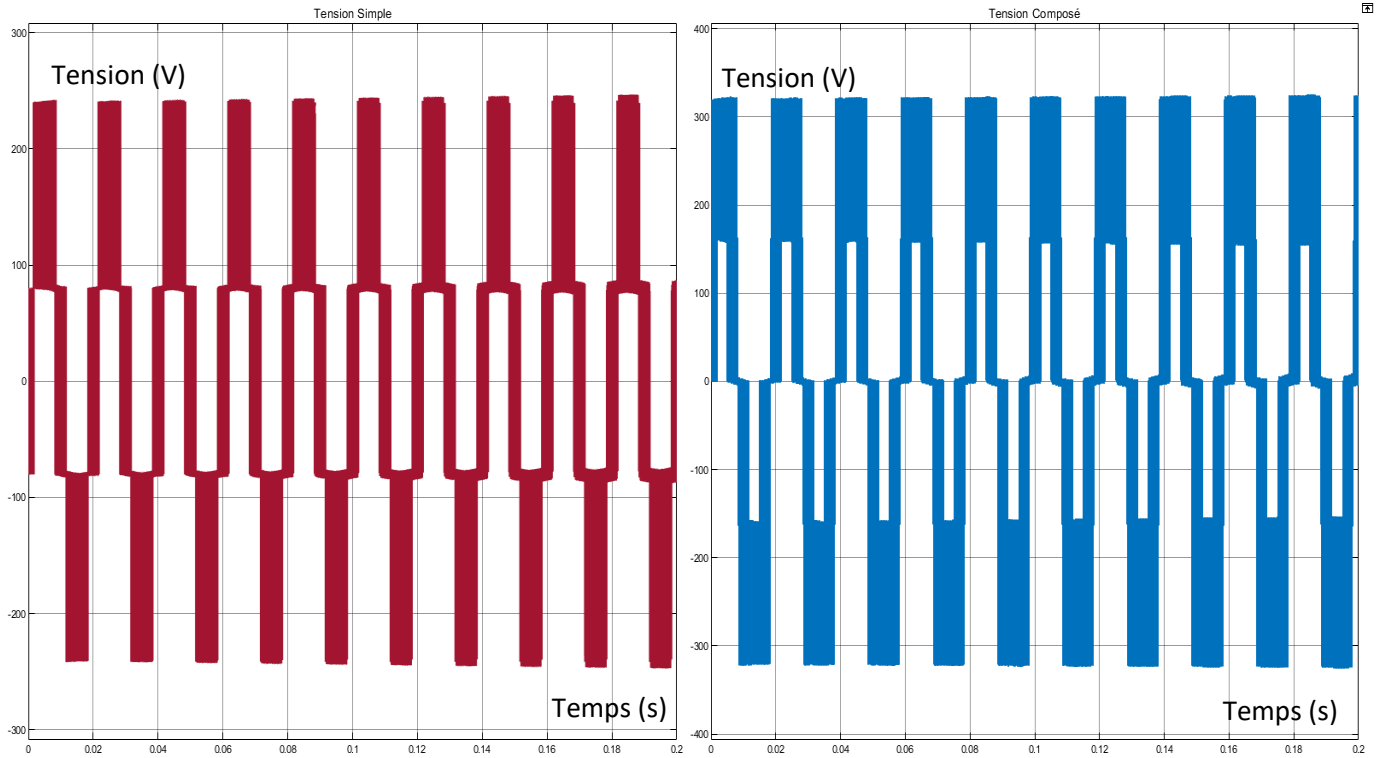


Figure III-24 Tension simple et composé pour $r = 0.4$, $M_f = 100$ pour l'onduleur à 5 cellule.

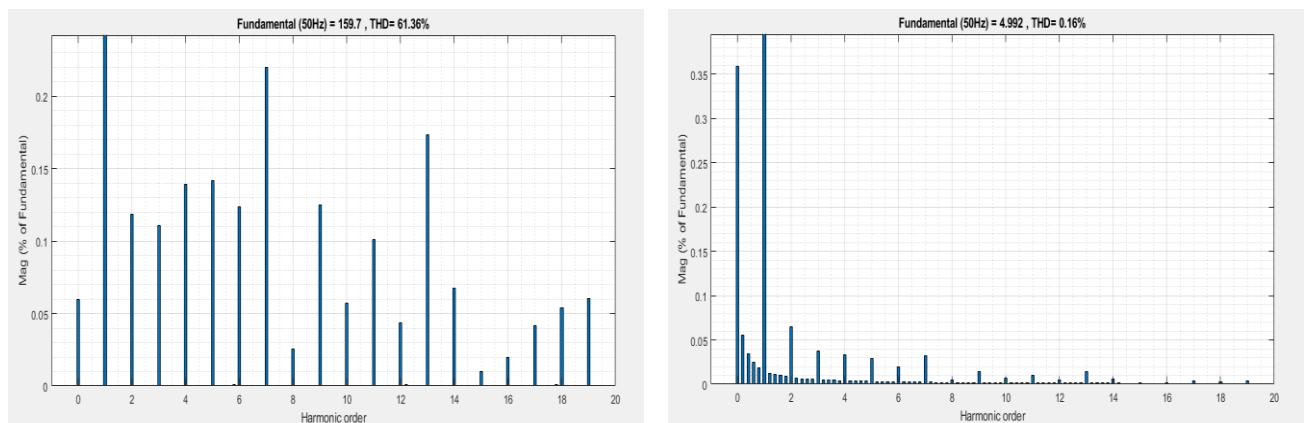


Figure III-25 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.4$)

✓ Pour $r = 0.9$:

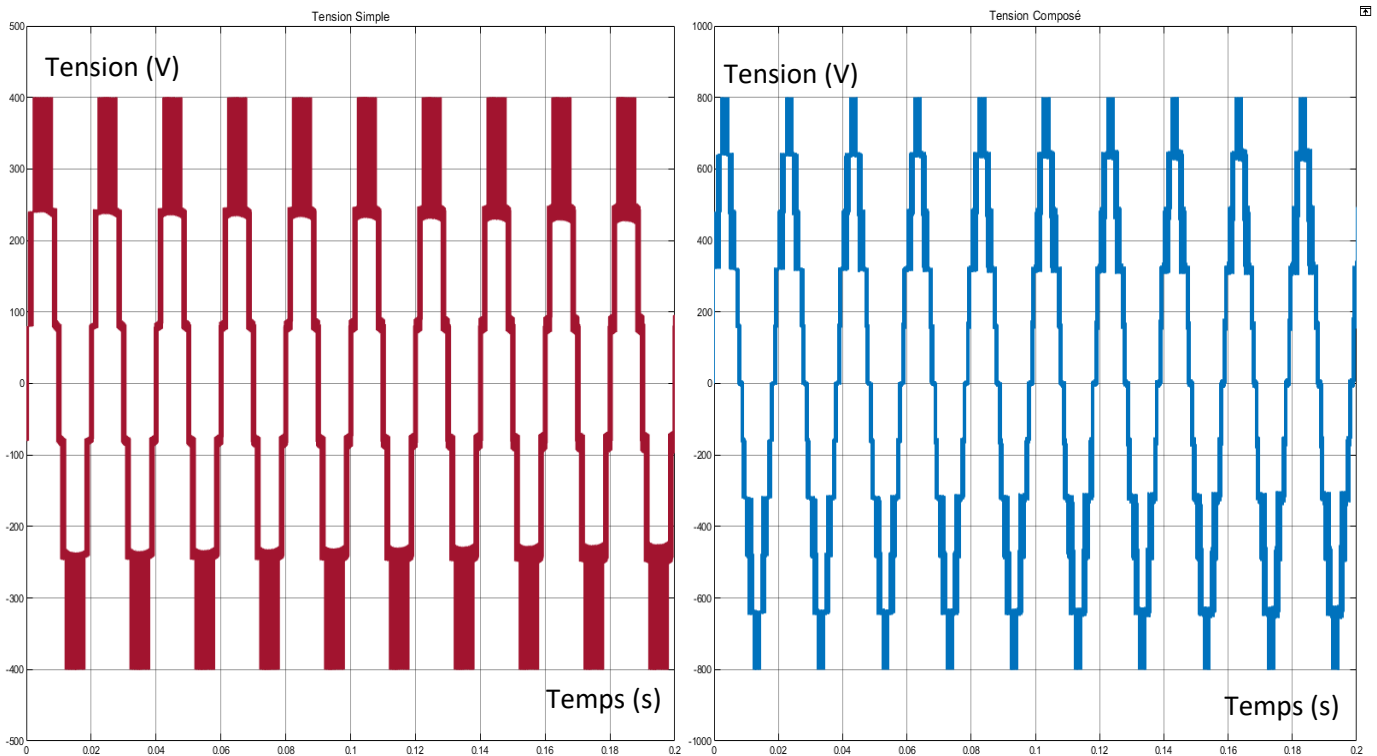


Figure III-26 Tension simple et composé pour $r = 0.9$, $M_f = 100$ pour l'onduleur à 5 cellule.

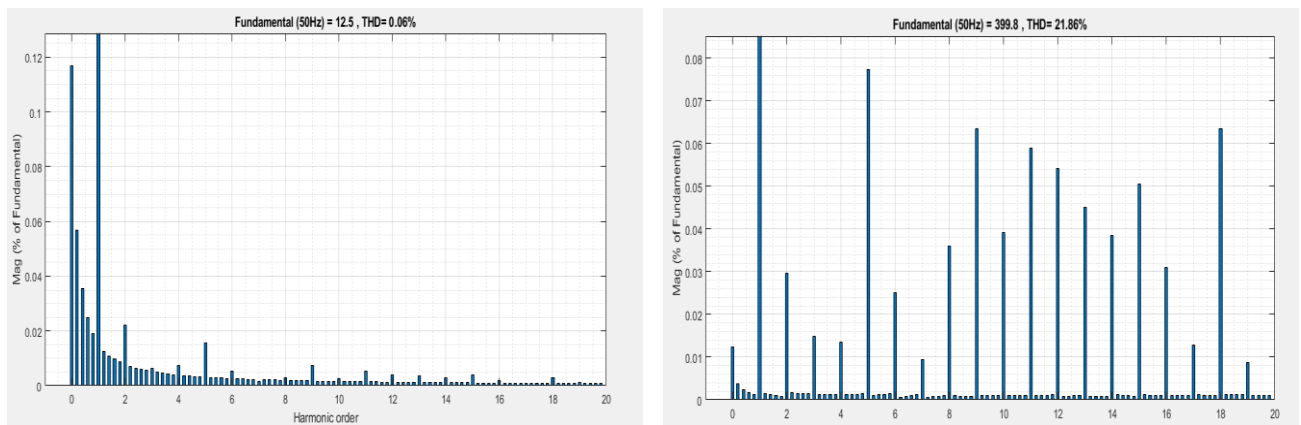


Figure III-27 THD% de tension simple et de courant d'onduleur à 5 cellule. ($M_f = 100$, $r = 0.9$)

III.4.4. Interprétation des résultats :

- Les résultats de la simulation pour l'onduleur à cinq cellules montrent une tendance similaire à celle observée avec l'onduleur à trois cellules en ce qui concerne l'effet du taux de modulation de fréquence (M_f) et de l'indice de régulation (r) sur la qualité de la tension de sortie et le THD. Comme avec l'onduleur à trois cellules, nous constatons que

l'augmentation de M_f et de r entraîne une amélioration significative de la qualité de la tension de sortie et le taux de distorsion harmonique.

- La tension simple porte bien les 6 niveaux de tension : $E, E/5, 3E/5, -E/5, -3E/5, -E$
- La tension composée porte bien les 11 niveaux de tension : $2E, -2E, 0, 2E/5, 4E/5, 6E/5, 8E/5, -2E/5, -4E/5, -6E/5, -8E/5$.
- Faisant maintenant une comparaison des résultats de THD pour l'onduleur à 3 cellules et l'onduleur à 5 cellules :

r	3 cellules				5 cellules			
	2.25 KHz		5 KHz		2.25 KHz		5 KHz	
	i	V	i	V	i	V	i	V
0.4	0.47%	81.49%	0.23%	81.43%	0.28%	61.32%	0.16%	61.36%
0.9	0.22%	33.66%	0.11%	35.55%	0.1%	21.74%	0.06%	21.86%

Tableau III-5 Les valeurs de THD% obtenu par simulation de l'onduleur à 3 et à 5 cellules.

- Comme mentionné précédemment, il est évident que l'augmentation de M_f et r influe positivement sur le THD. De plus, nous constatons que l'augmentation du nombre de cellules affecte également positivement à la fois le THD de courant et le THD de tension. Si nous prenons par exemple $M_f = 100$ et $r = 0.9$, le THD de tension pour 3 cellules est 35.55% et pour 5 cellules est 21.86%, tandis que pour le courant, pour 3 cellules, il est 0.11% et pour 5 cellules il est 0.06%.

III.5. Equilibrage des tensions flottantes :

Pour un fonctionnement optimal du l'onduleur multicellulaire, il faut que les tensions aux bornes des condensateurs flottants soient équilibrées et égales à leurs valeurs de référence ($E/P, 2.E/P, \dots, (P - 1).E/P$). Avec P le nombre de cellule d'onduleur.

L'équilibrage des tensions flottantes se produit naturellement. Si au moins l'une des tensions flottantes s'éloigne de sa valeur de référence. Cela entraînera immédiatement une perturbation des niveaux intermédiaires de la tension de sortie. En effet, la tension de sortie (notée V_s) est déterminée par une combinaison linéaire de la tension de bus continu (E) et des tensions flottantes ($VC_1, VC_2, \dots, VC_{p-1}$).

Le processus d'équilibrage naturel des tensions flottantes permet à l'onduleur multicellulaire de fonctionner en boucle ouverte, sans nécessiter de régulation externe. Cependant, ce processus est relativement lent. Pour améliorer sa réactivité, on peut ajouter un circuit auxiliaire (Figure III-27) en parallèle avec la charge. Ce circuit auxiliaire consiste en un filtre RLC série accordé à la fréquence de découpage des interrupteurs.

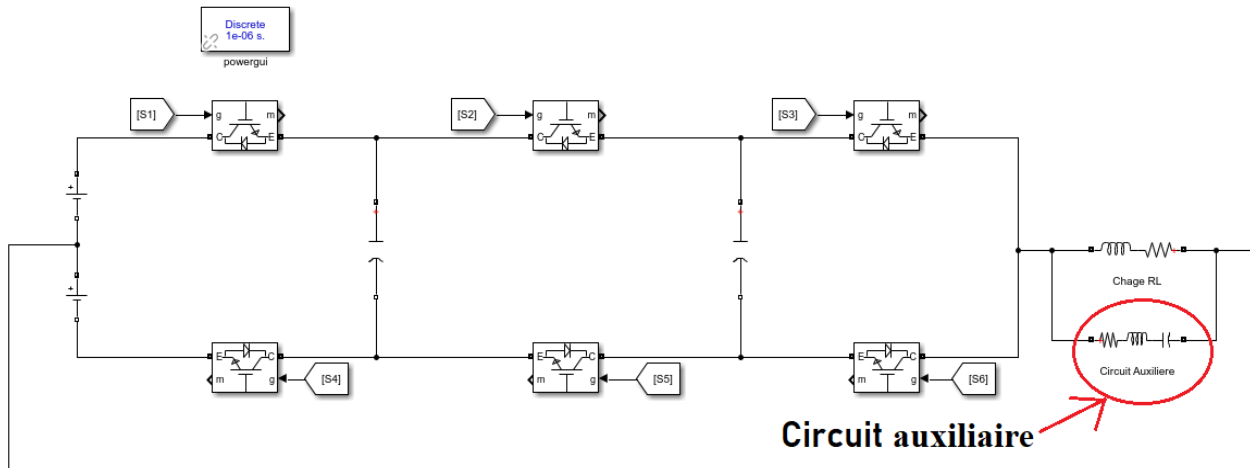


Figure III-28 Bras d'onduleur à 3 cellules avec circuit auxiliaire.

Dans ce qui suit nous effectuerons deux simulations pour chaque onduleur. Dans la première, nous présenterons les tensions flottantes sans circuit auxiliaire, et dans la seconde, nous implémenterons ce circuit et comparerons les résultats.

III.5.1. Paramètres de simulation :

E	C	R _{ch}	L _{ch}	F	r	R _{aux}	C _{aux}	L _{aux}
800v	100uF	10ohms	1mH	10kHz	0.8	10ohms	50nF	1.2mH

Tableau III-6 Paramètres de simulation pour l'équilibrage des tension flottantes des onduleurs à 3 et à 5 cellules [17]

III.5.2. Résultats de simulation :

III.5.2.1. Onduleur à 3 cellules :

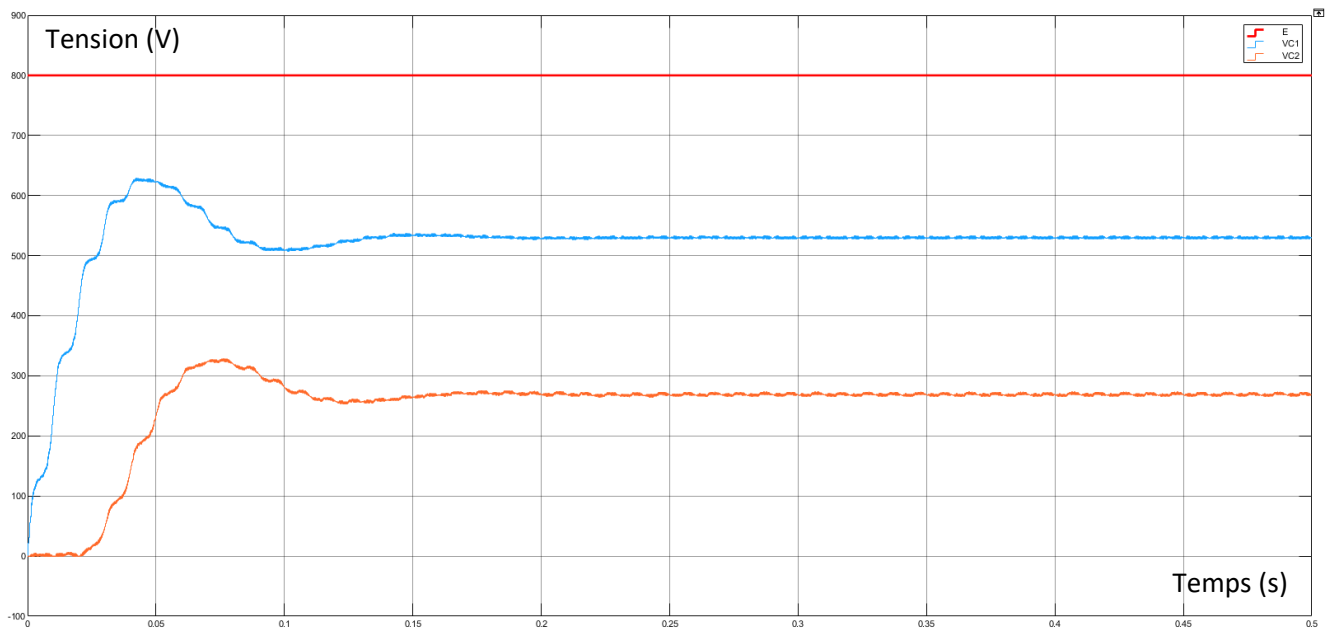


Figure III-29 Tension d'alimentation et tension flottantes sans circuit auxiliaire (3 cellules).

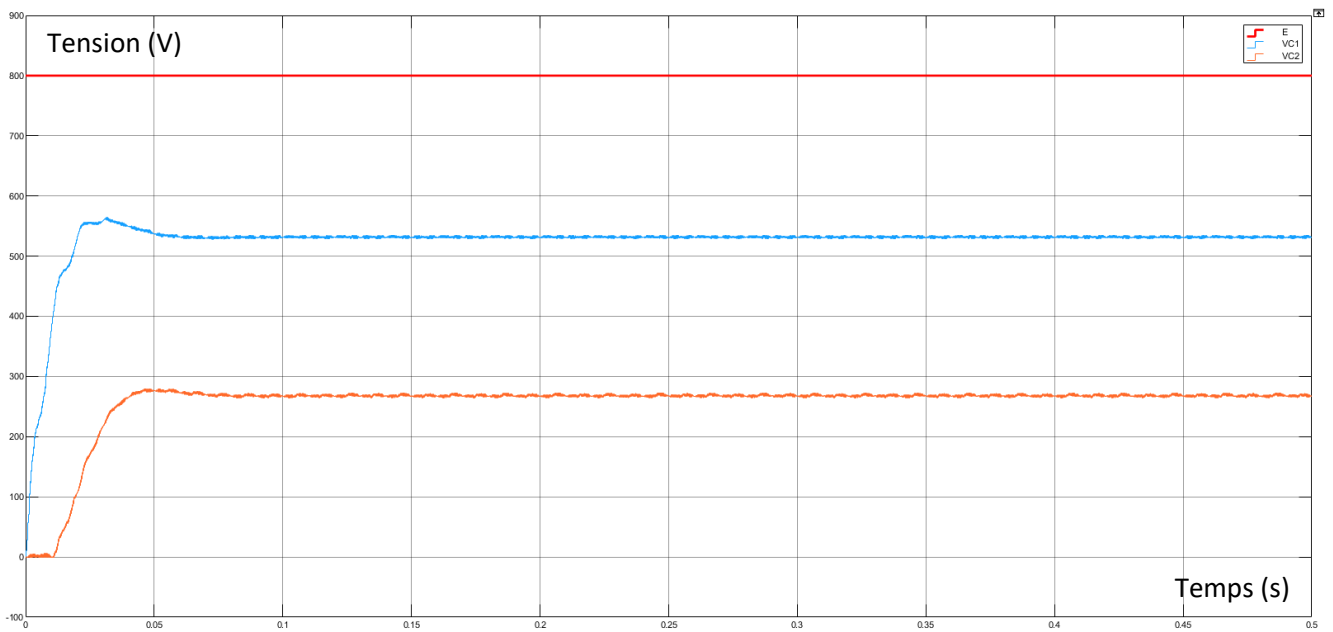


Figure III-30 Tension d'alimentation et tension flottantes avec circuit auxiliaire (3 cellules).

III.5.2.2. Onduleur à 5 cellules :

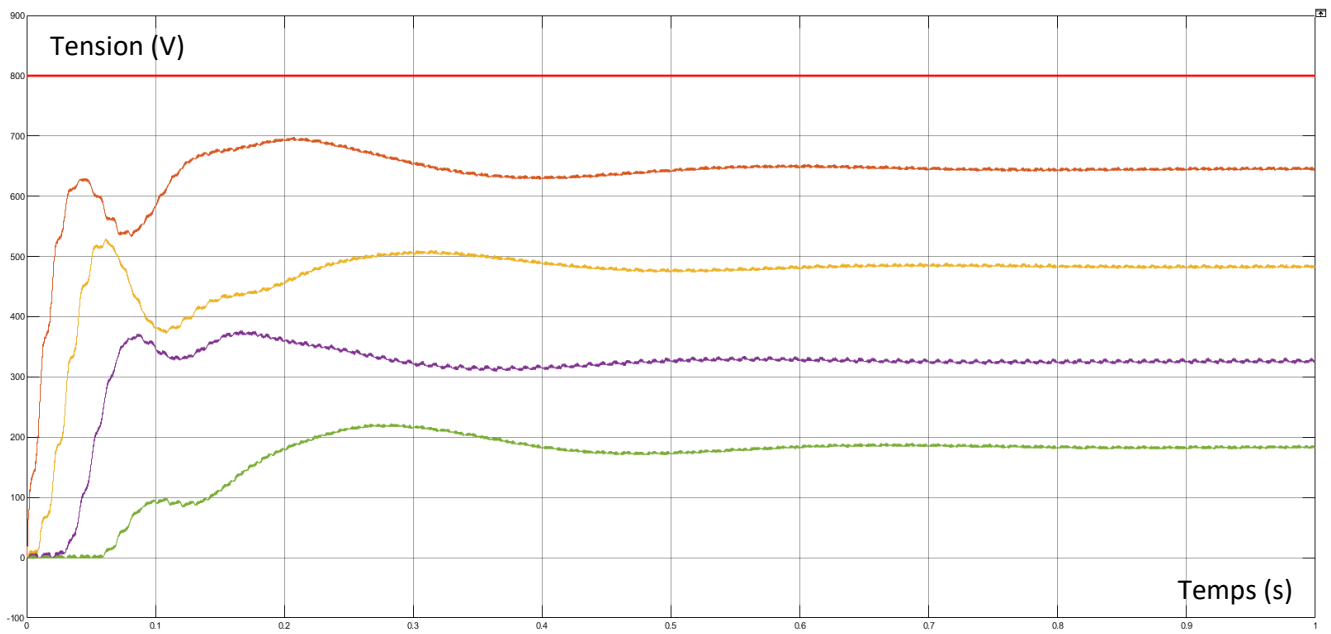


Figure III-31 Tension d'alimentation et tension flottantes sans circuit auxiliaire (5 cellules).

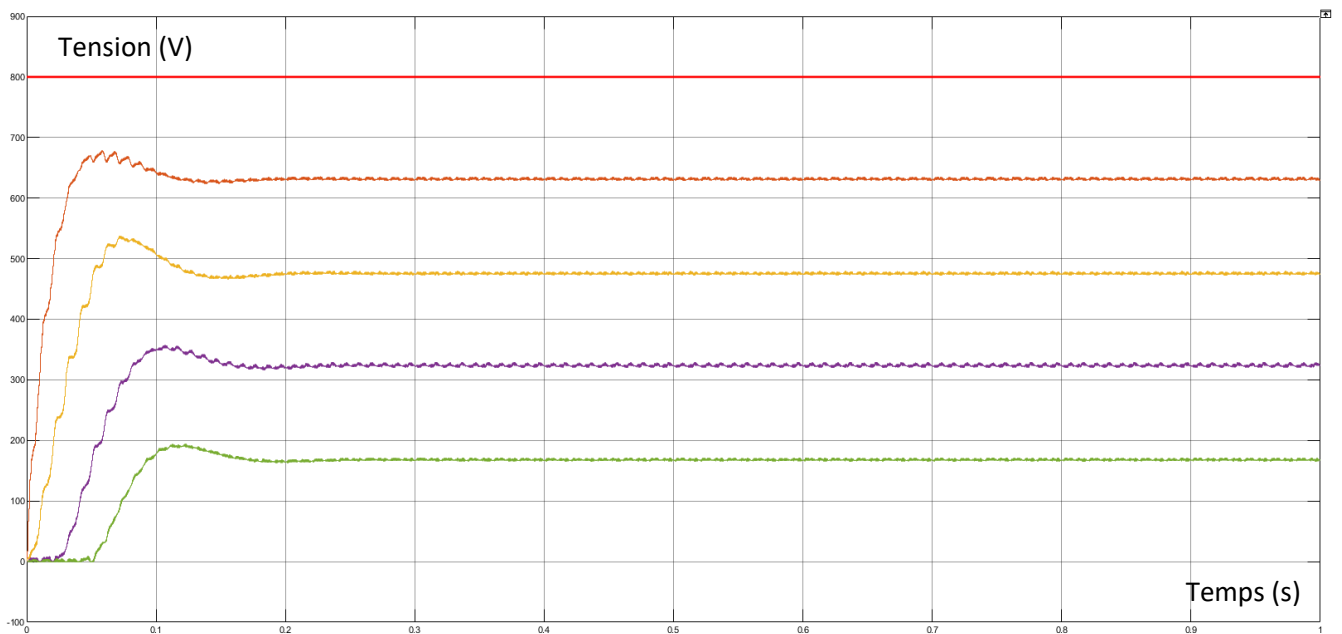


Figure III-32 Tension d'alimentation et tension flottantes avec circuit auxiliaire (5 cellules).

III.5.3. Interprétation des résultats :

- Pour les deux onduleurs, on remarque qu'au démarrage pendant le test sans circuit auxiliaire, les tensions flottantes sont déséquilibrées (régime transitoire) jusqu'à $t = 0.15s$ pour 3 cellules et à $t = 0.55s$ pour 5 cellules ; puis elles se stabilisent.

- Lors du deuxième test, l'intégration du circuit auxiliaire réduit la durée du régime transitoire au démarrage. Les tensions flottantes atteignent leurs valeurs de référence à $t=0,05s$ pour 3 cellules et à $t=0,15s$ pour 5 cellules.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué plusieurs simulations portant sur les onduleurs multicellulaires à 3 et 5 cellules. Nous avons varié les valeurs de M_f et r et avons conclu que l'augmentation de M_f et l'utilisation d'une valeur appropriée de r (généralement 0,8 ou 0,9) améliorent considérablement la tension de sortie et réduisent à la fois le THD du courant et de la tension. De plus, nous avons constaté que l'augmentation du nombre de cellules produit des effets similaires.

Nous avons également abordé le phénomène de rééquilibrage des tensions flottantes et avons constaté qu'elles s'équilibrent naturellement, bien que cela prenne du temps. Nous avons ensuite intégré un circuit auxiliaire RLC pour accélérer ce processus, ce qui a significativement réduit la durée du régime transitoire.

Chapitre IV

Application de la commande
par mode glissant sur les
onduleurs multicellulaires séries

Chapitre IV. Application de la commande par mode glissant sur les onduleurs multicellulaires séries

IV.1. Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons simuler les onduleurs avec le GPV que nous avons construit dans le premier chapitre, en les comparant avec et sans un circuit auxiliaire. Ensuite, nous procéderons à leur simulation en utilisant un contrôle en boucle fermée, en particulier la technique de contrôle par mode glissant.

IV.2. Simulation de l'ensemble GPV + Onduleur :

IV.2.1. Les paramètres de simulation :

Dans cette simulation, on utilisera le GPV que nous avons construit dans le premier chapitre. Il utilise le module Soltech 1STH-215P, le tableau I-1 présente toutes les caractéristiques du module et les figures I-21 et I-22 montrent la structure du GPV commandé par MPPT.

Pour l'onduleur, on simulera à la fois le modèle à 3 cellules et celui à 5 cellules avec les mêmes paramètres que dans le chapitre précédent, le tableau III-1 les présente. On simulera pour $M_f = 100$ et $r = 0.8$ et on présentera les résultats sans circuit auxiliaire et avec celui-ci.

Pour l'onduleur à 3 cellules, le même circuit auxiliaire que précédemment est utilisé car il suffit. Cependant, pour l'onduleur à 5 cellules, un seul circuit auxiliaire ne suffit pas dans ce cas, nous avons donc utilisé 3 circuits RLC en parallèle pour chaque phase, ces circuits doivent avoir des fréquences différentes. [22]

La figure IV-1 représente le circuit final sous forme de "Sub-système" sous Matlab Simulink.

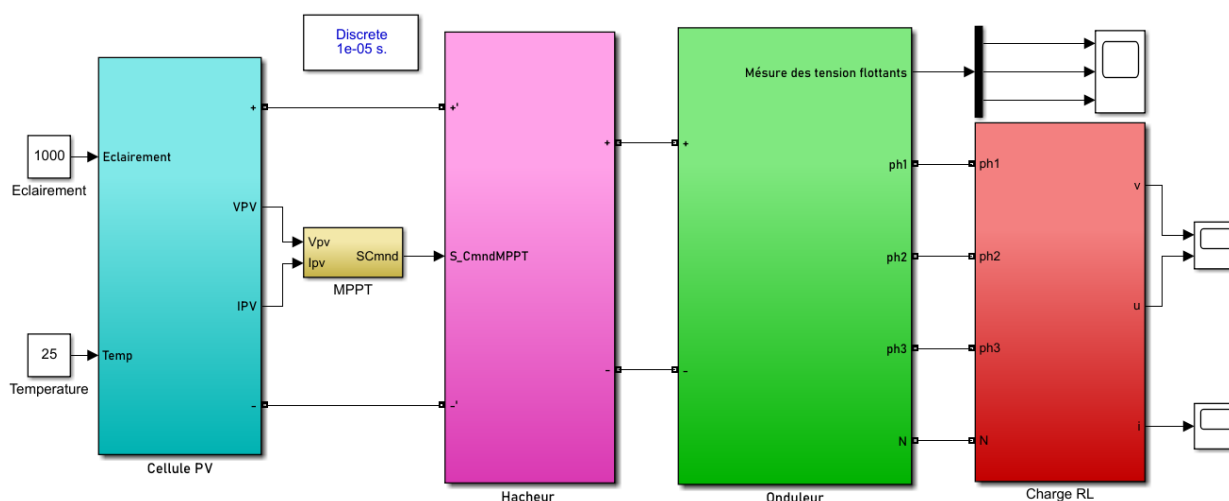


Figure IV-1 Ensemble GPV + Onduleur sous forme de Sub-système

IV.2.2. L'onduleur à 3 cellules :

❖ Sans circuit auxiliaire :

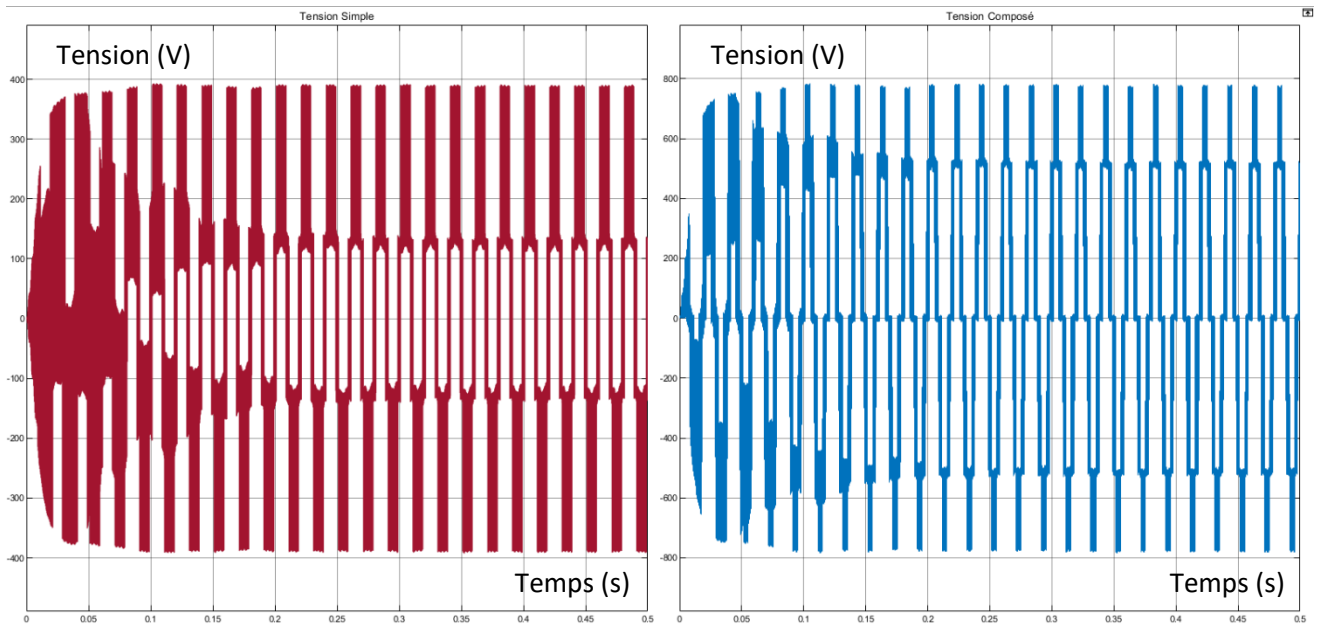


Figure IV-2 Tension simple et composé sans circuit auxiliaire. (3 cellules)

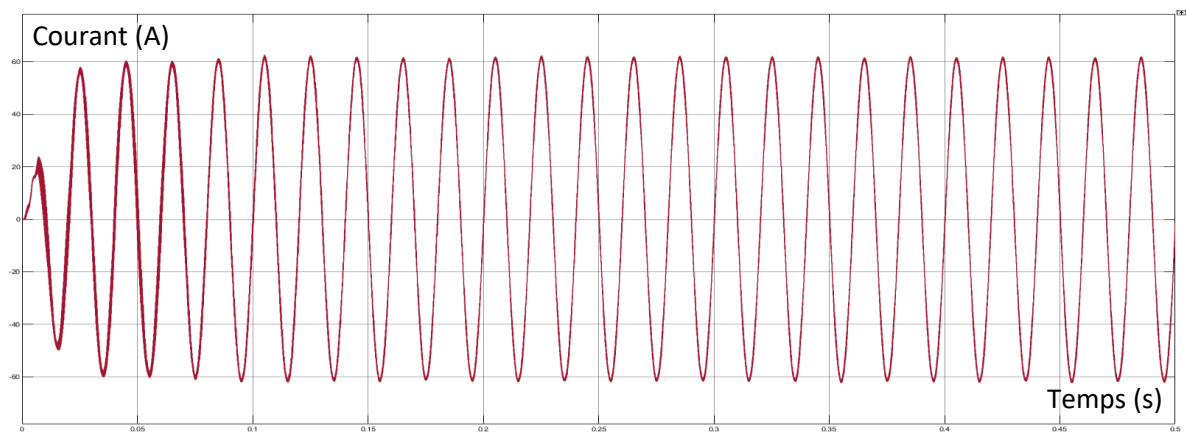


Figure IV-3 Courant sans circuit auxiliaire. (3 cellules)

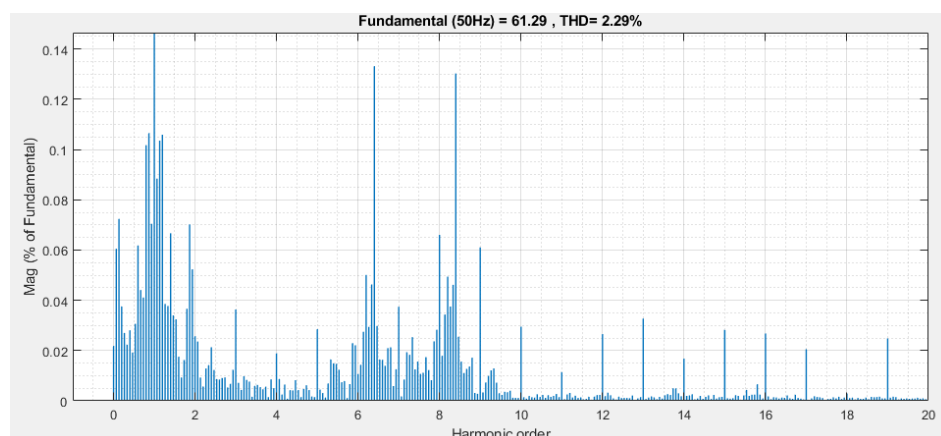


Figure IV-4 THD de courant sans circuit auxiliaire. (3 cellules)

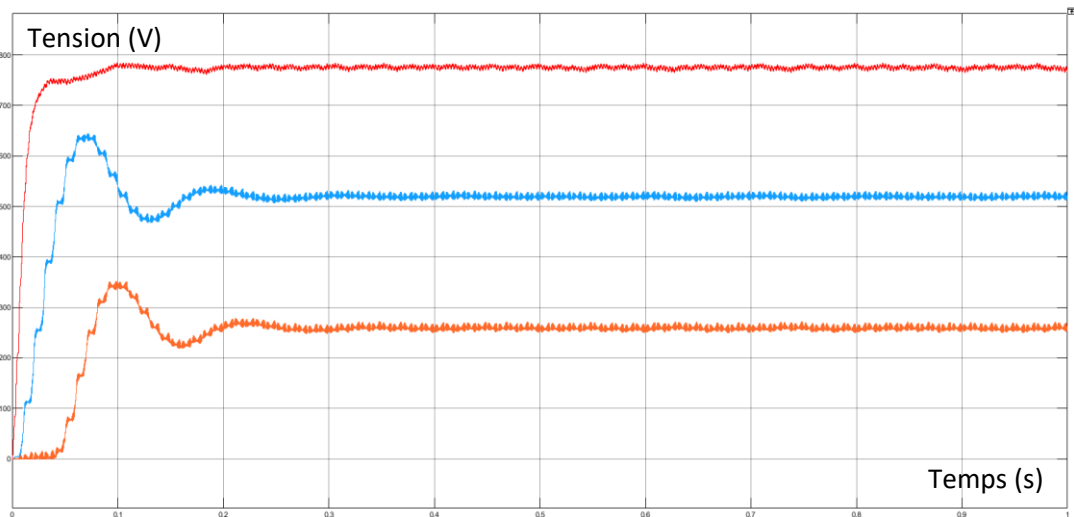


Figure IV-5 Tension flottantes sans circuit auxiliaire. (3 cellules)

❖ Avec circuit auxiliaire :

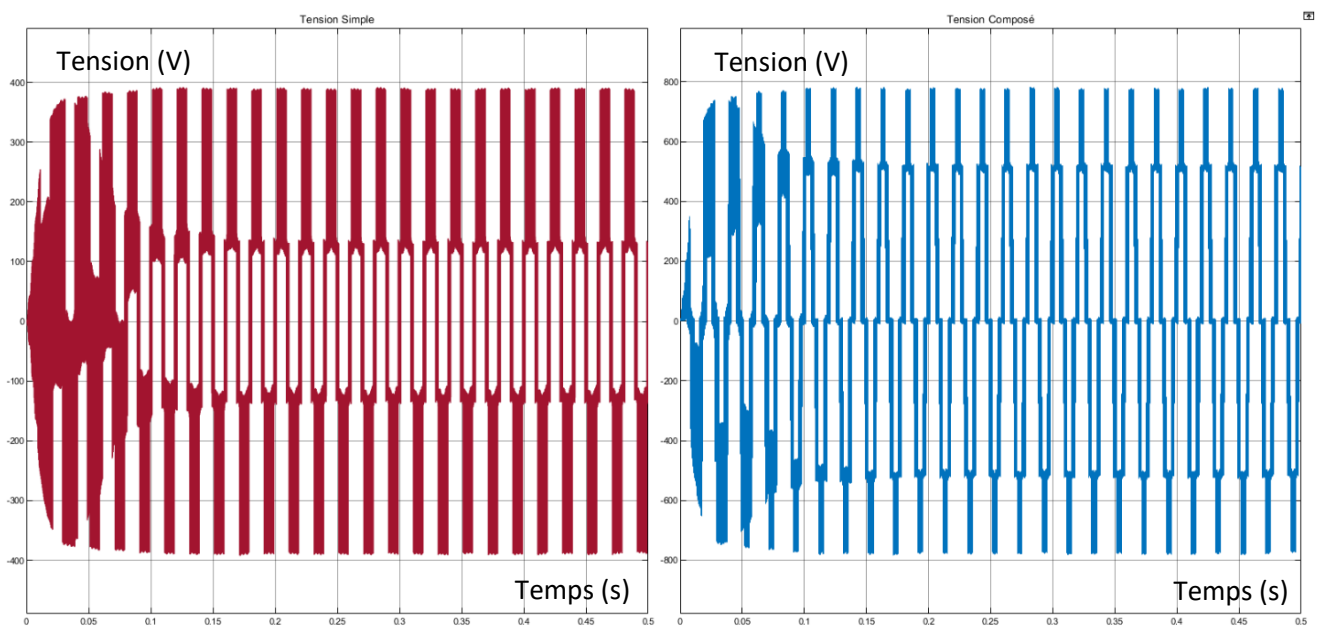


Figure IV-6 Tension simple et composé avec circuit auxiliaire. (3 cellules)

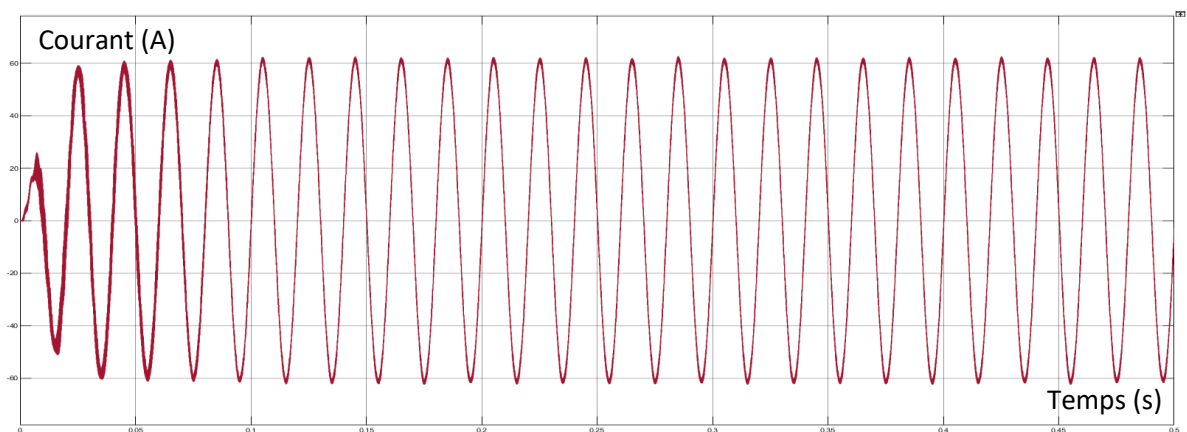


Figure IV-7 Courant avec circuit auxiliaire. (3 cellules)

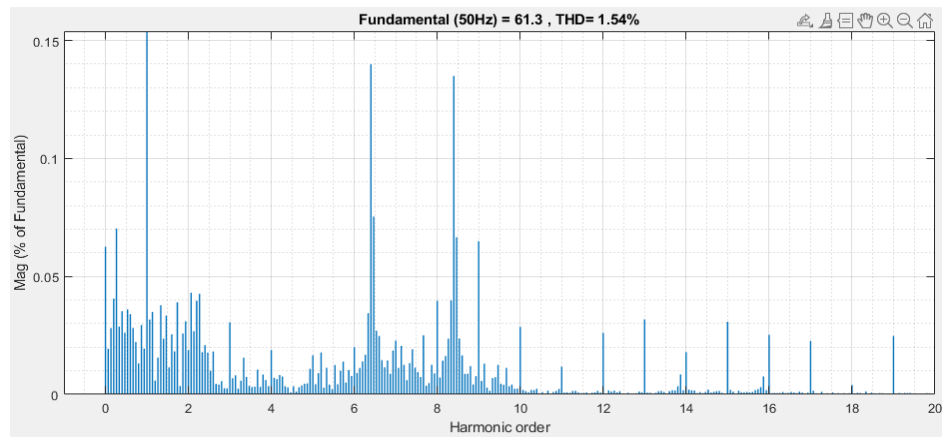


Figure IV-8 THD de courant avec circuit auxiliaire. (3 cellules)

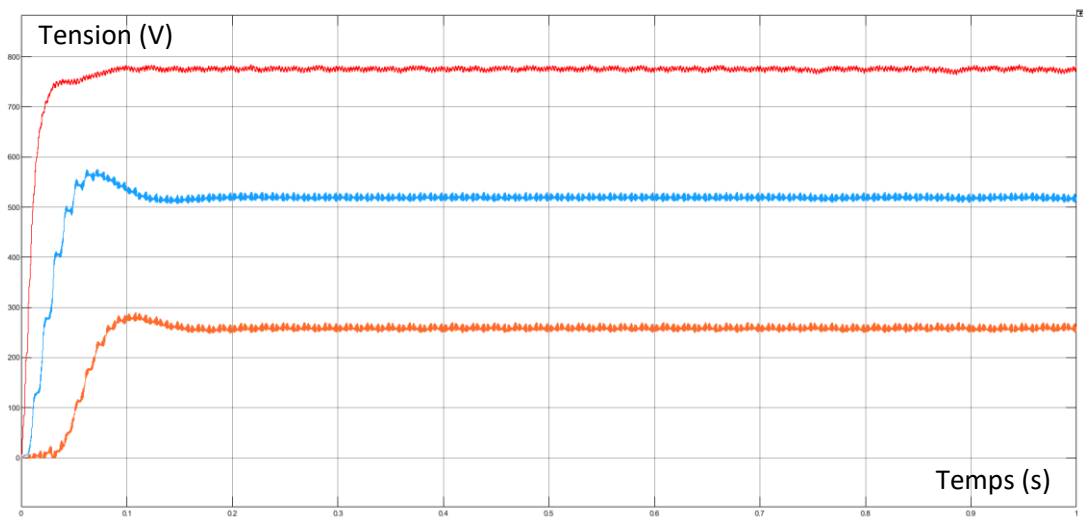


Figure IV-9 Tension flottantes avec circuit auxiliaire. (3 cellules)

IV.2.3. L'onduleur à 5 cellules :

❖ Sans circuit auxiliaire :

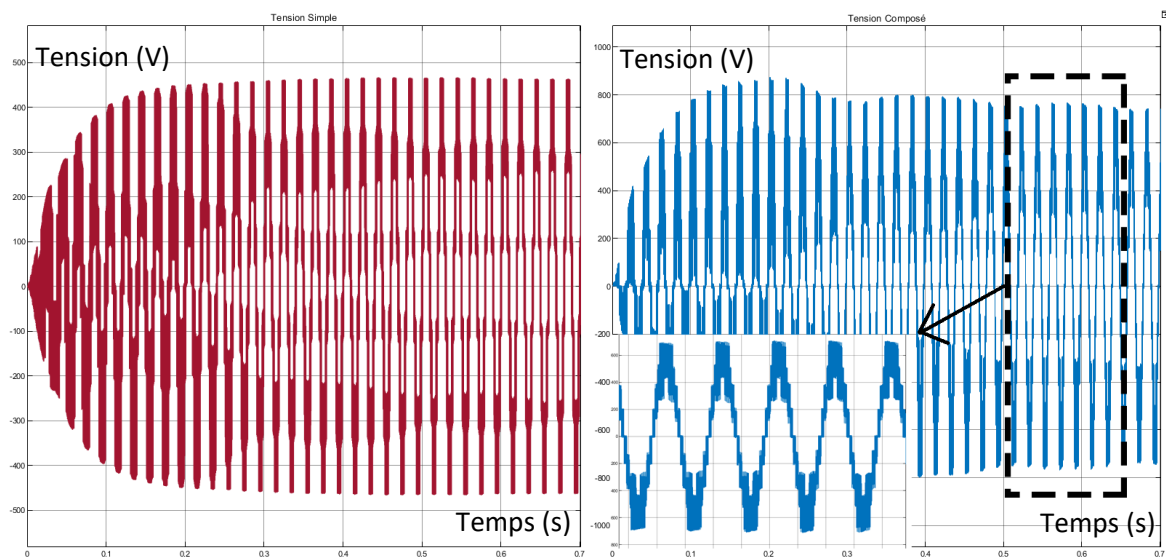


Figure IV-10 Tension simple et composé sans circuit auxiliaire. (5 cellules)

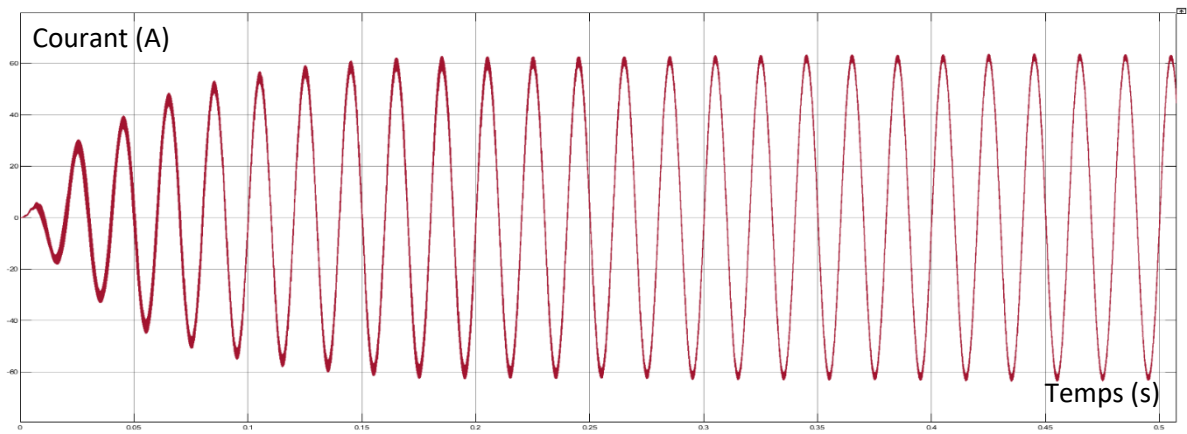


Figure IV-11 Courant sans circuit auxiliaire. (5 cellules)

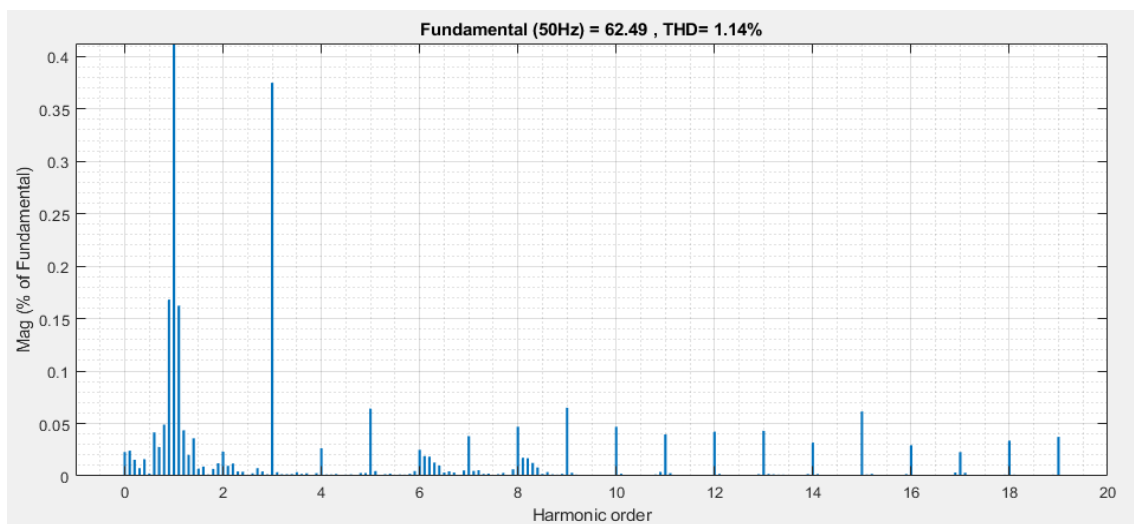


Figure IV-12 THD de courant sans circuit auxiliaire. (5 cellules)

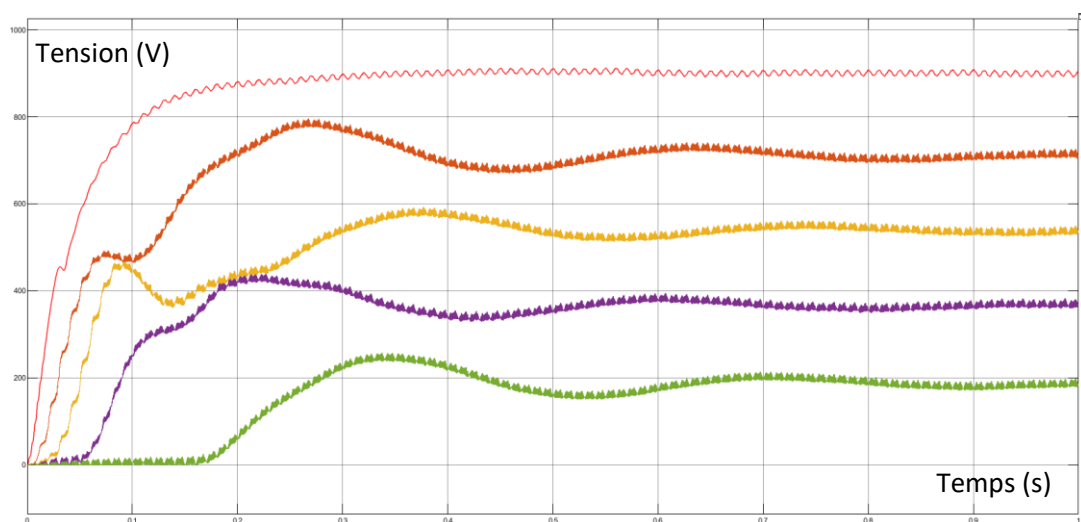


Figure IV-13 Tension flottantes sans circuit auxiliaire. (5 cellules)

❖ Avec circuit auxiliaire :

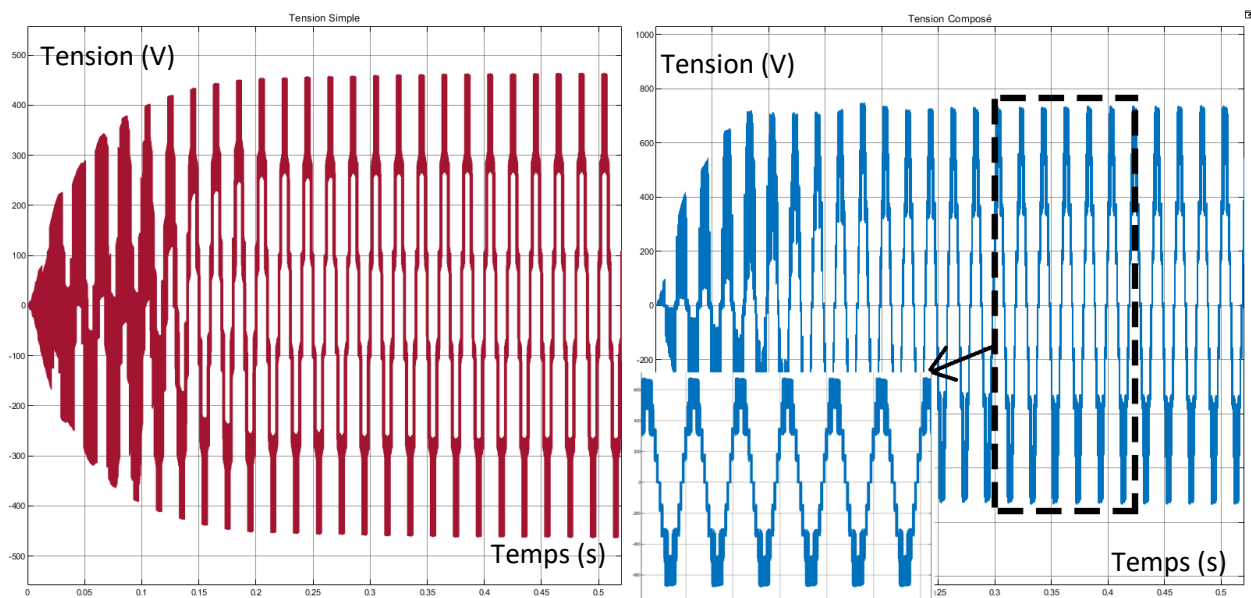


Figure IV-14 Tension simple et composé avec circuit auxiliaire. (5 cellules)

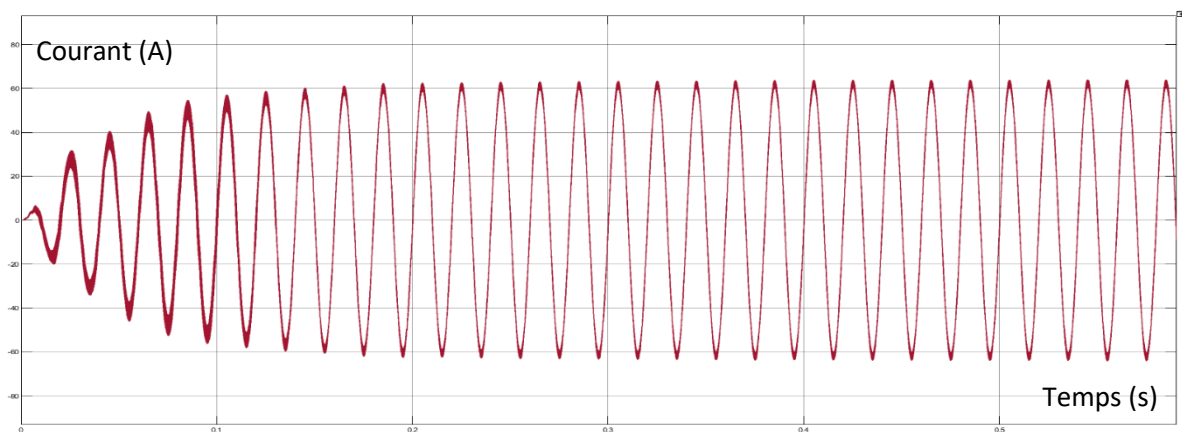


Figure IV-15 Courant avec circuit auxiliaire. (5 cellules)

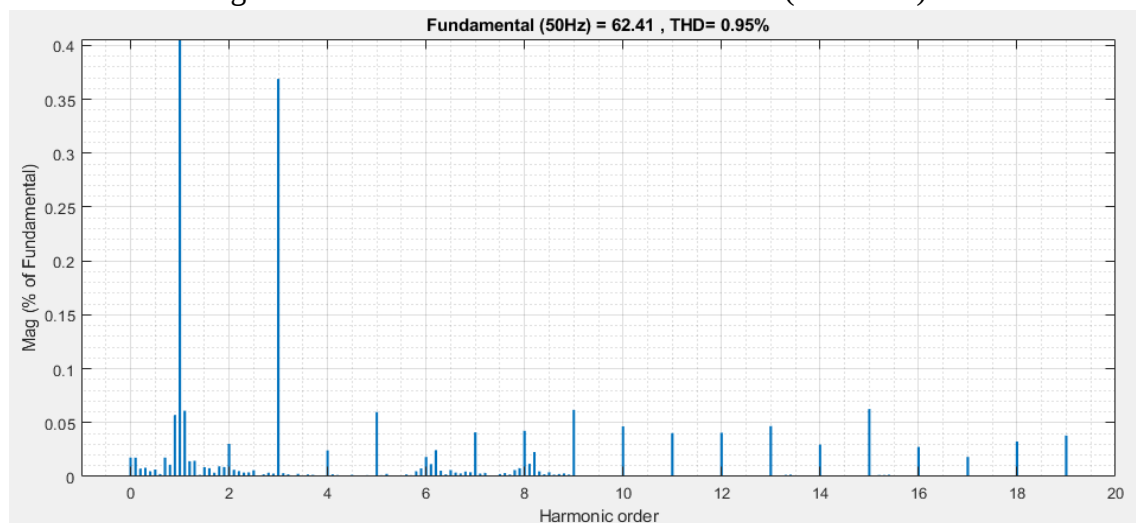


Figure IV-16 THD de courant avec circuit auxiliaire. (5 cellules)

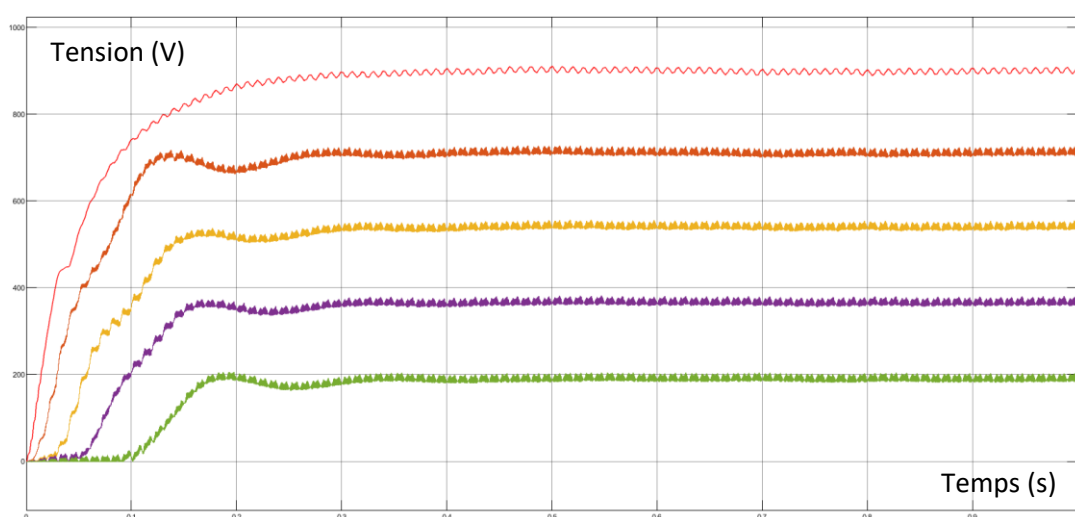


Figure IV-17 Tension flottantes avec circuit auxiliaire. (5 cellules)

IV.2.4. Interprétation des résultats :

Les résultats que nous avons obtenus ici sont similaires à ceux du chapitre précédent et ils sont conformes aux résultats attendus selon la théorie. Nous les résumerons comme suit :

- Sans l'utilisation de filtres ou de circuits auxiliaires, il est évident que le THD s'améliore à mesure que nous augmentons le nombre de cellules, avec 2,29 % pour 3 cellules contre 1,14 % pour 5 cellules. Cette amélioration se produit car, à mesure que nous augmentons le nombre de cellules, la forme de sortie se rapproche de la forme sinusoïdale.
- En effet, les condensateurs flottants s'équilibrent naturellement, ces condensateurs auront un régime transitoire où ils se rapprochent progressivement de leurs valeurs de référence. Nous remarquons également que la durée de ce régime est plus longue pour l'onduleur à 5 cellules, prenant 0,7s comparé aux 0,3s nécessaires pour celui à trois cellules car avec plus de cellules dans l'onduleur, il y a plus de condensateurs flottants à équilibrer, ce qui nécessite plus de temps pour que la tension à travers chaque condensateur se stabilise et atteigne sa valeur de référence.
- L'intégration d'un circuit auxiliaire RLC accélère l'équilibrage des condensateurs flottants en amplifiant la composante du courant absorbée à la fréquence de coupure f_{dec} , accélérant ainsi le processus de rééquilibrage. Avec ce circuit, l'équilibrage prend seulement 0,1s pour l'onduleur à 3 cellules et 0,3s pour celui à 5 cellules. Ce circuit filtre également les harmoniques, réduisant le THD de 2,29 % à 1,54 % pour l'onduleur à 3 cellules et de 1,14 % à 0,95 % pour celui à 5 cellules.

IV.3. Commande en boucle fermée pour l'onduleur en utilisant la commande par mode de glissement :

Selon l'équation d'état du modèle du convertisseur multicellulaire série :

$$\dot{X} = A \cdot X + B(X) \cdot S$$

La représentation d'état d'un convertisseur multicellulaire est sous la forme suivante :

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u$$

La surface de glissement est donnée par :

$$s(x) = \Delta x = x - x_{réf}$$

Le vecteur d'état de l'erreur est donné par :

$$\Delta x = \begin{pmatrix} x_1 - x_{réf} \\ x_2 - x_{réf} \\ x_3 - x_{réf} \\ \dots \\ x_p - x_{réf} \end{pmatrix}$$

Après plusieurs transformations on obtient une représentation des signaux de commande Si :

$$S_1 = \text{signs} \left(-\frac{P}{E} I_{ch \text{ réf}} V_{C_1} - I_{ch} \right)$$

$$S_2 = \text{signs} \left(-\frac{P}{E} I_{ch \text{ réf}} (V_{C_1} - V_{C_2}) - I_{ch} \right)$$

....

$$S_P = \text{signs} \left(-\frac{P}{E} I_{ch \text{ réf}} (V_{C_{P-1}} - V_{C_P}) - I_{ch} \right)$$

Après avoir déterminé les lois de commutation, elles sont insérées dans un ensemble de boucles de rétroaction (Figure IV.18). Chaque variable d'état possède sa propre boucle d'asservissement, où l'erreur par rapport à la grandeur de référence est calculée. Les P fonctions de commutation sont ensuite obtenues en combinant linéairement les erreurs de toutes les variables d'état. Enfin, P comparateurs à hystérésis génèrent les P ordres de commande du convertisseur multicellulaire.

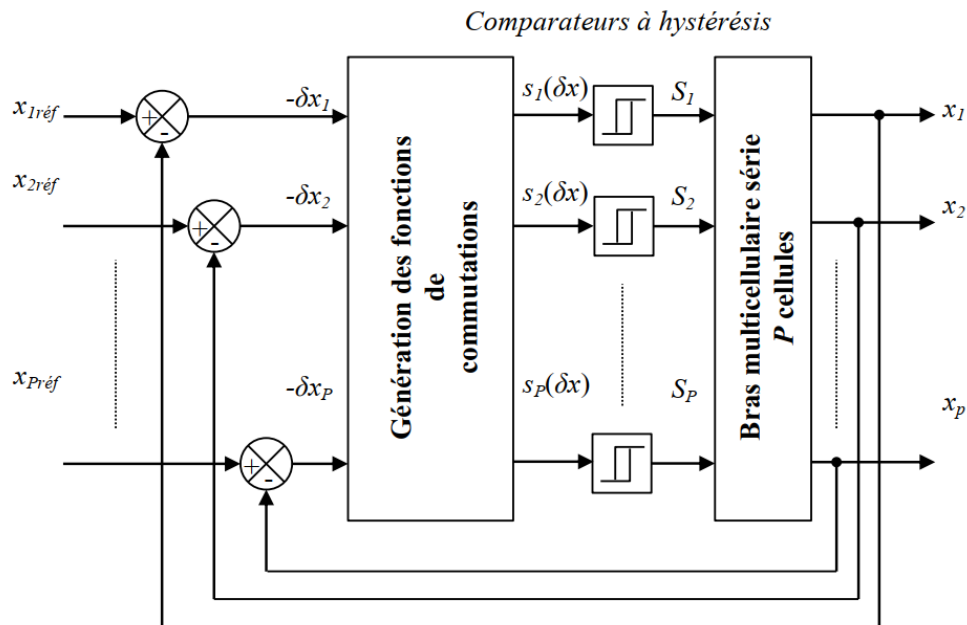


Figure IV-18 Schéma bloc de la commande par mode de glissement d'un convertisseur multicellulaire série.

Pour voir l'efficacité et la rapidité de régulation de la commande par mode glissant, nous avons effectué deux simulations sous MATLAB/SIMULINK. Elles concernent l'onduleur multicellulaire série à 3 cellules et à 5 cellules alimentant une charge (R-L), contrôlé avec la commande par mode glissant. Les paramètres utilisés dans cette simulation sont donnés sur le tableau IV-1.

	Paramétrés	Valeurs
L'onduleur	<i>Nombre de cellules (P)</i>	3 et 5
	<i>Tension continue (E)</i>	1500v
	<i>Condensateur flottant (C)</i>	40 μ F
La charge	<i>Résistance (R_{ch})</i>	10 Ω
	<i>Inductance (L_{ch})</i>	1 mH
La commande MG	<i>Fréquence de découpage (f_{dec})</i>	10 KHz

Tableau IV-1 Paramètres utilisé dans le cas de la commande par mode glissant.

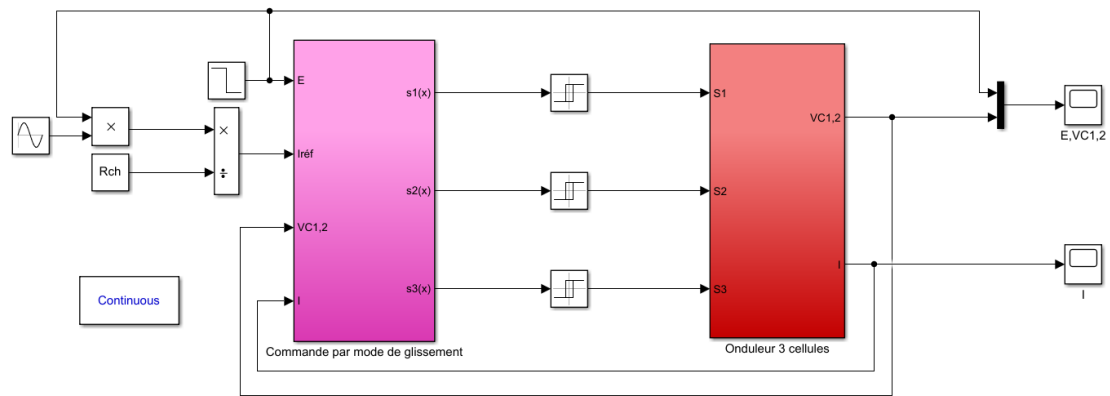


Figure IV-19 Bras d'onduleur FCMC 3 cellules, alimentant une charge R-L, contrôlé par la commande par mode de glissement.

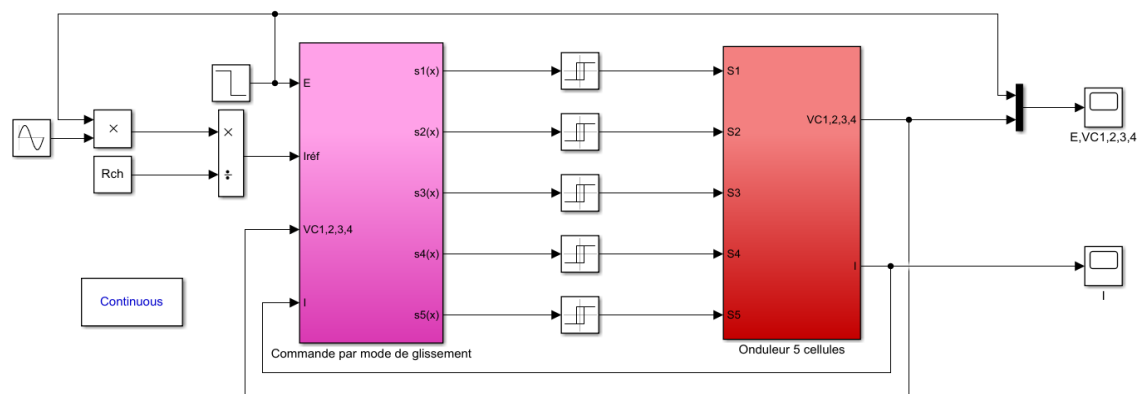


Figure IV-20 Bras d'onduleur FCMC 5 cellules, alimentant une charge R-L, contrôlé par la commande par mode de glissement.

IV.3.1. Résultats de simulation :

IV.3.1.1. L'onduleur à 3 cellules :

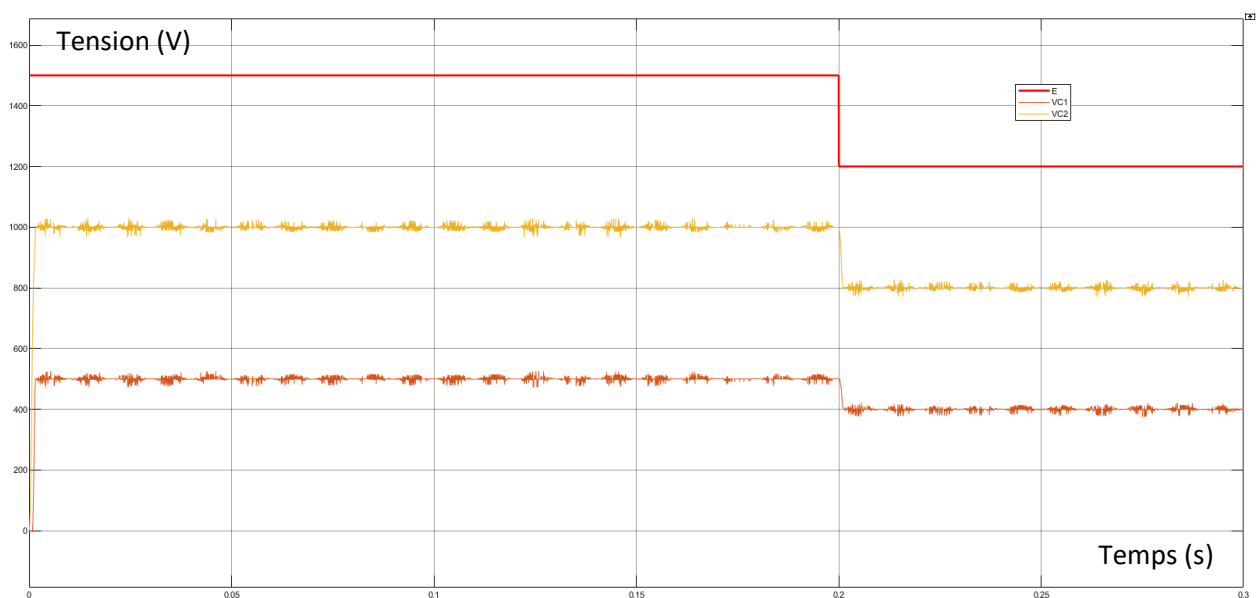
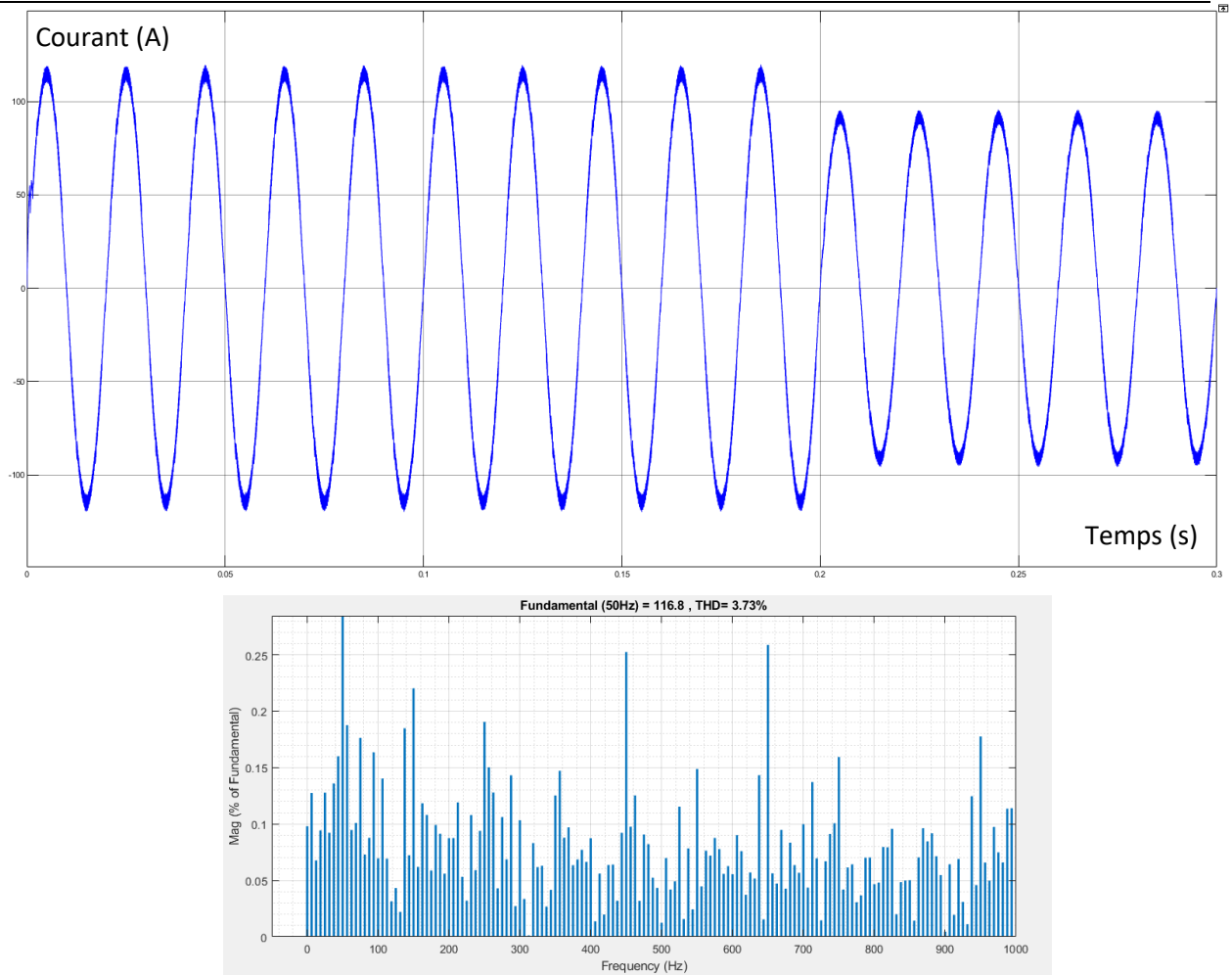
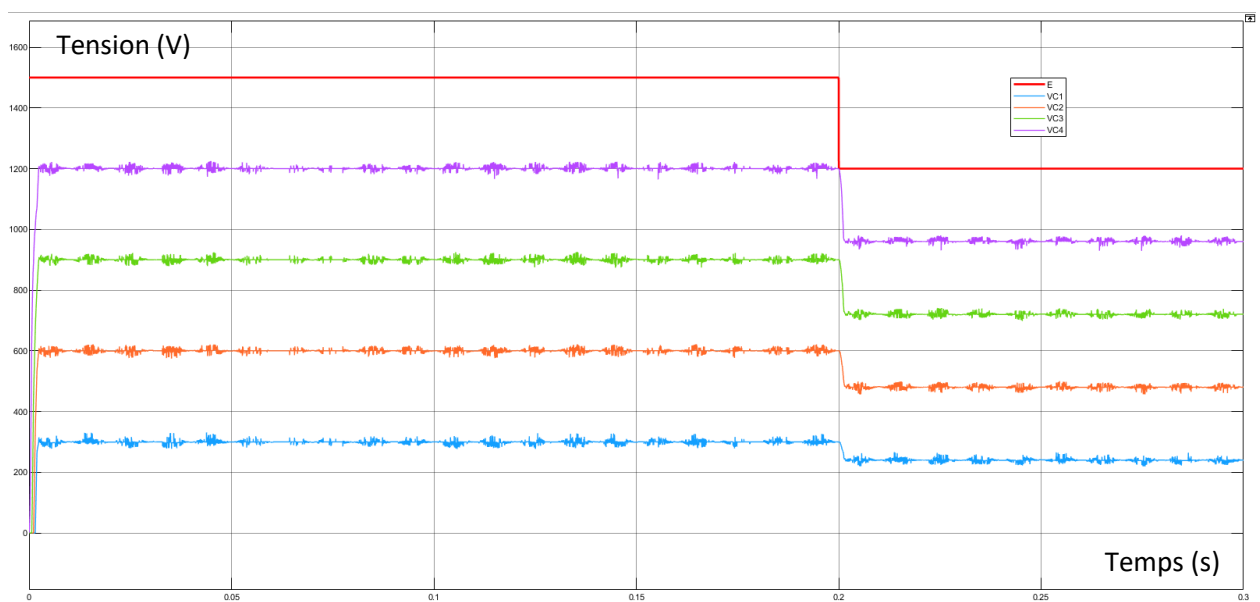


Figure IV-21 Evolution des tension flottants. (3 cellules)



IV.3.1.2. L'onduleur à 5 cellules :



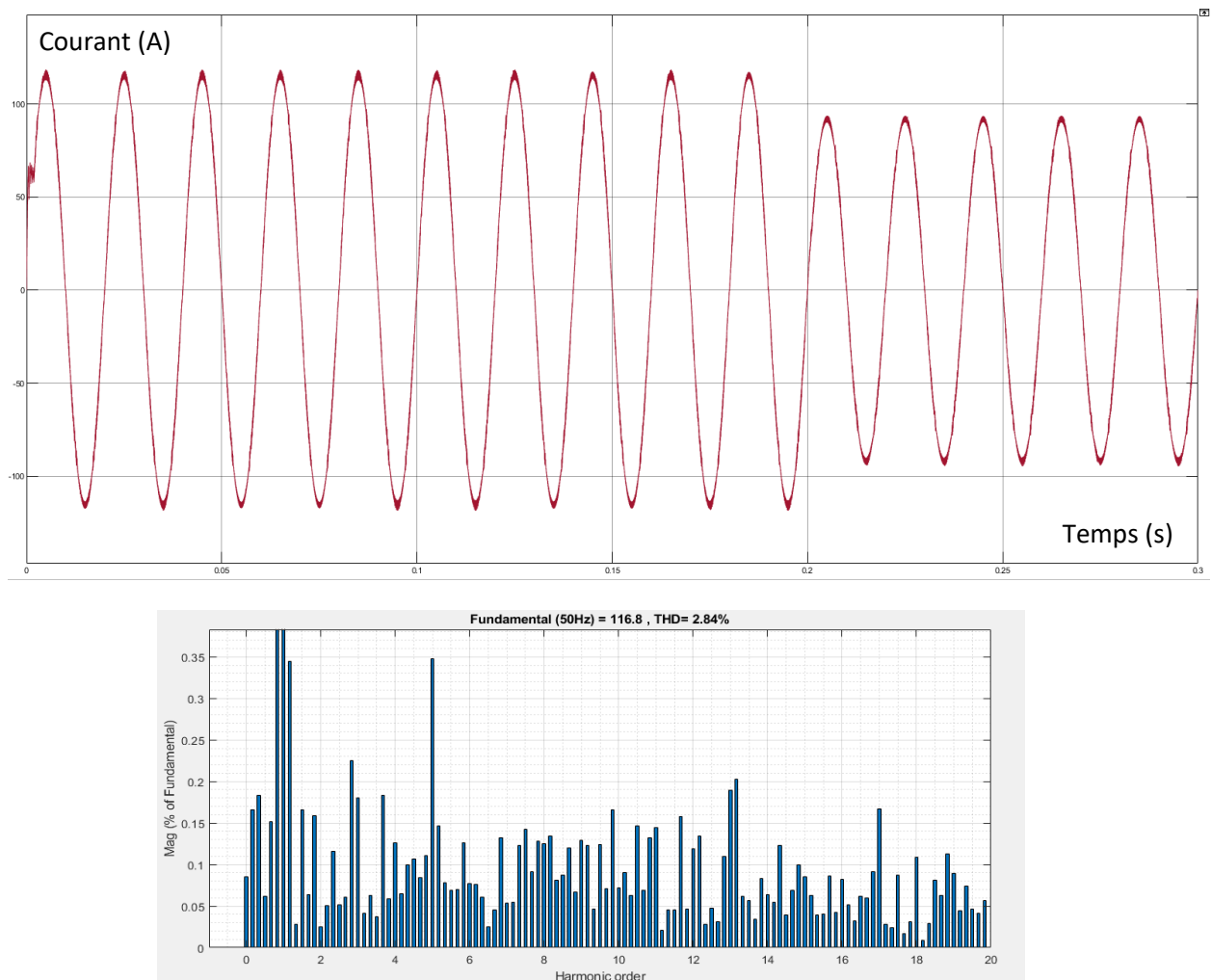


Figure IV-24 Courant de charge et son THD. (5 cellules)

IV.3.2. Interprétation des résultats :

Basé sur les résultats présentés dans les figures IV-21 à 24, nous pouvons déduire que la technique de contrôle en mode glissant impose un rééquilibrage rapide des tensions flottantes avec un régime transitoire très bref, bien inférieur à 0,01 s pour les deux onduleurs, ce qui signifie que ces tensions atteignent leurs valeurs de référence beaucoup plus rapidement que ce que nous avons observé en mode de contrôle en boucle ouverte.

Nous observons également la rapidité de régulation de cette technique car après l'application d'une chute de tension de 300 V à $t=0,2$ s, nous remarquons que les tensions flottantes suivent et s'ajustent à ce changement extrêmement rapidement, ce qui se reflète également dans la forme d'onde du courant de charge pour les deux onduleurs.

En comparant les deux onduleurs, nous remarquons que la forme d'onde du courant de charge est bien plus propre et plus proche d'une forme d'onde sinusoïdale dans l'onduleur à 5

cellules par rapport à celui à 3 cellules, ce qui est conforme à la théorie. Nous observons également une amélioration de la valeur du THD, avec 2,84 % comparé à 3,73 %.

IV.4. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons d'abord présenté les résultats de la simulation des onduleurs à 3 et 5 cellules alimentés par le GPV. Les résultats étaient pour la plupart similaires à ceux du chapitre précédent, où nous avons utilisé une source de tension continue, ce qui confirme que toute augmentation du nombre de cellules améliore inévitablement les formes d'onde de tension et de courant ainsi que le THD. Nous avons également confirmé l'efficacité de l'intégration d'un circuit auxiliaire RLC, car il contribue à accélérer l'équilibrage des tensions flottantes et à améliorer la THD. De plus, nous avons constaté qu'un seul circuit RLC pourrait ne pas être suffisant si nous utilise plus de 3 cellules, nous avons donc dû utiliser 3 circuits en parallèle pour l'onduleur à 5 cellules.

Ensuite, nous avons réalisé une commande en boucle fermée en utilisant la technique de commande par mode glissant, et nous avons constaté son efficacité et sa fiabilité dans la régulation des tensions flottantes. Il les a régulées beaucoup plus rapidement et avec une grande précision.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce thème est lié à l'étude de commande des onduleurs multicellulaires séries associées au système PV.

Premièrement, nous avons présenté les caractéristiques fondamentales des cellules photovoltaïques et leurs réponses aux variations de température et d'éclairement. Nous avons également mis en évidence l'importance du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser le rendement des cellules photovoltaïques.

Deuxièmement, nous avons approfondi notre compréhension des convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes solaires, en mettant en évidence les différents types d'onduleurs multicellulaires et leurs stratégies de commande. Nous avons souligné leur résilience, leur efficacité et leur fiabilité dans une variété de conditions opérationnelles, notamment grâce à l'utilisation de stratégies de commande telles que la modulation de largeur d'impulsion (MLI-ST) et le contrôle par mode glissant.

Troisièmement, nous avons mené des simulations pour évaluer les performances des onduleurs multicellulaires à 3 et 5 cellules sous différentes conditions de fonctionnement. Les résultats ont confirmé que l'augmentation du nombre de cellules rend la forme d'onde de sortie de l'onduleur plus proche d'une sinusoïde, améliorant ainsi ses performances et réduisant le (THD). De plus, nous avons constaté que l'augmentation de l'indice de modulation M_f est bénéfique et contribue à réduire la THD. En outre, l'utilisation de valeurs appropriées de l'indice de régulation r (0.8 ou 0.9) a été identifiée comme la méthode optimale pour garantir un fonctionnement efficace de l'onduleur. Enfin, nous avons observé que les tensions flottantes se rééquilibrent naturellement, mais que la durée du régime transitoire est longue. Par conséquent, nous avons intégré un circuit auxiliaire RLC, qui agit à la fois comme un outil pour accélérer l'équilibrage et comme un filtre pour réduire le THD.

Enfin, nous avons étudié l'intégration des onduleurs avec un générateur photovoltaïque, ainsi que l'utilisation de stratégies de commande en boucle fermée pour réguler les tensions flottantes. Les résultats ont confirmé les avantages de l'intégration d'un circuit auxiliaire RLC pour accélérer le rééquilibrage des tensions flottantes et améliorer la THD. De plus, la stratégie de commande par mode glissant s'est révélée efficace et fiable pour réguler les tensions rapidement et avec précision.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Dris Mida, "Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque »". Thèse doctorat de l'Université de Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2019.
- [2] BENKHETTOU djemaa, KADIRE Aziza, "Amélioration Energétique d'un système de pompage photovoltaïque". Mémoire Master de l'Université de KASDI MERBAH de OUARGLA, Algérie, 2018.
- [3] Zidane M'hamed, Cheurfa Abdelbaqi, "Etude et optimisation d'un système photovoltaïque". Mémoire de master de l'Université Abderrahmane-Mira de Bejaia, Algérie, 2020.
- [4] Site web, "Energie plus", "<https://energieplus-lesite.be>".
- [5] Abadou M,F, Ayadi M,R, "Etude et simulation des onduleurs multicellulaire séries associes au système PV. Mémoire de master de l'Université de M'hamed Bogara Boumerdes, Algérie, 2023.
- [6] Site web, "Florida's Premier Energy Research Center at the University of Central Florida", "<https://energyresearch.ucf.edu/>".
- [7] Bouda Sofiane, Berkane Abderaoufe, " Génération et implémentation sur FPGA de signaux PWM pour la commande des onduleurs multi-niveaux", Mémoire de master de l'Université de Saad Dahlab de Blida ,Algérie, 2020.
- [8] Benattia Salah, Naiti M,R, " Etude Et Commande D'un Convertisseur Multi Niveau Multicellulaire". Mémoire de master de l'Université de KASDI MERBAH-OUARGLA, Algérie, 2022.
- [9] Guy Séguier, Francis Labrique, Robert Baussiere « Les convertisseurs de l'électronique de puissance » « Volume 4 »,2017.
- [10] MANSOURI Abdallah, " Commande des Onduleurs Multiniveaux". Mémoire de master de l'Université de MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, Algérie, 2016.
- [11] DELLALOU KHEIREDDINE, " Stratégies De Commande Des Onduleurs Multiniveaux (MLI ST et MLI Vectorielle)" Mémoire de master de l'Université de BADJI MOKHTAR-ANNABA, Algérie, 2019.
- [12] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral point-clamped PWM inverter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-17, pp. 518 –523, Sept. 1981.

- [13] T. Meynard, H. Foch "Multi-Level conversion: High voltage choppers and voltage source inverters". IEEE Power Electronics Specialists Conference 1992.
- [14] K. Benmansour, "Réalisation d'un banc d'essai pour la Commande et l'Observation des Convertisseurs Multicellulaires Série : Approche Hybride". Thèse de Doctorat, Université de Cergy Pontoise, 2009.
- [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] HANAFI Salah, "Contribution à l'étude et à la commande des structures de conversion d'énergie électrique de type convertisseur multicellulaire". Thèse de Doctorat UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, Algérie, 2016.
- [18] M.F.E. Gutiérrez, "Contribution à la définition de structures optimales d'onduleurs pour la commande des machines à courant alternatif ". Thèse de Doctorat, Supélec, 2001.
- [19] A. Chouder, "Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série". Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, Algérie, 2010.
- [20] P. Carrere, "Etude et réalisation des convertisseurs multicellulaires série à IGBT". Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.
- [21] B. NICOLAS, "Contribution à la commande des convertisseurs statiques : définition des lois de commutation à l'aide de la théorie des modes glissants". Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1996.
- [22] B. Rouabah, "Commande d'un convertisseur multicellulaire pour une application de filtrage actif ". Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, Algérie, 2012.

