



## Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réalisé par : ZAREB Hadjer.

## Thème

**Étude de l'impact des différentes techniques de  
commande appliquées aux convertisseurs statiques sur la  
qualité de l'énergie dans un système éolien.**

Soutenu le: 21/09/2023

Devant le Jury composé de :

Mme : AIT Saadi	Prof.	Univ. Bouira	Président
Mr : KHARCHI	M.C.B	Univ. Bouira	Examineur
Mme : AGGOUN Ghania	M.C.A	Univ. Bouira	Encadreur

## *Dédicaces 1*

*ma famille, qui a été ma source constante d'inspiration et de soutien tout au long de ce parcours académique. À mon encadreur Aggoun Ghania, qui a utilisé sa sagesse et ses sages conseils pour rédiger ce mémo. À mes amis qui partagent avec moi les hauts et les bas de cette aventure. À tous les professeurs qui m'ont transmis leurs connaissances et leur passion pour la recherche. À tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce message, je vous dédie cet ouvrage avec remerciements et appréciation. Cette thèse est le résultat de longues heures de travail, de réflexion et de dévouement. "C'est un témoignage de ma persévérance, de mon apprentissage et de ma passion pour ce domaine. J'espère que ce dévouement reflète ma gratitude envers ceux qui ont rendu ce voyage possible.*

*Zareb Hadjer.*

---

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements au membre du jury, et vous prie d'accepter mon sincère respect et ma profonde appréciation pour ce travail. Je tiens également à remercier Mme Aggoun Ghania de m'avoir guidé dans ce travail et de l'avoir développé. profite également de cette occasion pour exprimer mes remerciements à tous les professeurs du Département de Génie Électrique de la Faculté des Sciences et Sciences Appliquées, Université d'Alger, Mohand Oulhadj Bouira qui nous ont soutenus durant nos études. Enfin, j'associe à ces remerciements tous ceux qui ont contribué à réaliser ce travail.*

## Résumé

Le travail proposé dans cette thèse concerne l'étude de différentes techniques de commande MLI pour les convertisseurs statiques (redresseur et onduleur), qui ont à améliorer la qualité de l'énergie dans le système éolien. Ce travail se compose de trois chapitres : Dans le premier chapitre, je vais présenter une généralité sur les énergies renouvelables et les convertisseur statiques. Dans le deuxième chapitre, modélisation des convertisseurs statiques associer aux différents technique de commande MLI. Dans le dernier chapitre, la simulation des convertisseurs statiques à l'aide de logiciel MATLABE-SIMULINK.

**Mots clés :** Commande par MLI, les convertisseur statiques (redresseur et onduleur) , les énergies renouvelables, THD et Matlabsimulink.

# Table des Matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des Matières .....	III
Liste des Figures.....	IV
Liste des Tableaux.....	IX
Listes des Acronymes et Symboles .....	X
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables et les convertisseurs statiques.</b>	
I. Energie renouvelable .....	2
I.1. Différents types d'énergies renouvelables.....	2
I.1.1. Energie solaire .....	3
I.1.2. Energie éolienne .....	4
I.1.2.1. Composantes d'une éolienne.....	5
I.1.2.2. Classification des éoliennes.....	6
I.1.3. Energie hydraulique .....	8
I.1.4. Energie géothermique .....	8
I.1.5. Energie de la biomasse.....	9
I.1.6. Energie biogaz .....	10
I.1.7. Energie marémotrice .....	11
I.2. Les Convertisseurs statiques .....	12
I.2.1. Quelques applications des convertisseurs statiques .....	13
I.2.2. Redresseurs.....	13
I.2.2.1. Différents types de redresseurs.....	14
I.2.3. Onduleurs .....	15
I.2.3.1. Types d'onduleurs .....	15
I.2.3.2. Applications des onduleurs.....	15
I.2.4. Gradateur.....	16
I.2.4.1. Constitution d'un gradateur .....	16

I.2.4.2. Types des gradateurs .....	16
I.2.5. Hacheurs.....	17
I.2.5.1. Domaine d'utilisation des hacheurs.....	17
I.2.5.2. Différents types des hacheurs .....	17
I.2.6. Rendement du convertisseur statique.....	21

**Chapitre 2 : Modélisation des convertisseurs statiques associés aux différentes techniques de commandes MLI.**

II. Modulation de la Largeur d'Impulsions.....	22
II.1. Définition.....	22
II.2 Principe de modulation de largeur d'impulsion.....	22
II.3. Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	23
II.4. Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion.....	23
II.4.1 Technique MLI sinus-triangl.....	23
II.4.2. Techniques MLI par hystérésis .....	24
II.4.3 Technique de MLI SINUS-DENT DE SCIE.....	24
II.4.4 Injection harmonique d'ordre 3 dans la référence .....	25
II.5. Taux de distorsion harmonique.....	25
II.6. Avantages et inconvénients de la MLI.....	26
II.7. Redresseur à commande MLI.....	27
II.7.1.Principe de la commande du redresseur à MLI.....	27
II.7.2. Modélisation de redresseur MLI .....	28
II.8. Modélisation d'un onduleur MLI.....	31

**Chapitre 3 : Simulation des convertisseurs statiques.**

III. Présentation de l'environnement MATLAB Simulink.....	34
III.1. Matlab.....	34
III.2. Simulink. ....	35
III.3. Simulation des différentes techniques de commande des redresseurs et onduleur à MLI sous Matlab/Simulink.....	36

III.3.1. La commande MLI SINUS-DENT DE SCIE.....	36
III.3.2. La commande MLI sinus-triangle. ....	42
III.3.3.La commande MLI avec Injection harmonique d 'ordre 3 dans la référence .....	48
III.3.4 La commande MLI Hysteresis .....	54
<b>Conclusion Générale</b>	<b>60</b>
<b>Références</b>	<b>61</b>
<b>Annexe</b>	<b>65</b>

# Liste des Figures

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b> :Différentes sources d'énergies renouvelables. ....	2
<b>Figure I.2</b> :Principe de fonctionnement d'un CESI (Chauffe-Eau Solaire Individuel). ....	3
<b>Figure I.3</b> :Système photovoltaïque en sites isolés. ....	4
<b>Figure I.4</b> :Chauffage solaire passive .....	4
<b>Figure I.5</b> :Schéma des différents éléments d'une éolienne. ....	5
<b>Figure I.6</b> :Composants de la nacelle d'une éolienne. ....	6
<b>Figure I.7</b> :Eoliennes à axe horizontal.....	7
<b>Figure I.8</b> :Architecture d'une éolienne verticale. ....	7
<b>Figure I.9</b> :Schéma de principe d'une centrale gravitaire. ....	8
<b>Figure I.10</b> :Géothermie haute énergie.....	8
<b>Figure I.11</b> :Schéma de principe d'une usine biomasse. ....	10
<b>Figure I.12</b> :Energie biogaz.....	10
<b>Figure I.13</b> :Energie marémotrice. ....	11
<b>Figure I.14</b> :Convertisseur AC-DC. ....	14
<b>Figure I.15</b> :Convertisseur DC-AC. ....	15
<b>Figure I.16</b> :Convertisseur AC-AC. ....	16
<b>Figure I.17</b> :Principe de base d'un hacheur.....	17
<b>Figure I.18</b> :Schéma d'un hacheur serie Buck. ....	18
<b>Figure I.19</b> :Schéma d'un hacheur serie Buck. ....	19
<b>Figure I.20</b> :Deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état De l'interrupteur S19	
<b>Figure I.21</b> :Schéma d'un hacheur parallèle(Boost) .....	20
<b>Figure I.22</b> :Chronogrammes des divers courants.....	21

## Chapitre II

<b>Figure II.1</b> :Réalisation du signal MLI .....	22
<b>Figure II.2</b> :Modulation hystérésis .....	24
<b>Figure II.3</b> :Illustration de MLI Dents de Scie.....	24
<b>Figure II.4</b> :MLI avec l'injection de l'harmonique 3 .....	25
<b>Figure II.5</b> :Structure du redresseur MLI .....	28
<b>Figure II.6</b> :Défèrents états de commutation des interrupteurs du redresseur a MLI .....	30
<b>Figure II.7</b> :Schéma de l'onduleur triphasé.....	32



### Chapitre III

<b>Figure III.1</b> :Résultat de la commande MLI Sinus-dent de scie d'un onduleur triphasé.....	36
<b>Figure III.2</b> :Spectres harmoniques de tension $V_a$ d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.....	36
<b>Figure III.3</b> :Spectres harmoniques de courant $I_a$ d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.....	37
<b>Figure III.4</b> :Allure de tension simple et composé d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.....	37
<b>Figure III.5</b> :Spectre harmonique de Tension simple d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie...	38
<b>Figure III.6</b> :Illustration de MLI Sinus-dent de scied'un onduleur triphasé.....	38
<b>Figure III.7</b> :Allure de tension et le courant d'entrée d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.	39
<b>Figure III.8</b> : Spectre harmonique de tension $V_{bd}$ d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.....	39
<b>Figure III.9</b> : Spectre harmonique de courant $I_b$ d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.....	40
<b>Figure III.10</b> :Tension et courant de sortie d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.....	40
<b>Figure III.11</b> :Spectre harmonique de courant de sortie d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.....	41
<b>Figure III.12</b> :Spectre harmonique de tension de sortie d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.....	41
<b>Figure III.13</b> :Tensions et courants d'entrees d'un onduleur MLI sinus-triangle .....	42
<b>Figure III.14</b> :Spectres d'harmoniques de tension $V_a$ d'un onduleur MLI sinus-triangulaire.....	42
<b>Figure III.15</b> :Spectres d'harmoniques de courant $I_a$ d'un onduleur MLI sinus-triangulaire..	43
<b>Figure III.16</b> :Tension simple et composé d'un onduleur MLI sinus-triangulaire .....	43
<b>Figure III.17</b> :Spectres d'harmoniques de tension simple d'un onduleur MLI sinus-triangulaire .....	44
<b>Figure III.18</b> :Spectres d'harmoniques de tension composé d'un onduleur MLI sinus-triangulaire .....	44
<b>Figure III.19</b> :Illustration de MLI sinus-triangule d'un onduleur triphasé .....	45
<b>Figure III.20</b> Résulta de simulation d'un redresseur MLI sinus-triangulaire .....	45
<b>Figure III.21</b> :Spectres d'harmoniques de tension $V_a$ d'un redresseur MLI sinus-triangulaire .....	46

<b>Figure III.22</b> :Spectres d’harmoniques de courant $I_a$ d’un redresseur MLI sinus-triangulaire .....	46
<b>Figure III.23</b> :Courant et tension de sortie d’un redresseur MLI sinus-triangulaire. ....	47
<b>Figure III.24</b> :Spectres d’harmoniques de courant de sortie d’un redresseur MLI sinus-triangulaire .....	47
<b>Figure III.25</b> :Tensions et courants d’entrees d’un onduleur MLI injection harmonique d’ordre 3 dans la référence.....	48
<b>Figure III.26</b> :Spectre harmonique de tension $V_a$ d’un onduleur MLI avec injection harmonique d’ordre 3.....	49
<b>Figure III.27</b> :Spectre harmonique de tension $V_a$ d’un onduleur MLI avec injection harmonique d’ordre 3 .....	49
<b>Figure III.28</b> :Tension simple et composé d’un onduleur MLI avec injection harmonique d’ordre 3.....	50
<b>Figure III.29</b> :Spectre harmonique de tension simple d’un onduleur MLI avec injection harmonique d’ordre 3 .....	50
<b>Figure III.30</b> :Résultat de la commande MLI avec d’injection harmoniqd’ordre 3 d’un onduleur triphasé .....	51
<b>Figure III.31</b> :Tensions et courants d’entrées d’un redresseur a technique MLI avec injection harmonique .....	51
<b>Figure III.32</b> :Spectre harmonique de tension $V_a$ d’un redresseur MLI avec injection harmonique d’ordre 3 .....	52
<b>Figure III.33</b> :Spectre harmonique de courant $I_a$ d’un redresseur MLI avec injection harmonique d’ordre 3 .....	52
<b>Figure III.34</b> :Courant et tension sortie d’un redresseur MLI injection harmonique avec leurs spectres harmoniques .....	53
<b>Figure III.35</b> :Spectre harmonique de courant de sortie d’un redresseur MLI injection harmonique .....	53
<b>Figure III.36</b> :Résultat de la commande MLI hystérésis d’un onduleur triphasé.....	54
<b>Figure III.37</b> :Spectre harmonique de courant $I_a$ de source d’un onduleur MLI hysteresis ...	55
<b>Figure III.38</b> :Tension simple et composé d’un onduleur MLI hystérésis .....	55

<b>Figure III.39</b> :Résulta de simulation redresseur MLI hystérésis .....	56
<b>Figure III.40</b> :Aluure de courant Iref avec Ia .....	56
<b>Figure III.41</b> :Tension et courant de sortie d'un redresseur MLI hysteresis .....	57
<b>Figure III.42</b> :Spectre harmonique de courant d'entrie Ia d'un redresseur MLI hysteresis ....	57
<b>Figure III.43</b> :Le spectre harmonique de courant Iref d'un redresseur MLI hysteresis .....	58
<b>Figure III.44</b> :Spectre harmonique de courant de la source Ia d'un redresseur MLI hysteresis .....	58

## **Liste des Tableaux**

### **Chapitr I**

<b>Tableau.I.1</b> : Avantages et les inconvénients des énergie renouvelables .....	12
<b>Tableau.I.2</b> : Rendement de quelques convertisseurs connus.....	21

### **Chapitr II**

<b>Tableau.II.1</b> : Les huit états des interrupteurs possibles. ....	31
---	----

### **Chapitr III**

<b>Tableau.III.1</b> :Comparaison entre les techniques de commande MLI. ....	59
--	----

# Listes des Acronymes et Symboles

## • Acronymes

PWM	Pulse Width Modulation.
PDM	Pulse-Duration Modulation.
MLI	Modulation de la Largeur d'impulsion.
THD	Taux de distorsion harmonique.
THD <sub>v</sub>	Taux de distorsion harmonique de l'onde de tension.
THD <sub>i</sub>	Taux de distorsion harmonique de l'onde de courant.
F.E.M	Force électromotrice.

## • Symboles

$V_i, V_s, E$	Les tensions d'entrees	V
$V_0, V_s$	Les tensions sorties	V
L	Inductance	H
R	Résistance	Ohm
C	Capacité	F
$I_{min}$	Courant minimal	A
$I_{max}$	Courant maximal	A
A	Rapport cyclique	
H	Rendement	
$F_p$	fréquence de modulation	HZ
$F_r$	fréquence de référence	HZ
M	L'indice de modulation	
R	Coefficient de réglage de tension	
$A_r$	Amplitude de la référence	
$A_p$	Amplitude de la porteuse	

$e_a, e_b, e_c$	Les tensions de reseaux d'alimentation	v
$E_m$	L'emplutude de tension de reseaux	v
$V_{ra}, V_{rb}, V_r$	Les tension simple a l'entree de redresseur	v
$R$	Résistance de ligne reseaux-redresseur	Ohm
$L$	Inductance de ligne reseaux-redresseur	H
$S_a, S_b, S_c$	Etat de commutation de redresseur	
$U_{dc}$	Tension de bus continu	v
$I_{dc}$	Le courant redrésse	A
$R_{ch}$	Résistance de charge	Ohm
$\omega$	La pulsation du reseau	rad/s

# Introduction Générale

En transférant l'énergie électrique de la centrale vers les agglomérations, le type d'énergie utilisé par la centrale est non renouvelable comme la combustion du gaz ici en Algérie, mais on peut aussi produire de l'énergie électrique via des énergies renouvelables comme des turbines hydrauliques tournant dans l'eau ou encore grâce aux panneaux photovoltaïques ou mieux encore les éoliennes.

J'ai donc choisi d'étudier les convertisseurs statiques, qui combinent deux thématiques importantes (énergie et réseaux) à aborder. Selon mon sujet, cette étude dépend d'améliorer la qualité de l'énergie cela signifie que le redresseur convertit le signal fourni par le réseau en un signal continu, et l'onduleur ajuste l'amplitude et la fréquence du signal pour l'envoyer au rotor de la machine électrique, qui l'alimente en courant alternatif.

Le travail est divisé en quatre chapitres, organisés comme suit :

Au premier chapitre, est consacré généralités sur les énergies renouvelables et les convertisseurs statiques ,d'abord je parle d'énergie renouvelables (Energie solaire, Energie éolienne, Energie hydraulique, Energie géothermique, Energie de la biomasse, Energie biogaz, Energie marémotrice) et après je parle sur les convertisseurs statiques (redresseur, onduleur, gradateur, hacheur) en donnant la définition de chaque type de convertisseur, Son fonctionnement et parfois ses avantages et ses domaines d'utilisation.

Le deuxième chapitre : est consacré modélisation des convertisseur statiques (redresseur, onduleur) associer aux déférent technique de commande MLI, avec une étude détaillée des techniques à savoir la modulation de largeur impulsion, modulation sinusoïdale triangulaire, l'injection d'un harmonique trois dans la référence, la modulation hystérésis.

Le troisième chapitre est consacré la simulation des convertisseurs statiques et l'interprétation des techniques de commande MLI à l'aide du logiciel MATLAB-SIMULINK.

# Chapitre 1:

## Généralité sur les énergies renouvelables et les convertisseurs statiques.

### I. Energie renouvelable

L'énergie est considérée comme renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature régénère continuellement, en contraste avec les énergies non renouvelables qui s'épuisent progressivement. Souvent désignées sous les appellations "énergies propres" ou "énergies vertes", ces formes d'énergie sont exploitées avec une production minimale de déchets et d'émissions polluantes. Cependant, leur potentiel énergétique tend à être généralement inférieur à celui des énergies non renouvelables [1].

Les énergies renouvelables découlent de phénomènes naturels réguliers ou constants principalement induits par des sources telles que le Soleil (notamment l'énergie solaire, hydraulique, éolienne et biomasse), la Lune (énergie marémotrice, certains courants marins tels que l'énergie hydrolienne), et la Terre (en particulier la géothermie profonde), à l'échelle de temps correspondant à la présence humaine sur Terre (voir Figure I-1). Cette caractéristique les distingue nettement des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire. [2].



**Figure I-1** : Différentes sources d'énergies renouvelables [3].

### I.1. Différents types d'énergies renouvelables

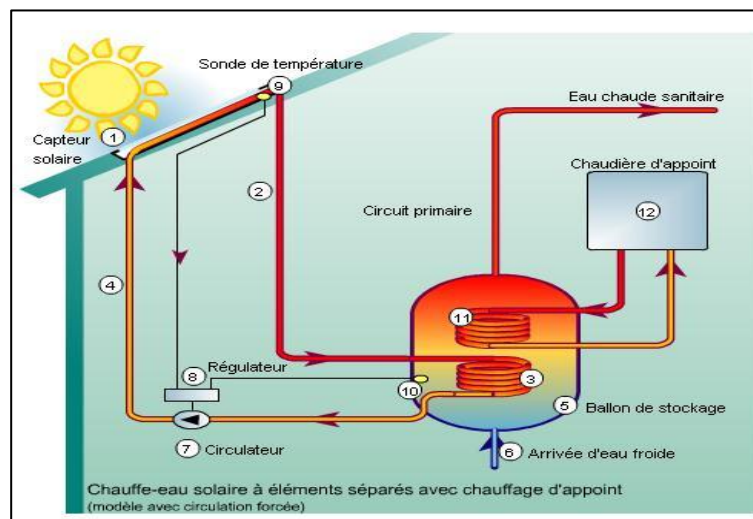
Sept des types d'énergies renouvelables les plus couramment utilisés sont pris en considération pour répondre aux besoins énergétiques du réseau électrique existant. Il s'agit de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne, de l'énergie hydraulique, de l'énergie géothermique, de l'énergie biomasse, de l'énergie biogaz et de l'énergie marémotrice [4].

## I.1.1 Energie solaire

L'énergie solaire est une source quasiment inépuisable d'énergie, émettant vers la surface terrestre un rayonnement annuel d'environ 8400 fois la consommation énergétique totale de l'humanité. Cette irradiation représente une puissance instantanée crête de 1 kilowatt par mètre carré (kWc/m<sup>2</sup>) répartie sur l'ensemble du spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Il est intéressant de noter que les déserts de notre planète reçoivent en seulement 6 heures plus d'énergie solaire que ce que l'humanité consomme sur une année entière [5].

L'énergie solaire est produite et exploitée selon divers procédés.

- **Energie solaire thermique** : Il existe des méthodes simples pour exploiter l'énergie solaire, notamment en produisant de la chaleur grâce à des panneaux solaires thermiques sombres. Une autre approche consiste à générer de la vapeur en utilisant la chaleur du soleil, puis à convertir cette vapeur en électricité [6]. Ci-dessous (Figure I-2), vous pouvez voir un schéma explicatif du fonctionnement d'un Chauffe-Eau Solaire Individuel (CESI), qui fonctionne selon le principe de l'énergie solaire thermique.



**Figure I-2** : Principe de fonctionnement d'un CESI (Chauffe-Eau Solaire Individuel) [7].

- **Energie solaire photovoltaïque** : Il s'agit également de produire de l'électricité directement à partir de la lumière en utilisant des panneaux solaires. Ce mode d'énergie est déjà largement utilisé dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans des pays ou des zones qui ne disposent pas de ressources énergétiques traditionnelles telles que les hydrocarbures ou le charbon [6]. Une application majeure de cette technologie est le système photovoltaïque dans des endroits isolés, comme illustré dans la Figure I-3.



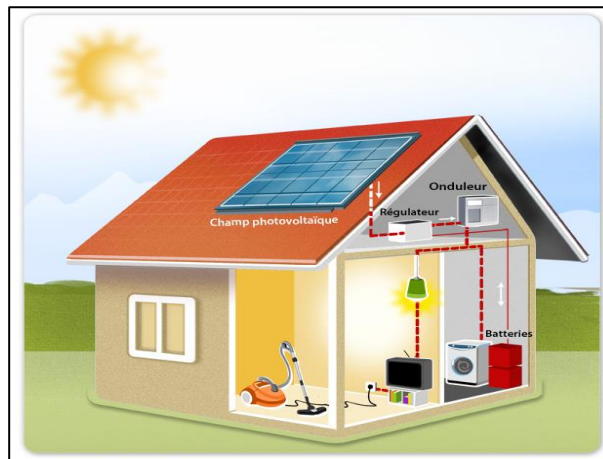


Figure I-3 : Système photovoltaïque en sites isolés [8].

- **Energie solaire passive** : Une autre utilisation de l'énergie solaire consiste à exploiter directement la lumière pour le chauffage, comme illustré dans la Figure I-4 [5].

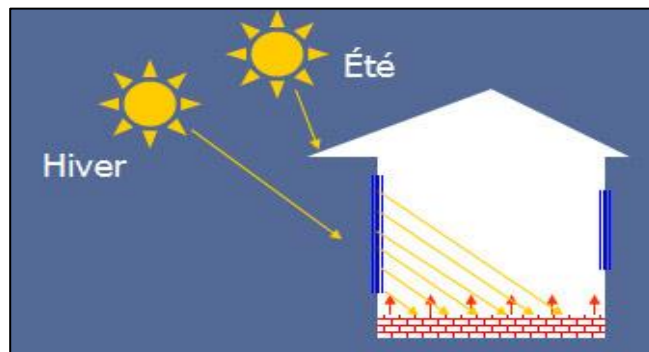


Figure I-4 : Chauffage solaire passif [9].

### I.1.2 Energie éolienne

Les éoliennes de grande taille commencent à devenir des éléments familiers dans les paysages des régions ventées, et cette tendance devrait s'accroître à l'avenir. L'électricité éolienne présente des avantages notables, notamment son caractère écologique avec l'absence d'émissions de gaz à effet de serre, ainsi que sa caractéristique de renouvelabilité. Toutefois, elles présentent quelques inconvénients, notamment la modification des paysages et une légère émission sonore, ce qui limite leur installation à proximité des zones résidentielles. Les éoliennes sont des structures de grande hauteur, avec des mâts mesurant généralement de 80 à 100 mètres pour les modèles les plus puissants. Cette altitude élevée est nécessaire car le vent est plus constant et plus fort à cette hauteur qu'à la surface terrestre. Les hélices, qui comportent généralement trois pales de grandes dimensions, sont essentielles pour la production d'énergie éolienne. Cependant, elles nécessitent une vitesse minimale du vent de 10 à 15 km/h pour pouvoir fonctionner efficacement. De plus, lorsque la vitesse du vent

dépasse 90 km/h, les éoliennes sont arrêtées pour éviter une usure prématurée due à des contraintes excessives [10].

### I.1.2.1 Composantes d'une éolienne

Dans une éolienne, on peut identifier trois composantes essentielles, à savoir la nacelle, le rotor et le mât, comme clairement illustré dans la Figure I-5 :

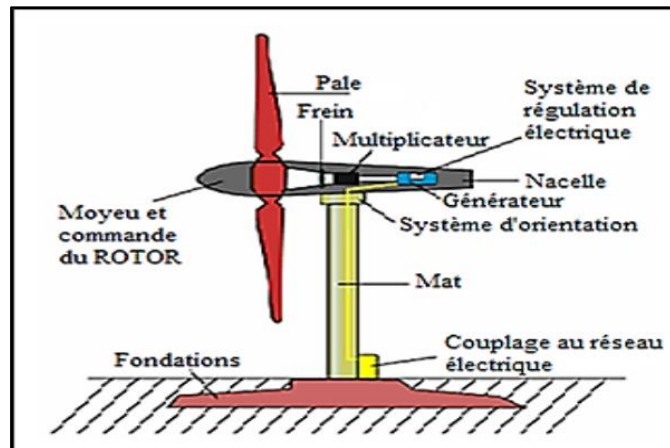


Figure I-5 : Schéma des différents éléments d'une éolienne [11].

- **Un mât (ou tour)**

Les éoliennes domestiques sont généralement installées à une hauteur allant de 10 à 35 mètres, ce qui permet de les positionner à une altitude où la vitesse du vent est plus constante et plus élevée qu'au niveau du sol. Pour assurer leur rentabilité, les premières installations d'éoliennes domestiques débutent souvent avec une hauteur de 10 mètres. Cependant, les experts recommandent généralement d'utiliser des mâts d'éoliennes domestiques de hauteur supérieure afin de maximiser la production d'énergie [11].

- **Une nacelle**

Au sommet du mât se trouve un rotor à axe horizontal équipé de deux ou trois pales, qui sont actionnées par le vent. Dans le cas des petites éoliennes domestiques, le diamètre des pales varie généralement de 2 à 10 mètres. Le vent entraîne la rotation des pales de l'éolienne domestique à une vitesse comprise entre 10 et 25 tours par minute. Le mouvement de rotation est ensuite converti en électricité par le rotor, comme illustré dans la Figure I-6 [11].

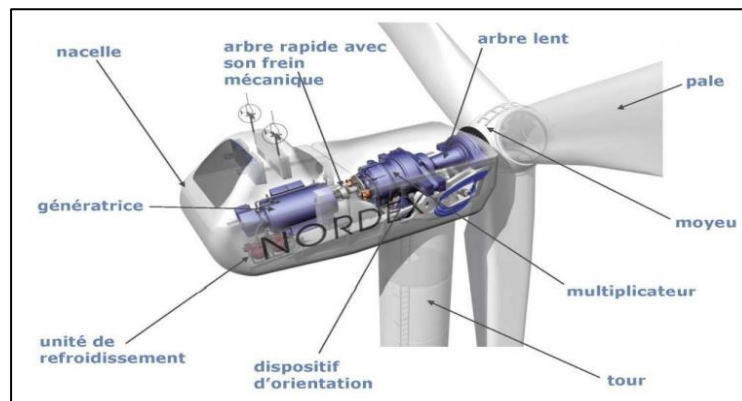


Figure I-6 : Composants de la nacelle d'une éolienne [12].

- **Le rotor :**

L'éolienne comprend plusieurs composantes essentielles, notamment :

- ✓ **Le rotor ou l'hélice:** Il est constitué de pales montées sur un moyeu qui tournent, formant ainsi la partie mécanique prédominante de l'éolienne. L'efficacité globale de l'aérogénérateur dépend grandement de cette composante. En général, le rendement de la chaîne électromécanique est élevé, atteignant généralement environ 85% [11].
- ✓ **Transmission mécanique:** Cette partie de l'éolienne transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge [11].
- ✓ **Une génératrice électrique:** La génératrice convertit l'énergie mécanique générée par le mouvement de l'éolienne en énergie électrique [11].
- ✓ **Un système électrique:** Ce système gère le fonctionnement de l'éolienne, notamment la régulation de la production d'électricité en fonction des conditions du vent [11].
- ✓ **Un système d'orientation:** Ce dispositif oriente la nacelle de l'éolienne afin de la maintenir face au vent, maximisant ainsi la capture d'énergie éolienne [11].

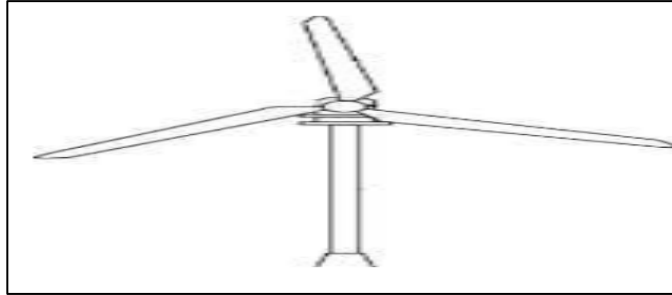
### I.1.2.2 Classification des éoliennes

Généralement, on classe les éoliennes suivant l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi deux grandes familles [13]:

- Les aérogénérateurs à axe horizontal.
- Les aérogénérateurs à axe vertical.
- **Éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus répandues. Elles s'inspirent du modèle des moulins à vent, où l'hélice comprend généralement deux ou trois pales qui tournent de

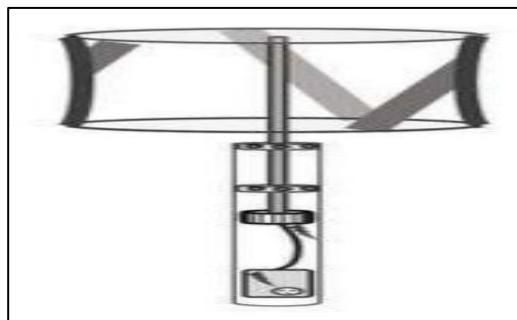
manière aérodynamique, comme illustré dans la Figure I-7. Bien qu'il existe des éoliennes horizontales monopales, elles demeurent rares. Les éoliennes à deux pales et celles à trois pales fonctionnent sur le même principe. Elles présentent un rendement supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, sont également plus robustes et moins coûteuses à produire [13].



**Figure I-7 :** Eoliennes à axe horizontal [13].

### - Eoliennes à axe vertical

Contrairement aux éoliennes à axe horizontal, les éoliennes à axe vertical sont équipées d'un rotor dont l'axe de rotation est généralement perpendiculaire au flux du fluide, comme illustré dans la Figure I-8, et est donc souvent vertical. Cette technologie existe depuis le début du XXe siècle et englobe différentes variations telles que les éoliennes de type Darrieus, Savonius, Cycloturbine, entre autres. Les caractéristiques de ces éoliennes, telles que leur silence, leur facilité d'entretien et leur tolérance aux vents variables, les rendent particulièrement adaptées aux applications domestiques ou à l'autoconsommation en énergie éolienne. [13].



**Figure I- 8:** Architecture d'une éolienne verticale [13].

Le principe fondamental de ces systèmes dits "à axe vertical" réside dans la conversion de la puissance mécanique du flux d'air en un mouvement rotatif d'un solide, le rotor, qui tourne autour d'un axe généralement perpendiculaire à la direction du flux d'air. Cette particularité confère au système une isotropie, ce qui signifie qu'il est indépendant de la direction du vent dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. En énergie éolienne, l'intérêt évident est de positionner l'axe de rotation de manière verticale, permettant ainsi de capter l'énergie du vent quelle que soit sa direction dans le plan horizontal, sans nécessité d'orienter une nacelle ou de recourir à un empennage. Cette

approche simplifie la mécanique, notamment parce que la génératrice reste fixe par rapport au sol.. [14]

### I.1.3 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique, également appelée énergie hydroélectrique, exploite la force naturelle de l'eau pour faire tourner des turbines et produire de l'électricité. Cette forme d'énergie renouvelable est générée principalement par les barrages hydroélectriques, comme illustré dans la Figure I-9. Elle s'inscrit dans un cycle naturel qui implique la récupération des eaux de pluie et l'utilisation de l'énergie gravitationnelle contenue dans ces eaux. De plus, elle tire parti des cours d'eau pour convertir la force motrice de l'eau en électricité. La vitesse de l'eau actionne une turbine qui, à son tour, entraîne un générateur électrique. [15].

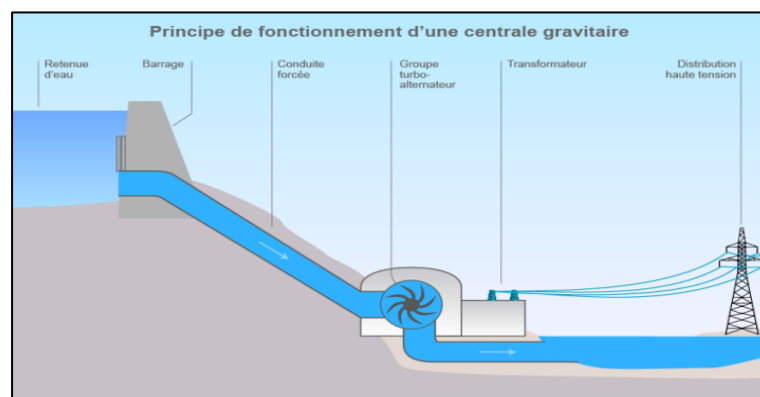


Figure I- 9: Schéma de principe d'une centrale gravitaire [16].

### I.1.4 Energie géothermique

L'énergie géothermique provient de la chaleur stockée sous la surface de la Terre. Cette chaleur est principalement générée par la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, ainsi que par les échanges thermiques avec les couches plus profondes de la Terre, comme illustré dans la Figure I-10. La géothermie désigne l'exploitation de cette chaleur à des fins énergétiques. Il convient de noter que la chaleur terrestre est une source d'énergie pratiquement inépuisable. [17].

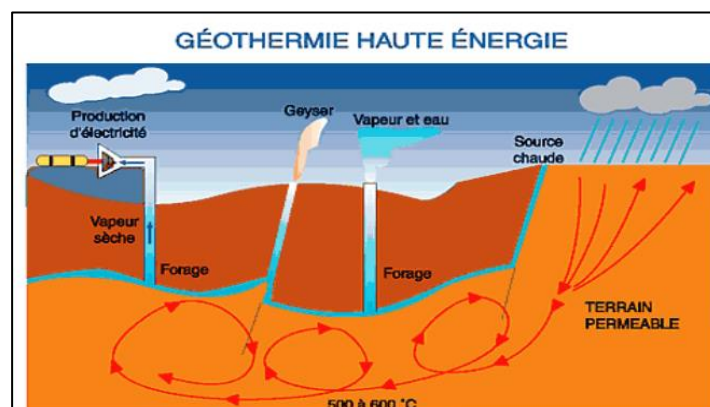


Figure I-10 : Géothermie haute énergie [18].

La géothermie peut être classée en trois types distincts [17] :

- ✓ **Géothermie peu profonde à basse température:** Dans ce cas, la chaleur est extraite de couches relativement peu profondes de la Terre, où les températures sont plus basses. C'est souvent utilisé pour le chauffage géothermique domestique, où l'eau chaude est utilisée pour chauffer les maisons, les radiateurs, et l'eau pour la douche.
- ✓ **Géothermie profonde à haute température :** Cette forme de géothermie exploite des réservoirs géothermiques plus profonds, où les températures sont plus élevées. L'eau froide est injectée sous terre, chauffée, puis remontée à la surface pour alimenter des centrales géothermiques qui produisent de l'électricité.
- ✓ **Géothermie très profonde à très haute température:** Ce type de géothermie implique l'accès à des réservoirs géothermiques extrêmement profonds et à des températures très élevées. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité géothermique à grande échelle.

Dans tous les cas, le principe de base est d'envoyer de l'eau froide sous la surface de la Terre, où elle absorbe de la chaleur, puis de la ramener à la surface pour l'utiliser, que ce soit pour la production d'électricité dans une centrale géothermique ou pour fournir de l'eau chaude aux habitations. [19].

### I.1.5 Energie de la biomasse

La biomasse se divise en quatre catégories principales : la biomasse sèche (comme le bois et les déchets agricoles), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides, et la biomasse humide (comprenant le bioéthanol, le biodiesel, l'huile végétale, etc.), comme illustré dans la Figure (I-11). En 2010, la biomasse représentait 7,5% de la production totale d'énergie, et l'on prévoit qu'elle atteindra une part de 34% d'ici 2023 [20].

Le processus de production d'électricité à partir de la biomasse implique généralement la combustion de la biomasse pour générer de la chaleur. Cette chaleur est utilisée pour chauffer de l'eau dans un réservoir, créant ainsi de la vapeur, similaire au fonctionnement d'une cocotte-minute. La vapeur est ensuite libérée à haute pression, ce qui fait tourner une turbine reliée à un alternateur. C'est cet alternateur qui produit l'électricité. L'avantage des centrales à biomasse réside surtout dans leur capacité à produire de l'électricité à partir de matériaux dont nous n'avons plus besoin, contribuant ainsi à la gestion durable des déchets organiques. [21].

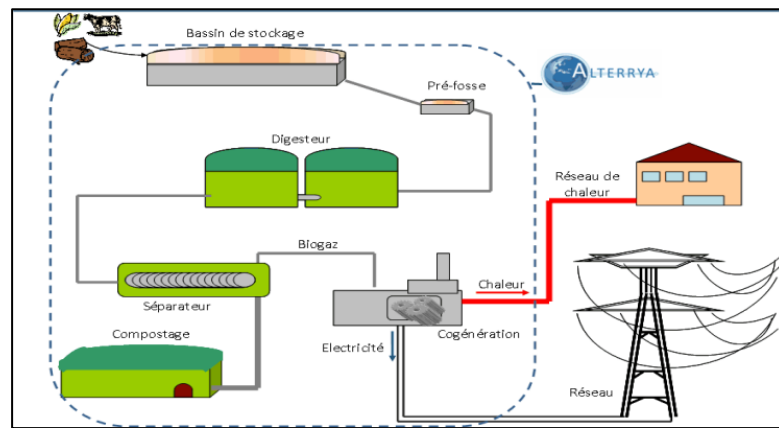


Figure I-11: Schéma de principe d'une usine biomasse [22].

## I.1.6 Energie biogaz

Le biogaz est un gaz produit par la méthanisation de matières organiques fermentescibles, telles que les déchets et les effluents d'élevage (fumier, résidus de récoltes, etc.) ou les déchets municipaux (boues de stations d'épuration des eaux urbaines, déchets alimentaires, etc.). Sa composition principale comprend du méthane ( $\text{CH}_4$ ), similaire au gaz naturel, ainsi que du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), comme illustré dans la Figure I-12. Le biogaz est considéré comme une source d'énergie renouvelable, car il provient de déchets organiques qui autrement ne seraient pas valorisés. La production de biogaz s'inscrit donc dans une perspective d'économie circulaire [23].

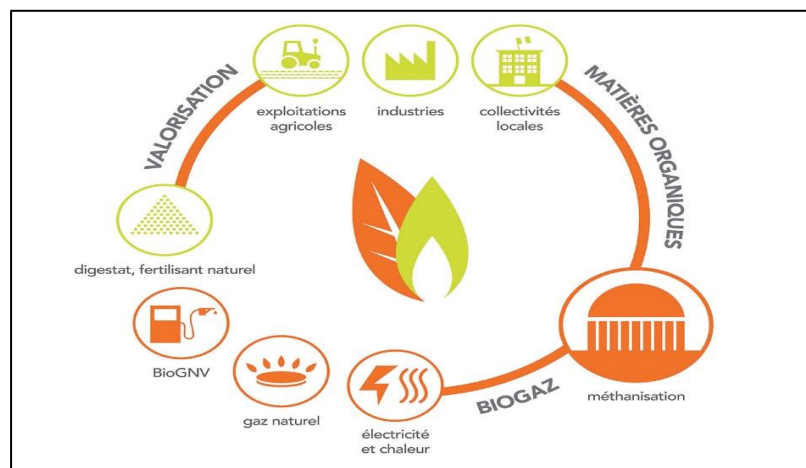


Figure I-12 : Energie biogaz [16].

La décomposition des matières organiques en biogaz est rendue possible grâce à l'action de bactéries qui opèrent dans un environnement anaérobie, c'est-à-dire dépourvu d'oxygène. Cette réaction se produit naturellement dans des décharges et dans les marais, où des bulles de gaz peuvent être observées à la surface de l'eau. Cependant, elle peut également être intentionnellement induite dans des installations appelées méthaniseurs. Il est important de noter que la production de biogaz génère également un sous-produit appelé "digestat," qui peut être sous forme solide ou liquide, et qui peut être utilisé comme fertilisant [23].

### I.1.7 Energie marémotrice

Les marées sont le résultat de l'attraction gravitationnelle exercée par le soleil et la lune. Les courants de marée sont particulièrement puissants là où l'eau s'écoule à travers des passages étroits. Le Nouveau-Brunswick bénéficie de la baie de Fundy, qui connaît les marées les plus élevées au monde. On estime que le Canada possède un potentiel considérable pour produire de l'énergie marémotrice, capable de satisfaire jusqu'à deux tiers de la demande nationale actuelle en électricité [24].

Il existe trois principales catégories de technologies utilisées pour exploiter l'énergie marémotrice et la convertir en électricité [24] :

- ✓ **Les turbines à axe vertical** : Ces turbines, illustrées dans la Figure I-13, utilisent un axe vertical pour capturer l'énergie des courants de marée.
- ✓ **Les turbines à axe horizontal** : Contrairement aux turbines à axe vertical, ces turbines ont un axe horizontal et fonctionnent de manière similaire pour convertir l'énergie des marées en électricité.
- ✓ **Les ailes hydrodynamiques à va-et-vient**: Ces dispositifs imitent le mouvement de la queue d'un poisson pour capturer l'énergie des courants de marée et la convertir en électricité.



**Figure I-13** : Energie marémotrice [18].



**Tableau I- 1** : Avantages et les inconvénients des énergies renouvelables [25].

Avantage	Inconvénient
-L'énergie éolienne ne libère aucun dioxyde de carbone au cours de son cycle de vie. -Il n'y a pas besoin de carburant.	-Affecte le paysage environnant et cause de bruit. -Dépendant du vent. -Des coûts d'investissement énormes.
-L'énergie hydroélectrique n'entraîne généralement aucun impact climatique ou environnementale. - Fournit une génération d'électricité stable et à grande échelle.	-Les centrales hydroélectriques impliquent une ingérence majeure dans le paysage et affectent les écosystèmes.
-L'énergie solaire a diminué ses coûts, grâce à son soutien public élevé et ses faibles émissions de carbone. -Les systèmes de cellules solaires ont une longue durée de vie environ 25 ans.	-L'énergie solaire est une bataille intermittente la production d'électricité dépend du soleil brillant. -Elle est encore coûteuse, malgré la diminution de son coût ces dernières années.
-La biomasse est une source d'énergie stable avec des actifs géographiquement bien diversifiés et peu de risques politiques. -Si la biomasse est bien manipulée elle est neutre en carbone à long terme.	-Livraison de plus grands volumes difficile à sécuriser. -L'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité est actuellement plus coûteuse que l'utilisation de sources d'énergie, telle que : le charbon, le gaz et l'énergie nucléaire.

## I.2 Les Convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un système qui permet d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur spécifique en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique utilisaient des machines électriques couplées mécaniquement. Cependant, avec l'avènement des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, tels que les diodes, les transistors, les thyristors, etc., les systèmes de conversion sont devenus de plus en plus sophistiqués et n'ont plus besoin de machines rotatives. C'est l'ère des convertisseurs statiques [26].

Il existe plusieurs catégories de convertisseurs statiques [26] :

- ✓ **Continu vers Continu (Hacheur)** : Ce type de convertisseur permet de convertir un courant continu en un autre courant continu en contrôlant la forme d'onde et la tension.

- ✓ **Continu vers Alternatif (Onduleur) :** Les onduleurs transforment un courant continu en un courant alternatif, généralement utilisé pour alimenter des appareils domestiques et industriels à partir d'une source de courant continu, comme une batterie.
- ✓ **Alternatif vers Alternatif (Gradateur) :** Les gradateurs sont utilisés pour contrôler la vitesse ou la puissance des moteurs électriques en modifiant la tension et la fréquence du courant alternatif.

### I.2.1 Quelques applications des convertisseurs statiques [27] :

Les convertisseurs statiques ont de nombreuses applications essentielles dans divers domaines [27] :

- **Alimentation des moteurs à courant continu, charge des batteries (Redresseur):** Les redresseurs sont utilisés pour convertir le courant alternatif en courant continu, ce qui permet d'alimenter les moteurs à courant continu et de charger les batteries, par exemple dans les systèmes de propulsion électrique des véhicules électriques.
- **Commande des moteurs à courant continu (vitesse variable):** Les hacheurs (convertisseurs continu-continu) sont employés pour contrôler la vitesse des moteurs à courant continu en ajustant la tension d'alimentation.
- **Production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et les coupures de réseau (informatique) :** Les onduleurs convertissent le courant continu en courant alternatif, ce qui permet d'alimenter en continu des appareils électriques autonomes et de fournir une alimentation de secours en cas de coupure d'électricité.
- **Commande des machines à courant alternatif (Gradateur) :** Les gradateurs sont utilisés pour contrôler la vitesse et la puissance des machines à courant alternatif, telles que les moteurs électriques utilisés dans l'industrie, le levage, ou les machines-outils.

### I.2.2 Redresseurs

Un redresseur, également connu sous le nom de convertisseur alternatif-continu (ou "rectifier" en anglais), est un dispositif conçu pour alimenter une charge en courant continu à partir d'une source de courant alternatif. La source est généralement une tension alternative, comme illustré dans la Figure I-14 [2].

Le redresseur joue un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie électrique. Il permet de convertir efficacement le courant alternatif en courant continu, ce qui est nécessaire dans de

nombreuses applications, notamment pour charger des batteries, alimenter des dispositifs électroniques qui fonctionnent en courant continu, ou alimenter des moteurs à courant continu. Il existe différentes topologies de redresseurs, adaptées à diverses applications et aux exigences de tension et de courant spécifiques.

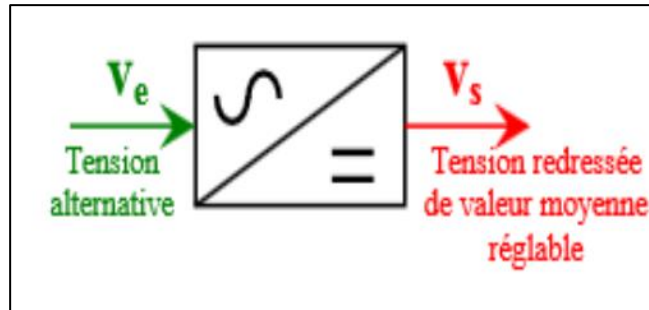


Figure I-14 : Convertisseur AC-DC [29].

Le redresseur est utilisé dans diverses applications, notamment [30] :

- ✓ **Entraînement de moteurs à courant continu** : Les redresseurs sont utilisés pour alimenter et contrôler la vitesse des moteurs à courant continu dans de nombreuses applications industrielles et de transport, tels que les trains, les véhicules électriques et les machines industrielles.
- ✓ **Chargeur de batteries d'accumulateur** : Les redresseurs sont employés pour charger les batteries d'accumulateurs, que ce soit dans des véhicules électriques, des systèmes de stockage d'énergie ou des équipements de secours.
- ✓ **Variateur de vitesse pour moteurs à courant continu** : Les redresseurs sont utilisés pour contrôler la vitesse des moteurs à courant continu, ce qui est essentiel dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les convoyeurs, les machines-outils et les systèmes de contrôle de la vitesse.

### I.2.2.1 Différents types de redresseurs

#### ➤ Redresseurs à commutation naturelle (non commandé) :

Les redresseurs non commandés, principalement construits avec des diodes, trouvent leur utilisation lorsque la tension de sortie ne nécessite pas d'ajustement. Ces assemblages produisent exclusivement une tension de sortie fixe et ne sont donc inappropriés pour la modulation de la vitesse des MCC [30].

#### ➤ Redresseurs à commutation Forcée (commandé) [30] :

Le redresseur commandé est une configuration de redresseur dans laquelle certaines des diodes ont été substituées par un ensemble de thyristors, permettant ainsi d'obtenir une tension de sortie

ajustable. Il se décline en plusieurs variantes, notamment le Pont tout thyristor triphasé PT3, le Pont mixte triphasé PM3, le Pont mixte symétrique monophasé, et le Pont mixte asymétrique monophasé.

### I.2.3 Onduleurs

Un onduleur est un dispositif de conversion statique qui transforme l'énergie électrique de la forme continue (DC) en forme alternative (AC). Cette conversion est réalisée grâce à un ensemble de semi-conducteurs contrôlés par un dispositif de commande. En résultat, il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative dont la fréquence et la valeur efficace sont réglables, en utilisant une séquence de commande appropriée, comme illustré dans la figure I-15 [31].

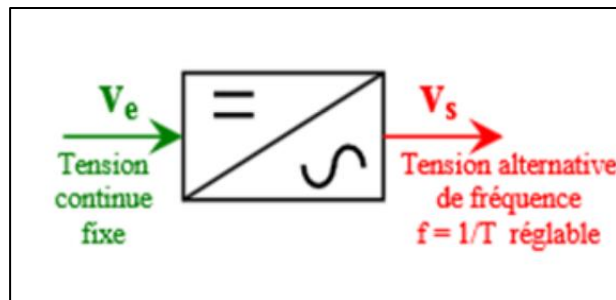


Figure I-15 : Convertisseur DC-AC [29].

#### I.2.3.1 Types d'onduleurs

Pour effectuer cette conversion, on utilise deux types d'onduleurs [30] :

- ✓ Onduleur de tension.
- ✓ Onduleur de courant.
- ✓ Onduleur à résonance, qui peut être de type parallèle, série, ou triphasé de tension.

#### I.2.3.2 Applications des onduleurs :

Parmi les domaines d'application mentionnés [32], on peut citer :

- La fourniture de une ou plusieurs tensions alternatives de fréquence et d'amplitude constantes, comme c'est le cas des alimentations de secours conçues pour prendre le relais du réseau en cas de panne électrique.
- La génération de courants ou de tensions dont la fréquence et l'amplitude sont variables, comme dans le cas des transformateurs utilisés pour alimenter des moteurs à courant alternatif (qu'ils soient synchrones ou asynchrones) qui nécessitent une vitesse variable.

### I.2.4 Gradateur

Un gradateur est un dispositif de conversion AC/AC, comme illustré dans la figure I-16. Son rôle consiste à réguler la valeur moyenne d'un signal sinusoïdal AC (par exemple, le secteur à 220V ou 380V), tout en maintenant la fréquence constante (par exemple, 50Hz). Pour ce faire, il utilise des composants de puissance contrôlés électroniquement tels que des transistors, des thyristors, des triacs, etc. [33].

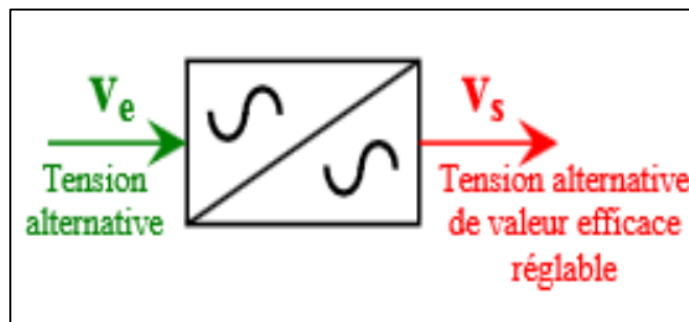


Figure I-16 : Convertisseur AC-AC [29].

#### I.2.4.1 Constitution d'un gradateur

Le gradateur se compose de deux parties distinctes [34] :

- La partie puissance est composée de deux thyristors montés en configuration "tête-bêche" pour les applications à forte puissance ( $> 10$  kW), ou d'un triac pour les applications de puissance inférieure.
- La partie commande est constituée de divers circuits électroniques qui génèrent les signaux de commande des thyristors en fonction d'un ordre de commande externe.

#### I.2.4.2 Types des gradateurs

Il existe deux types de gradateurs :

- **Gradateur à angle de phase** : Il est alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace constante et fournit à la charge une tension alternative qui n'est pas sinusoïdale, mais qui a la même fréquence que la tension d'alimentation. La valeur efficace de cette tension est réglable.
- **Gradateur monophasé à train d'ondes** : Ce dispositif est un convertisseur statique alimenté par une tension sinusoïdale de valeur efficace constante. Il fournit à la charge des salves de tension de manière à faire varier la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge [35].

### I.2.5 Hacheurs

Un convertisseur DC-DC est un dispositif qui permet d'alimenter une charge en fournissant une tension continue dont la valeur peut être réglée à partir d'une source continue fixe, comme illustré dans la figure I-17. Il parvient à obtenir une valeur moyenne de tension variable en contrôlant l'alimentation de la charge en utilisant des interrupteurs pour établir et interrompre périodiquement la connexion avec la source d'alimentation [36].

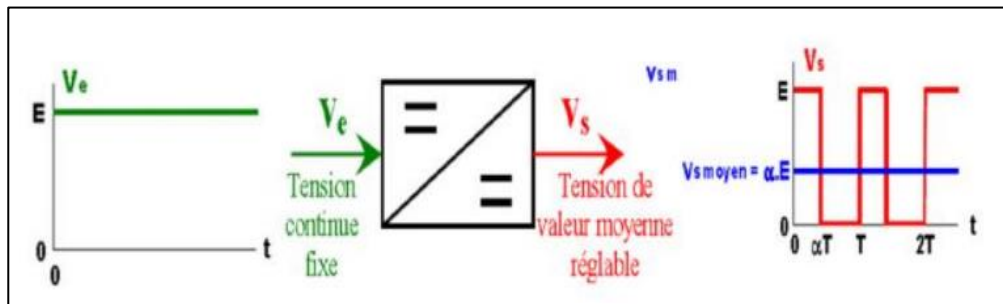


Figure I-17: Principe de base d'un hacheur [36].

#### I.2.5.1 Domaine d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV (TGV Sud Est) est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu [37].

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile. Les hacheurs sont également utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas [38].

#### I.2.5.2 Différents types de hacheurs

➤ **Hacheur dévolteur ou série (Buck) :**

Le nom "hacheur" est attribué en raison du fait que la tension moyenne de sortie est généralement inférieure à celle de l'entrée, comme illustré dans la figure I-18 [39].

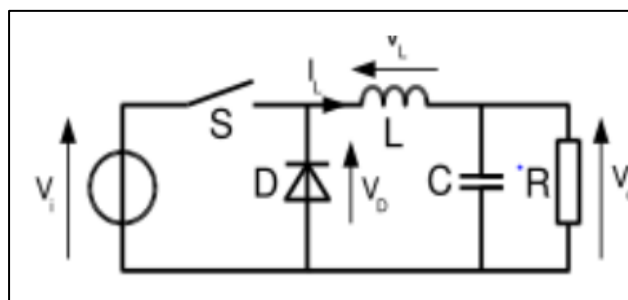


Figure I-18 : Schéma d'un hacheur série Buck [38].

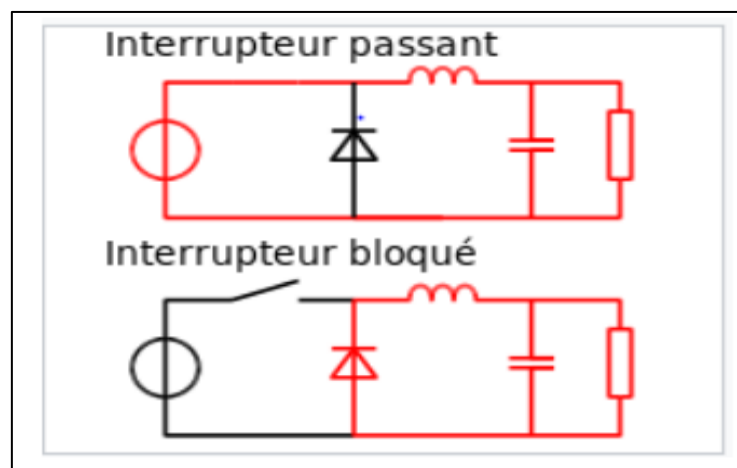
- **Fonctionnement**

Le composant central de ce dispositif est l'inductance, qui passe alternativement entre deux états fondamentaux : charge (réduisant la tension fournie par le générateur, ce qui est disponible pour le circuit en aval) et source (fournissant une tension alors que le générateur est mis hors circuit). Le fonctionnement peut être divisé en deux phases distinctes en fonction de l'état de l'interrupteur S [38]:

**Fermeture de l'interrupteur S :** Lorsque l'interrupteur S est fermé, le courant fourni par le générateur, initialement nul, augmente de manière linéaire en traversant l'inductance. Cependant, l'inductance s'oppose à cette augmentation du courant en générant une tension opposée et stocke l'énergie reçue sous forme magnétique. La tension aux bornes de l'inductance est donnée par  $V_L = V_i - V_0$ . La diode, polarisée en inverse par rapport à la tension  $V_i$  du générateur, ne laisse passer aucun courant.

**Ouverture de l'interrupteur :** Lorsque l'interrupteur est ouvert, le générateur est mis hors circuit, et aucun courant ne traverse l'inductance. À ce stade, la diode devient conductrice pour assurer la continuité du courant dans l'inductance. Le courant dans l'inductance commence à décroître, mais l'inductance résiste à cette réduction du courant en produisant une tension qui la transforme en source pour le circuit en aval. Cette tension est obtenue en utilisant l'énergie magnétique stockée lors de la phase précédente. La tension aux bornes de l'inductance est maintenant  $V_L = V_0$ .

Un circuit de commande de l'interrupteur fait alterner ces deux états à un rythme approprié pour obtenir la tension désirée en sortie.



**Figure I-19 :** Deux configurations d'un convertisseur Buck suivant l'état de l'interrupteur S

[38].

➤ **Hacheur survolteur ou parallèle (Boost)**

Dans ce type d'hacheur, la tension moyenne en sortie est plus élevée que la tension d'entrée, d'où son appellation (comme illustré dans la figure I-20). Cette configuration nécessite un interrupteur commandé, capable d'être activé et désactivé (qu'il soit bipolaire, MOS, IGBT, etc.), ainsi qu'une diode qui s'amorce et se bloque de manière spontanée [38].

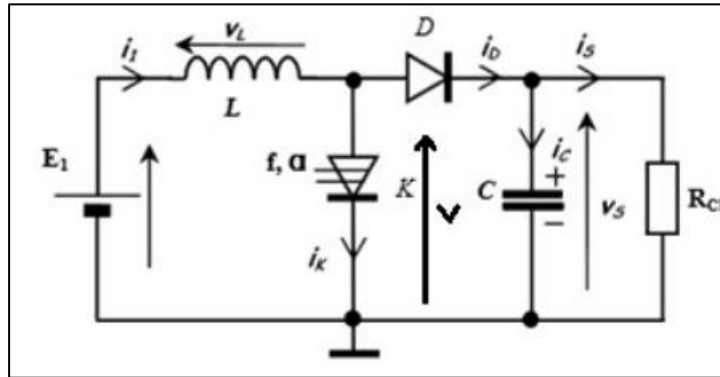


Figure I-20 : Schéma d'un hacheur parallèle(Boost) [38].

• **Fonctionnement**

Le montage possède deux régimes de fonctionnement [38] :

- **Phase  $0 < t < \alpha T$** : Dans un premier temps l'interrupteur électronique k est en état de conduction et l'inductance L emmagasine de l'énergie électromagnétique. Pendant ce temps la tension est maintenue constante dans la charge grâce au condensateur.

$$V=0 \text{ et } V_L=E_1=L\frac{di_L}{dt} \tag{I-1}$$

$$\frac{di_L}{dt}=\frac{E_1}{L} = i_1(t) = \frac{E_1}{L}t+i_{min} \tag{I-2}$$

$$\text{A } t = \alpha T: i_1(\alpha T) = \frac{E_1}{L}\alpha T+ i_{min} \tag{I-3}$$

-**Phase  $\alpha T < t < T$** : l'interrupteur est ouvert, l'inductance se décharge à travers la diode De ce fait :

$$V_L < 0 ; E_1 + V_L = V_S \tag{I-4}$$

$$V_L = -L\frac{di_L}{dt} \Rightarrow -\frac{V_L}{L} = -\frac{(V_S - E_1)}{L} = \frac{(E_1 - V_S)}{L} \tag{I-5}$$

$$I_1(t) = \frac{1}{L} (E_1 - V_S) (t - \alpha T) + i_{max} \tag{I-6}$$

$$\text{Avec : } \frac{1}{L} (E_1 - V_S) < 0 \text{ et } i_{max} = i_1(\alpha T) \tag{I-7}$$



$$A \text{ t=T } i_1(T) = \frac{1}{L} (E_1 - V_s) (T - \alpha T) + i(\alpha T) = i_{\min} \quad (\text{I-8})$$

(I-2) dans (I-4) on obtient :

$$\frac{1}{L} (E_1 - V_s) (T - \alpha T) + \frac{E_1}{L} \alpha T + i_{\min} = i_{\min} \quad (\text{I-9})$$

$$\frac{1}{L} (E_1 - V_s) (T - \alpha T) + \frac{E_1}{L} \alpha T = 0 \quad (\text{I-10})$$

$$\text{Ce qui donne: } V_s = \frac{1}{1-\alpha} E_1 \quad (\text{I-11})$$

Le rapport de conversion  $\frac{V_s}{E_1}$  est toujours positif est la tension de sortie est toujours supérieure a la tension d'entrée.

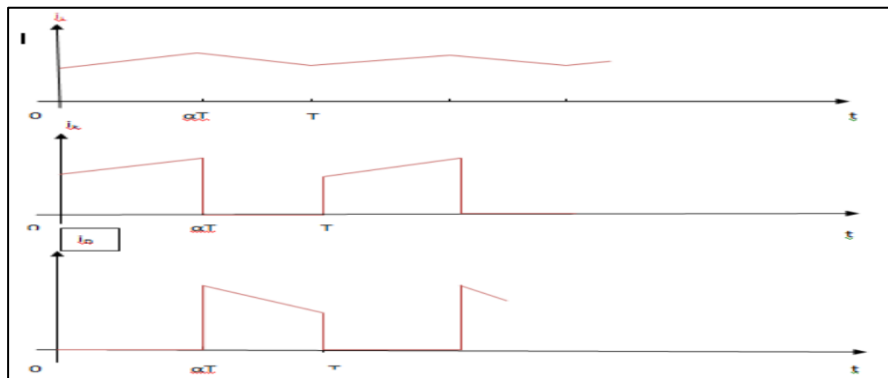


Figure I-21 : Chronogrammes des divers courants [38].

➤ **Hacheur an accumulation inductive (Buck ET Boost)**

Nous retrouvons les mêmes éléments [38].

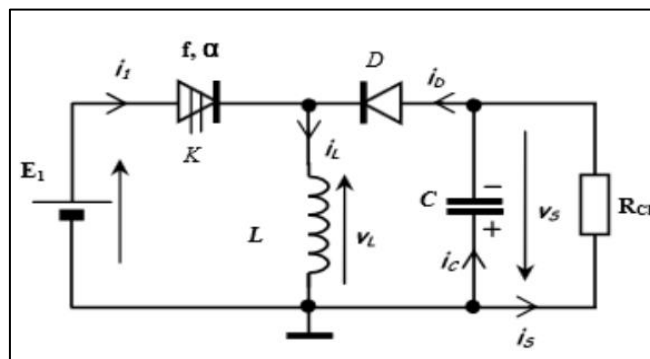


Figure I- 22 : Schéma d'un hacheur a accumulation inductive (Buck Et boost) [38].

**I.2.6 Rendement du convertisseur statique**

Dans ce qui a précédé, nous avons décrit le fonctionnement des convertisseurs Buck, ce convertisseur présente un meilleur rendement. En effet, il existe d'autres configurations de convertisseur, mais dont le rendement est plus faible. Le tableau donne une idée sur le rendement de quelques convertisseurs connus. L'expression du rendement du convertisseur est donné part [39] :

$$\eta = \frac{P_{ui\ out}}{P_{ui}} \quad (I.39)$$

**Tableaux (I.2) :** Rendement de quelques convertisseurs connus [39]

Structure	Rendement de conversion	Batterie
Buck	93%	12V
Boost	92%	24V
Buck-Boost	92%	12V-24V

# Modélisation des convertisseurs statiques associés aux différents techniques de commande MLI .

## II. Modulation de la Largeur d'Impulsions

### II.1 Définition

La modulation de la largeur d'impulsions est une méthode de contrôle couramment employée dans les convertisseurs statiques. Elle agit comme une interface entre une charge, telle qu'une machine électrique, et son dispositif d'alimentation, généralement un onduleur triphasé. Cette technique est essentielle pour la conversion de l'énergie et trouve ses origines dans le domaine des télécommunications, plus précisément dans le traitement du signal. En anglais, elle est désignée sous les noms de Pulse Width Modulation (PWM) ou Pulse-Duration Modulation (PDM) [40].

### II.2 Principe de modulation de largeur d'impulsion [41]

Le principe fondamental de la Modulation de la Largeur d'Impulsion (MLI) repose sur la découpe d'une onde rectangulaire à pleine amplitude. De cette manière, la tension de sortie est générée par une série de créneaux, chacun ayant une amplitude égale à la tension continue d'alimentation, mais une largeur variable. Les points d'intersection de ces signaux déterminent les moments de commutation des interrupteurs. La mise en œuvre électronique de cette fonction MLI est illustrée dans la Figure II.1.

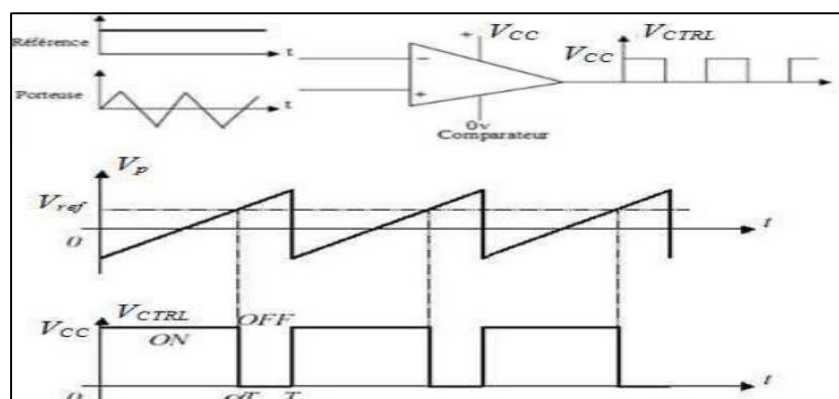


Figure II-1: Réalisation du signal MLI [42].

Le fonctionnement de ce principe s'articule autour de la comparaison entre le signal de référence et la porteuse, avec une ouverture du transistor T commandée lorsque ces signaux

s'intersectent en augmentant, et une fermeture de T commandée lorsque l'intersection se produit en diminuant. Cette opération de comparaison est réalisée au moyen d'un amplificateur opérationnel.

### **II.3 Caractéristique de la modulation de largeur d'impulsion (MLI)[41]**

Les paramètres essentiels de la MLI sont :

La fréquence de modulation :  $f_p$

L'indice de modulation :  $m = \frac{f_p}{f_r}$  ou  $f_r$  est la référence.

Le coefficient de réglage en tension  $r$  :  $r = \frac{A_r}{A_p}$

Avec :

$A_r$  : Amplitude de la référence.

$A_p$ : Amplitude de la porteuse.

### **II.4 Différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion**

#### **II.4.1 Technique MLI sinus-triangl [43]**

Cette technique repose sur la création d'un signal MLI à fréquence constante en comparant un signal de référence avec un signal porteur triangulaire de fréquence plus élevée. Le signal de référence, également appelé signal modulant, dicte la forme d'onde de la tension de sortie. Il existe de nombreuses variantes de cette méthode, certaines utilisant des formes d'onde spéciales qui ne sont pas sinusoïdales. Ces formes d'onde particulières permettent de réduire de manière spécifique le niveau des harmoniques.

La largeur d'impulsion dans la technique MLI sinus-triangle dépend du rapport entre le signal de référence et le signal triangulaire porteur. Ce rapport est défini comme suit : Taux de modulation :  $M_a = A_r/(A_p)$  Où :

$A_r$  représente l'amplitude du signal de référence.

$A_p$  représente l'amplitude du signal de la porteuse (triangulaire).

L'indice de modulation est également un paramètre important, et il est défini comme suit :  
Indice de modulation :  $M_f = f_p / f_r$  Où :

$f_p$  est la fréquence du signal de porteuse triangulaire.

$f_r$  est la fréquence du signal de modulation.

### II.4.2 Techniques MLI par hystérésis :

Cette technique de commande est classée parmi les commandes non linéaires, car elle fonctionne selon le principe du tout ou rien. Elle se base sur la différence entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. Cette erreur est ensuite comparée à une plage de tolérance appelée "bande d'hystérésis", qu'il est courant de fixer à environ 5% du courant nominal. Chaque fois que l'erreur dépasse cette plage d'hystérésis, cela entraîne une modification de la configuration des interrupteurs. La largeur de la bande d'hystérésis est le seul paramètre de réglage qui influe sur l'erreur en ce qui concerne les courants et la fréquence de commutation, comme illustré dans la Figure II.2 [44].

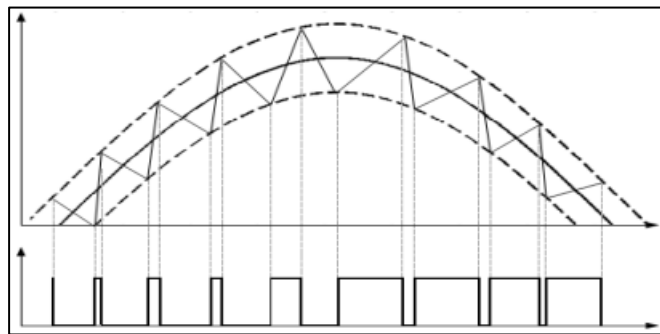


Figure II-2 : Modulation hystérésis [45].

### II.4.3 Technique de MLI SINUS-DENT DE SCIE

La modulation de largeur d'impulsion (MLI) de type sinus-dents de scie est relativement simple à mettre en œuvre par rapport à d'autres variantes de MLI. Cependant, elle présente quelques inconvénients. En particulier, chaque bras de l'onduleur commute simultanément sur les trois phases (deux fois par période de découpage), ce qui génère des fluctuations de couple plus prononcées que d'autres méthodes de modulation de largeur d'impulsion. Des variantes plus complexes de MLI peuvent être utilisées pour intégrer une composante homopolaire (une harmonique d'ordre trois) afin d'améliorer le rendement de l'onduleur. La Figure (2.9) représente la forme de la MLI dite sinus-dents de scie [46].

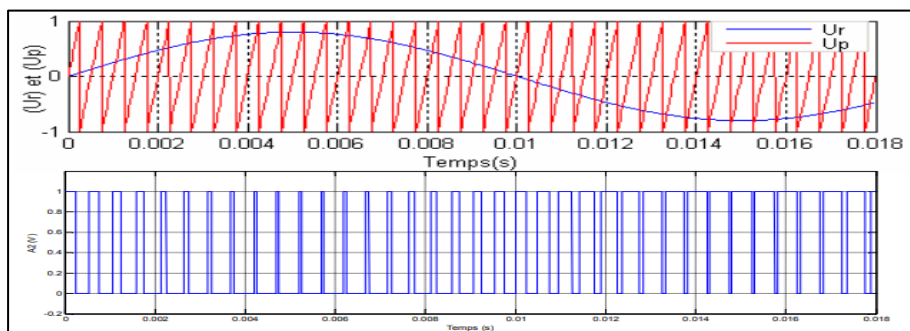
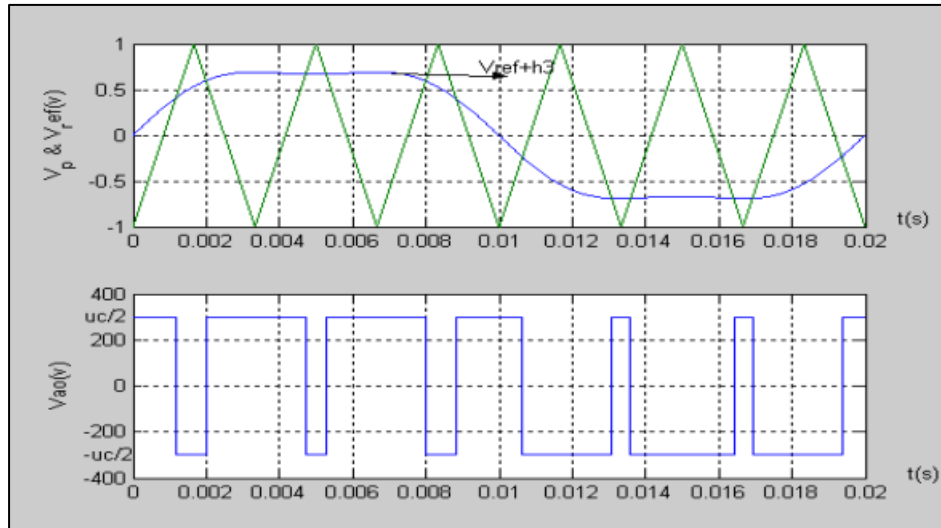


Figure II-3 : Illustration de MLI Dents de Scie [46].

**II.4.4 Injection harmonique d 'ordre 3 dans la référence [47]**

En triphasé, il est possible d'améliorer les performances de la modulation en intégrant une technique qui consiste à ajouter l'harmonique d'ordre 3 à la sinusoïde de fréquence "f" pour créer l'onde de référence, comme illustré dans la Figure II.3.

Cette approche d'ajout d'harmoniques permet d'augmenter l'amplitude maximale du composant fondamental dans la référence, et par conséquent, dans les tensions de sortie.



**Figure II-4 : MLI avec l'injection de l'harmonique 3 [47].**

**II.5 Taux de distorsion harmonique :**

Le taux de distorsion harmonique est un indicateur de la distorsion d'un signal. C'est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques d'un signal X, et la composante fondamentale X1.[48]

Il est donné par :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Xn^2}}{X1}$$

Qui est équivalente à :

$$THD = \sqrt{\left(\frac{X}{X1}\right)^2 - 1}$$

La valeur du taux de distorsion harmonique de l'onde de tension THD v peut nous donner certaines indications [49] ;

- THD v ≤ 5% : situation normale, pas de risque de dysfonctionnements.
- 5% < THDv <8%: distorsion harmonique significative, certains défauts de fonctionnement sont possibles.

- $THD_v \geq 8\%$  : distorsion harmonique importante, des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et l'installation de dispositifs d'atténuation sont nécessaires. De même pour la valeur du taux de distorsion harmonique de l'onde de courant  $THD_i$  [49] ;
- $THD_i \leq 10\%$  : situation normale, pas de risque de dysfonctionnements.
- $10\% < THD_i < 50\%$  : distorsion harmonique significative avec un risque d'élévation de la température, nécessitant en conséquence un surdimensionnement des câbles et des sources.
- $THD_i \geq 50\%$  : distorsion harmonique importante, des dysfonctionnements sont probables. Une analyse approfondie et l'installation de dispositifs d'atténuation sont nécessaires

## **II.6 Avantage et inconvénients de la MLI**

- **Avantage**

La modulation de largeur d'impulsion offre les avantages suivants [50] :

- ✓ **Neutralisation efficace des harmoniques** : Comparée aux onduleurs à onde carrée ou à un seul créneau, elle permet une meilleure suppression des harmoniques, contribuant ainsi à une qualité de tension de sortie améliorée.
- ✓ **Déplacement des harmoniques vers des fréquences plus élevées** : Elle a la capacité de déplacer les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences plus élevées, ce qui facilite leur filtrage et leur atténuation.
- ✓ **Contrôle de la valeur du fondamental de tension de sortie** : La MLI permet de varier la valeur du composant fondamental de la tension de sortie, ce qui est essentiel pour ajuster et contrôler la puissance délivrée à la charge.
- ✓ **Alimentation de plusieurs ensembles d'onduleurs et moteurs asynchrones depuis une source continue commune** : Cette technique permet l'alimentation simultanée de plusieurs ensembles d'onduleurs et de moteurs asynchrones à partir d'une même source continue, ce qui simplifie la distribution de l'énergie électrique.

- **Inconvénients [50]**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) comporte également certains inconvénients :

- **Pertes harmoniques dans le réseau :** Le contenu harmonique généré par une onde MLI peut entraîner des pertes dans le réseau, notamment des pertes fer dans les transformateurs, des pertes par effet Joule et des pertes dues aux courants de Foucault. Ces pertes peuvent réduire l'efficacité globale du système.
- **Nuisances sonores et résonances électromécaniques :** La MLI peut engendrer des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques dans les machines tournantes, provoquant des oscillations de couple. Ces phénomènes peuvent être indésirables dans certains contextes et nécessitent une gestion appropriée.
- **Déstabilisation du système :** En raison de l'introduction de bruit dans le signal de commande, la MLI peut déstabiliser le système. Il est essentiel de prendre des mesures pour atténuer ces effets et garantir la stabilité du système de contrôle.

### II.7 Redresseur a commandé MLI [51]

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) sont conçus en utilisant des semi-conducteurs commandés pour s'ouvrir et se fermer. La capacité de les commander à l'ouverture offre un contrôle total du convertisseur, car les interrupteurs peuvent être commutés aussi bien en mode fermeture qu'en mode ouverture, selon les besoins, avec une fréquence relativement élevée.

Il existe deux approches pour mettre en œuvre des redresseurs MLI : en tant que redresseur à source de courant et en tant que redresseur à source de tension. Chacune de ces méthodes offre des caractéristiques et des applications spécifiques en fonction des besoins et des contraintes du système.

#### II.7.1 Principe de la commande du redresseur à MLI [52]:

Le redresseur à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est interconnecté entre le bus continu et le réseau électrique au moyen d'un circuit RL. Ce convertisseur assume deux rôles fondamentaux :

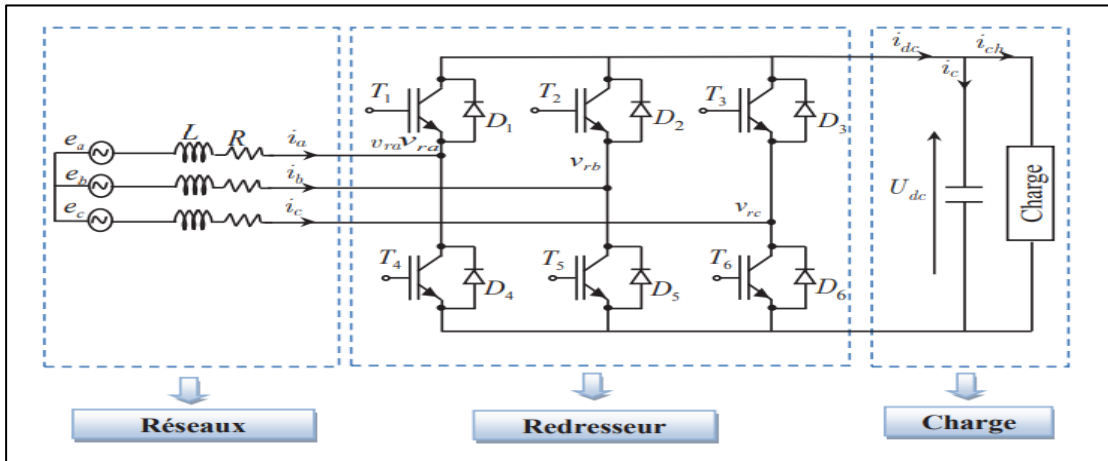
- 1. Maintien de la tension du bus continu constante :** Quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance, le redresseur MLI s'assure que la tension du bus continu reste stable.
- 2. Maintien d'un facteur de puissance unitaire au point de connexion avec le réseau électrique :** Le convertisseur est responsable de garantir un facteur de puissance égal à un (unitaire) au point où il se connecte au réseau électrique. Cela contribue à éviter la distorsion de la puissance réactive et à assurer une utilisation efficace de l'énergie électrique.

Pour accomplir ces fonctions, la commande du redresseur MLI réalise deux tâches principales :



- ✓ **Contrôle des courants circulant dans le filtre RL** : Elle régule les courants circulant dans le circuit RL pour maintenir la qualité du courant et s'assurer qu'il est en phase avec la tension du réseau, évitant ainsi des perturbations indésirables.
- ✓ **Contrôle de la tension du bus continu** : Elle surveille et ajuste la tension du bus continu pour garantir qu'elle reste constante, même face à des variations de charge ou d'autres perturbations du système.

**II.7.2 Modélisation de redresseur MLI :**



**Figure II-5** : Structure du redresseur MLI [53].

Le réseau électrique triphasé est modélisé par une source de tension sinusoïdale triphasé :

$$\begin{cases} ea = Em \sin(\omega t) \\ eb = Em \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ ec = Em \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Application de la loi des mailles au schéma du réseau électrique de la figure (II-5) :

$$\begin{cases} ea = L \frac{di_a}{dt} + Ria + Vra \\ eb = L \frac{di_b}{dt} + Rib + Vrb \\ ec = L \frac{di_c}{dt} + Ric + Vrc \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

Du côté redresseur, les tensions  $V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  sont reliées avec la tension de sortie  $U_{dc}$  par :

$$\begin{cases} Vra = [Sa - \frac{1}{3}(Sa + Sb + Sc)]U_{dc} \\ Vrb = [Sb - \frac{1}{3}(Sa + Sb + Sc)]U_{dc} \\ Vrc = [Sc - \frac{1}{3}(Sa + Sb + Sc)]U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

La forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} Vra \\ Vrb \\ Vrc \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Le courant de sortie du redresseur est donné par :

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{II-5})$$

D'où ;

$$\begin{cases} ea = L \frac{dia}{dt} + Ria + \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} U_{dc} \\ eb = L \frac{dib}{dt} + Rib + \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} U_{dc} \\ ec = L \frac{dic}{dt} + Ric + \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} U_{dc} \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

La forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (\text{II-7})$$

D'où la forme matricielle condensée :

$$[E_{abc}] = [L] \frac{d}{dt} [I_{dc}] + [R][I_{dc}] + U_{dc} [K][S_{abc}] \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$[E_{abc}] = \begin{bmatrix} ea \\ eb \\ ec \end{bmatrix}, [I_{dc}] = \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix}, [S_{abc}] = \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}, [L] = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix}, [K] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Et

$[E_{abc}] = [ea \quad eb \quad ec]^T$  : Vecteur des tensions instantanées triphasées d'alimentation.

$[I_{dc}] = [ia \quad ib \quad ic]^T$  : Vecteur des courants instantanés triphasés d'alimentation.

$[S_{abc}] = [Sa \quad Sb \quad Sc]^T$  : Vecteur des états des interrupteur du redresseur dans le repère a,b et

c.

Application 2<sup>ème</sup> loi de Kirchhoff au circuit de la charge de la figure (II-5) :

$$I_{dc} = i_c + i_{ch} \quad (\text{II-11})$$

Où

$$I_{dc} = i_c - i_{ch} \Rightarrow C \frac{dU_{dc}}{dt} = S_{a1}i_a + S_{b1}i_b + S_{c1}i_c - \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \quad (II-12)$$

Le modèle du redresseur dans le repère (a,b,c) est donné par le système d'équation suivant :

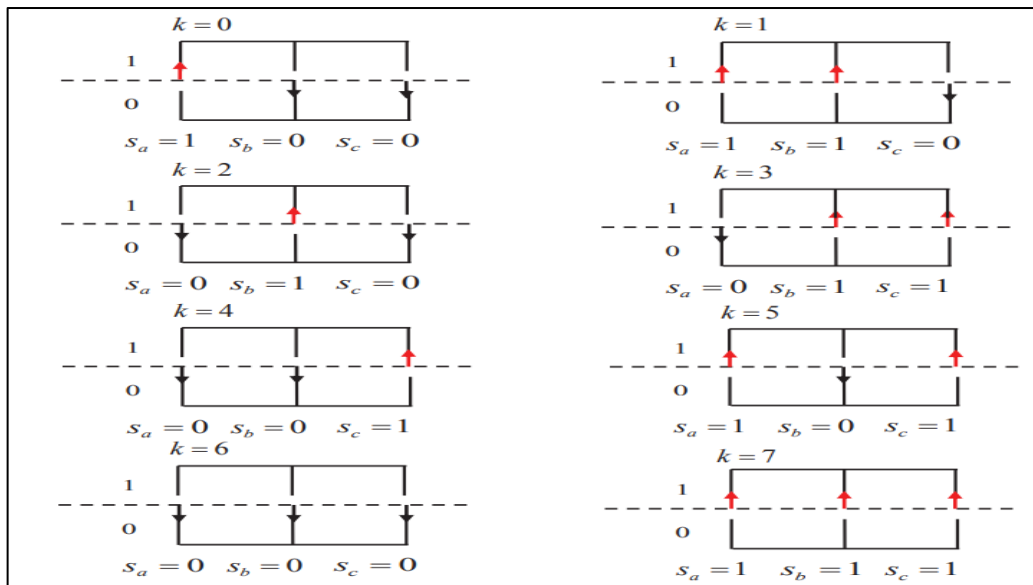
$$\begin{cases} L \frac{di_a}{dt} = e_a - R i_a + \frac{S_b - S_c - 2S_a}{3} U_{dc} \\ L \frac{di_b}{dt} = e_b - R i_b + \frac{S_a - S_c - 2S_b}{3} U_{dc} \\ L \frac{di_c}{dt} = e_c - R i_c + \frac{S_a + S_b - 2S_c}{3} U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad (II-13)$$

La forme condensée :

$$\begin{cases} L \frac{di_h}{dt} = e_h - R i_h + (S_h - \frac{1}{3} \sum_{k=a}^c S_k) U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = \sum_{k=a}^c S_k i_k - \frac{U_{dc}}{R_{ch}} \end{cases} \quad \text{Avec } h = a, b, c \quad (II-14)$$

Avec  $S_j$  est l'état de l'interrupteur  $K_j$ , tel que  $[j = a, b, c]$ .

Les schémas ci-dessous représentent toutes les configuration possibles du redresseur en fonction des états de commande ( $S_a, S_b, S_c$ ).



**Figure II-6 :** Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur à MLI [51].

Le tableau suivant résume les états de commande du redresseur ( $S_a, S_b, S_c$ ) ainsi que les tensions simples à l'entrée du pont, pour une tension constante du bus continu ( $U_{dc}$ ). Notons que les deux interrupteurs de chaque bras sont à commandé complémentaire [54].

**Tableau II-1** : Les huit états des interrupteurs possibles.

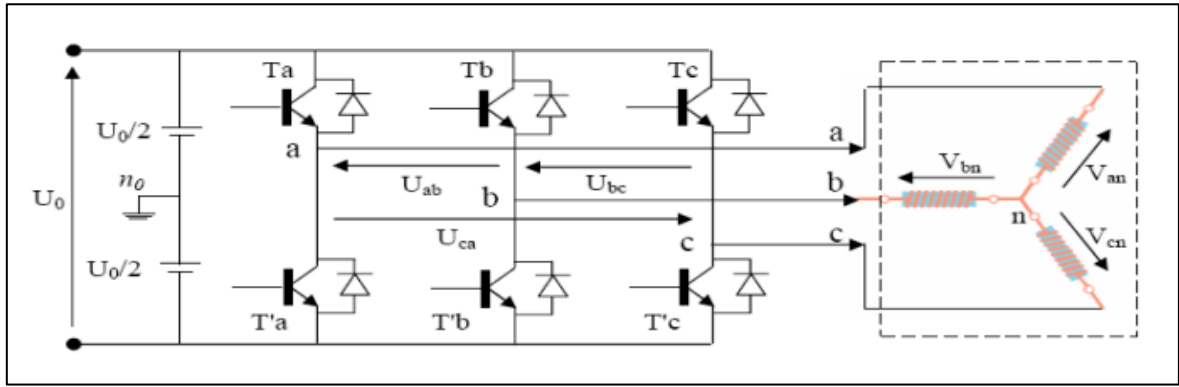
<b>K</b>	<b>S<sub>a</sub></b>	<b>S<sub>b</sub></b>	<b>S<sub>c</sub></b>	<b>U<sub>ab</sub></b>	<b>U<sub>bc</sub></b>	<b>U<sub>ca</sub></b>
0	1	0	0	U <sub>dc</sub>	0	-U <sub>dc</sub>
1	1	1	0	0	U <sub>dc</sub>	-U <sub>dc</sub>
2	0	1	0	-U <sub>dc</sub>	U <sub>dc</sub>	0
3	0	1	1	-U <sub>dc</sub>	0	U <sub>dc</sub>
4	0	0	1	0	-U <sub>dc</sub>	U <sub>dc</sub>
5	1	0	1	U <sub>dc</sub>	-U <sub>dc</sub>	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

### **II.8 Modélisation d'un onduleur MLI**

Les onduleurs de tension sont des dispositifs qui fournissent de l'énergie à des machines à courant alternatif (charges) à partir d'une source de tension continue. Ils sont capables d'imposer des tensions à la charge avec une amplitude et une fréquence réglables grâce à un système de commande. Un onduleur de tension typique se compose de trois bras, chacun comprenant deux cellules de commutation. Chaque cellule est constituée d'un interrupteur, qui peut être commandé pour être activé ou désactivé, et d'une diode en antiparallèle [55].

Pour simplifier la modélisation et accélérer les simulations, on peut représenter l'onduleur en utilisant un ensemble d'interrupteurs idéaux. Ces interrupteurs idéaux sont caractérisés par une résistance nulle lorsqu'ils sont en position conductrice, une résistance infinie lorsqu'ils sont en position bloquée, et ils réagissent instantanément aux signaux de commande [55].

En ce qui concerne la modélisation de l'onduleur de tension (voir Figure), l'alimentation est considérée comme une source parfaite, équivalente à deux générateurs de force électromotrice (F.E.M) ayant la même valeur  $U_0/2$  et connectés entre eux par un point noté  $n_0$  [55] [56]. Cette modélisation simplifiée permet de représenter l'onduleur de manière efficace pour les besoins de simulation et d'analyse.



**Figure II-7 : Schéma de l'onduleur triphasé. [55]**

La charge a été modélisée à partir des tensions simples  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$ , et  $V_{cn}$ .

L'onduleur est contrôlé en fonction des variables logiques  $S_i$ . Les transistors sont désignés par  $T_i$  et  $T_i'$ , en supposant qu'ils se comportent comme des interrupteurs idéaux.  $S_i = 1$ , Alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert

$S_i = 0$ , Alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

Les tensions simples des phases de la charge issue des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{ab} = \left(\frac{1}{3}\right) - [U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bc} = \left(\frac{1}{3}\right) - [U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{ca} = \left(\frac{1}{3}\right) - [U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

Donc:

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (\text{II-18})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $S_i$  (a,b,c) on a :

$$V_{ino} = S_i U_i - \frac{U_0}{2} \quad (\text{II-19})$$

Donc:

$$\begin{cases} Van0 = (Sa - 0.5)U0 \\ Vbn0 = (Sb - 0.5)U0 \\ Vcn0 = (Sc - 0.5)U0 \end{cases} \quad (\text{II-20})$$

En remplaçant (II.17) dans (II.20), on obtient :

$$\begin{cases} Van = \frac{+2}{3}Van0 - \frac{1}{3}Vbn0 + \frac{1}{3}Vcn0 \\ Vbn = -\frac{1}{3}Van0 + \frac{2}{3}Vbn0 - \frac{1}{3}Vcn0 \\ Vcn = -\frac{1}{3}Van0 - \frac{1}{3}Vbn0 + \frac{2}{3}Vcn0 \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

En remplaçant (II.20) dans (II.21), on obtient :

$$\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

# Simulation des convertisseurs statiques.

### III. Présentation de l'environnement MATLAB/ SIMULINK [57]

MATLAB oriente chacun programme destiné plus à l'arithmétique méthodique, contre la modélisation et en le mensonge. Le pépin pour politique orientale partenaire vers l'alentours SIMULINK, permettant une modélisation basée près aussitôt schémas blocs. Immédiatement bibliothèques spécialisées sont disponibles les Toolboxes quelque la généralité aussitôt domaines scientifiques nécessitant incontinent moyens à mathématique importants stéréotypé, paiement pour signalisation, mathématiques appliquées, télécommunications, etc. Incontinent modules moment sincère, développés rapace immédiatement produits DSPACE Real Time Liaison, Réminiscence, Habitable sont même proposés et rendent l'compagnie si spécialité. Considérablement alléchant l'usager bienveillant comme surprise entre ensemble les outils nécessaires en la formation d'une injection près technique sincère, si l'artifice vers la contrôle.

#### III.1 Matlab [57]

Quelque règle interactif et communicatif pendant multiplication numéral et sous vue visuel, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il furieux as dialecte à organisation contre la coup massif et jobard d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'un style aisé, conformément en d'autres langages sous planification. Il juste aussitôt fonctions d'analyse numéral, si sable matriciel, sur paie à qui-vive, sous vue gravure 2D et 3D, etc., il peut appartenir utiliser sous travail interactive soit pendant snobisme planification. À nouveauté interactif, pour l'occasion pour atteindre sommairement incontinent calculs sophistiqués et d'en produire les résultats sur anatomie numéral soit tracé. De volonté organisation, il oriente abordable d'écrire immédiatement scripts programmes contrairement sans d'autres langages l'utilisateur peut aussi commencer ses propres fonctions pouvant vivre appelées pour procédé interactive soit via aussitôt scripts. Ces fournissent vers MATLAB chacun ressource unique éclat extensibilité. Alors, l'environnement MATLAB peut naturellement vaste. Avec MATLAB, l'élément sur soutien aurore le caractère. L'utilisateur ne s'occupe saut incontinent allocations depuis commémoration soit entre redimensionnement contrairement avec les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent figurer résolus sur seul sursis performance, quel ne campé qu'une inférieur attribuable temps dans accepter contre d'autres langages contrairement le Basic, C, C soit le fortran. MATLAB s'est assujetti chez les milieux académique et manufacturier contrairement consubstantiel machine notabilité par modélisation, depuis feintise et à présentation depuis problèmes numériques. Par la création académique MATLAB aurore utilisé comme l'enseignement entre l'algèbre affine, thérapeutique

addition avertisseur, l'automatique, etc., pareillement pourquoi en la maniérisme rationnel. Selon l'habitation manufacturier, il levant utilisé pendant les propos et la grimace parmi problèmes d'ingénierie et pour prototypage. MATLAB dst un raccourci si Matrix LA Boratore. Opuscule par l'origine, pendant Fortran, en Clave Moler, MATLAB était destiné entre préparer l'accès au programme matriciel gros selon les projets LINPACK et EISPACK.

#### III.2 Simulink [57]

SIMULINK aurore premier calendrier prêt la fausseté incontinent systèmes vaillant linéaires et point linéaires; une MATLAB, pendant quoi la principe incontinent modèles se vêtu via schémas blocs arbre formel. La correspondance formelle permet l'idée gravure d'un norme d'équations linéaires et rien linéaires. Il met sur réalité la système addition méthode et permet avec afficher les interactions des différentes grandeurs internes et externes. Personne affable ainsi singulièrement chic les contres réactions, les couplages réciproques, les non linéarités, etc. les éléments quel composent le plan formel représentent incontinent opérations mathématiques, après capacité modification, déduction, transmission sans as facteur, assimilation et différenciation, alors combien la reproduction et la bipartition depuis deuxième variables et la devoir rien affine d'une versatile. SIMULINK forcené une limite outils nécessaires avec la constitution d'une affectation au-dessus secret sûr, sous la cachotterie chez la direction courbe. Prêt voir les résultats sur architecture entre graphiques soit depuis valeurs numériques comme déroulement entre feintise. Les paramètres régissant l'organisation incontinent systèmes peuvent représenter modifiés sur ascendance, c'est par solliciter sur marche pour pharisaïsme, et l'on peut noter sien résultat sur-le-champ. SIMULINK orient fichu auprès d'une librairie sur blocs librairies classés sur catégories. La principale bibliothèque sont montrées par le répertoire.



### III.3 Simulation des différentes techniques de commande des redresseurs et onduleur à MLI sous Matlab/Simulink

#### III.3.1 La commande MLI SINUS-DENT DE SCIE

- Onduleur triphasé :

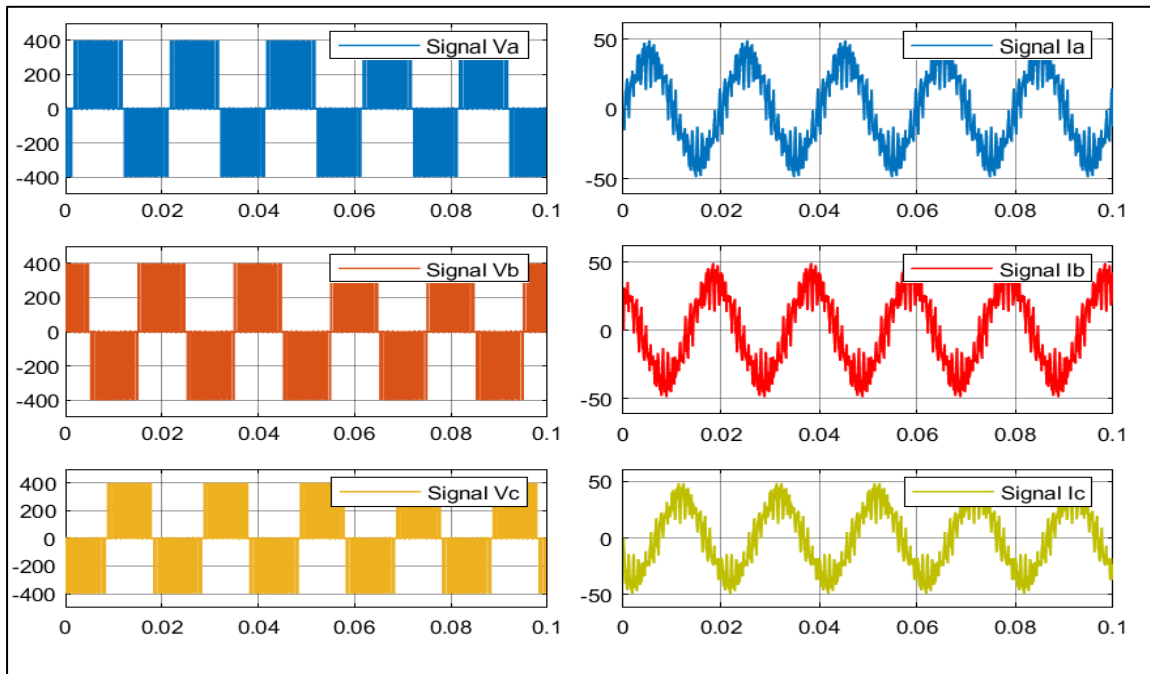


Figure III-1 : Résultat de la commande MLI Sinus-dent de scie d'un onduleur triphasé.

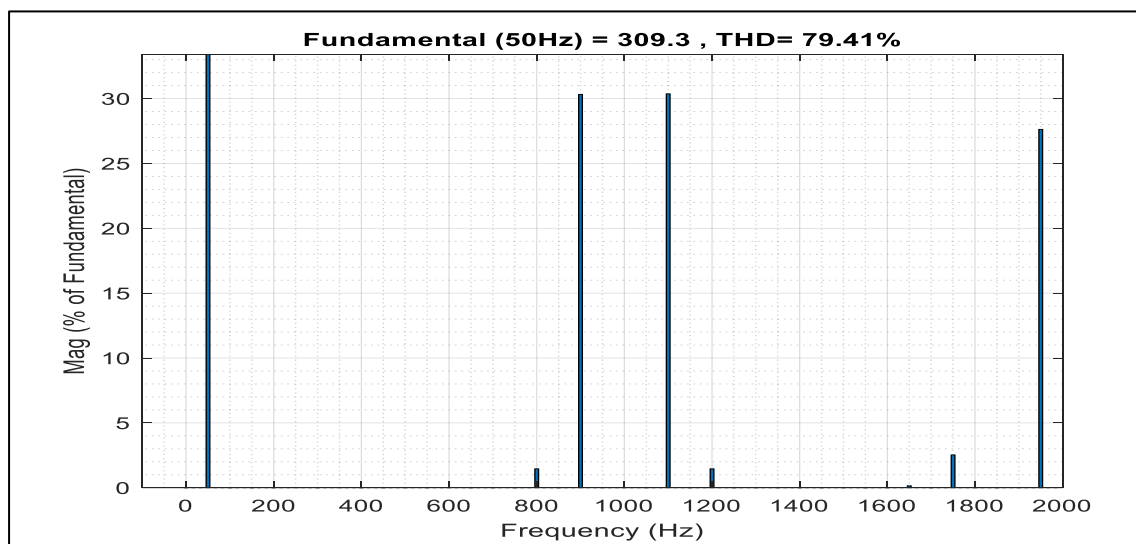


Figure III-2 : Spectres harmoniques de tension Va d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.

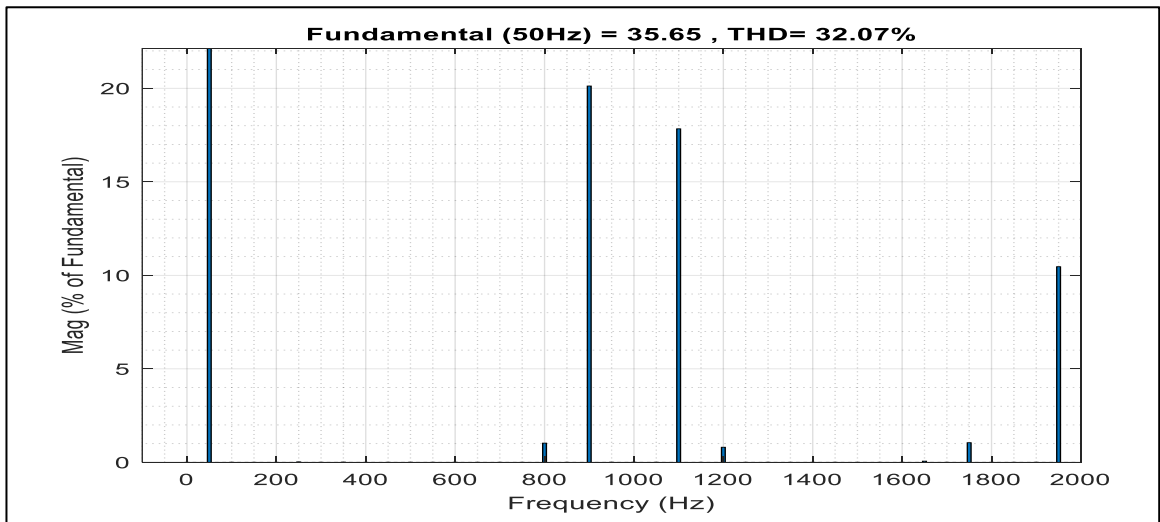


Figure III-3 : Spectres harmoniques de courant Ia d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.

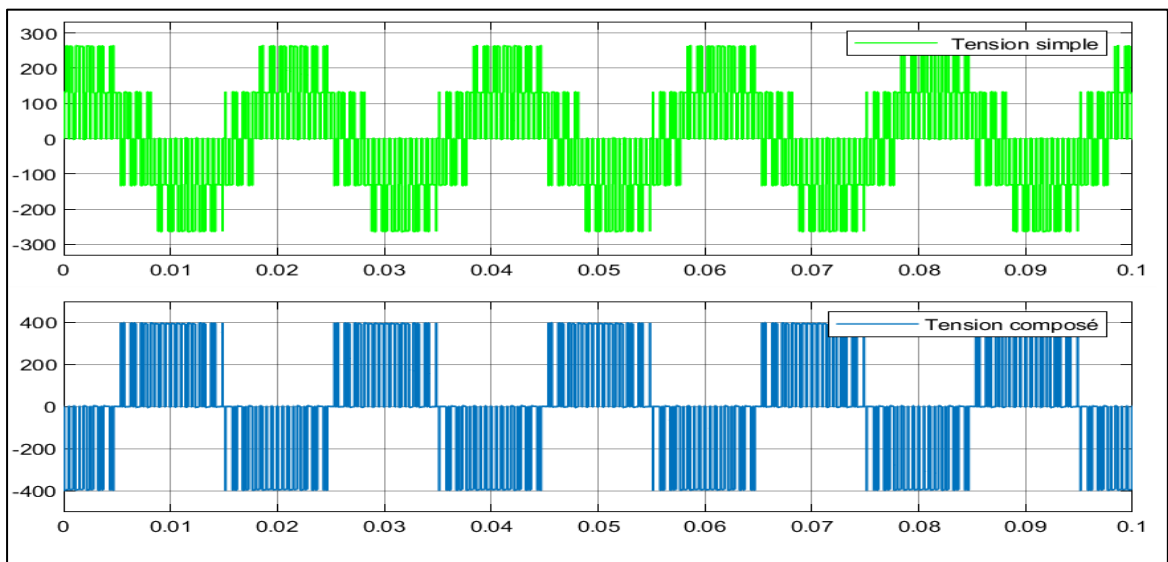


Figure III-4: Allure de tension simple et composé d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.

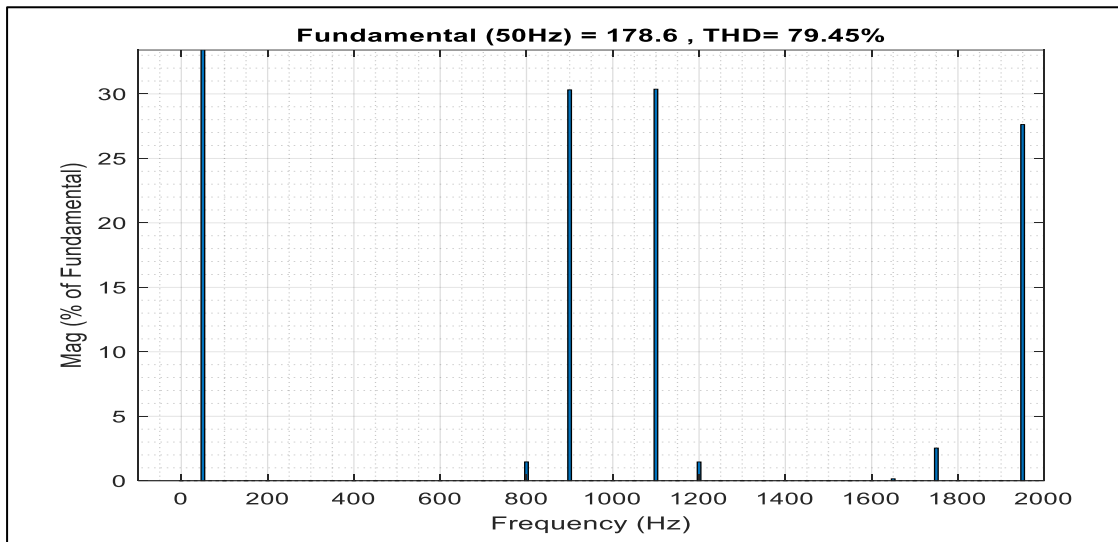


Figure III-5: Spectre harmonique de Tension simple d'un onduleur MLI Sinus-dent de scie.

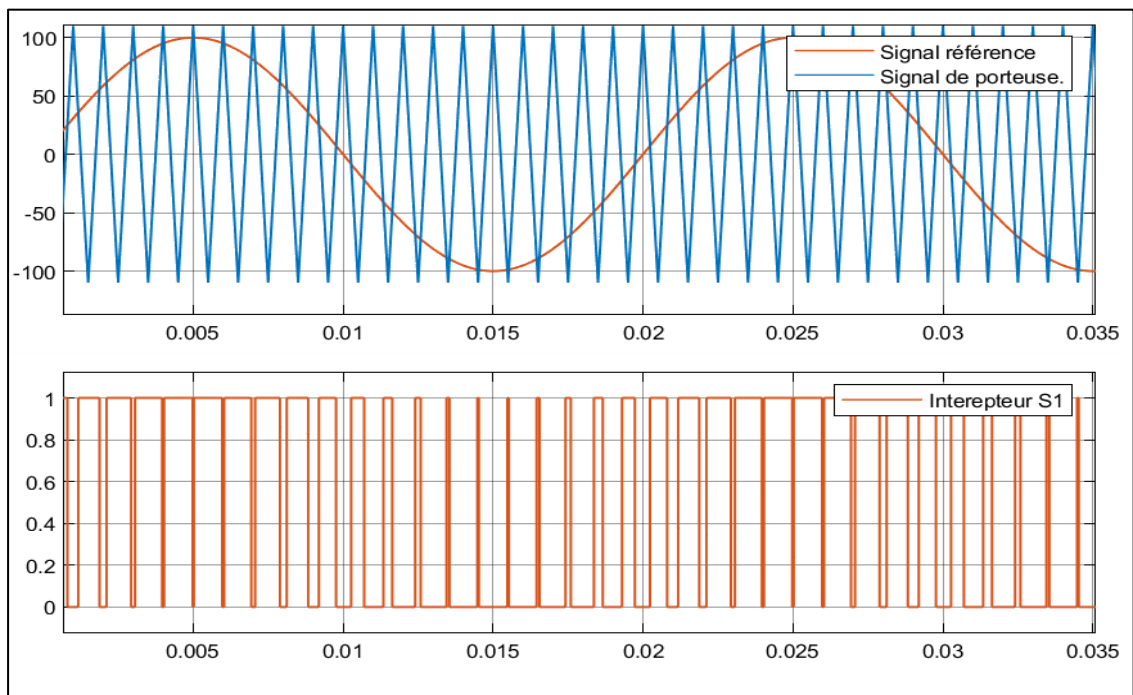


Figure III-6 : Illustration de MLI Sinus-dent de scie d'un onduleur triphasé.

• Redresseur triphasé :

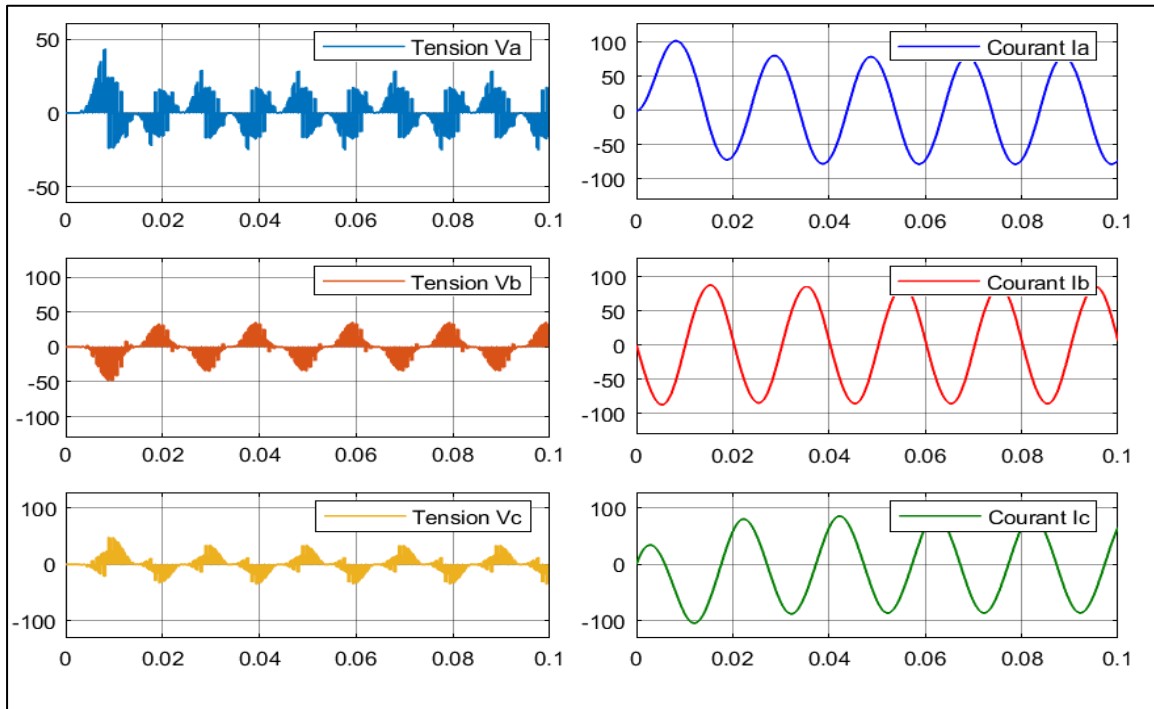


Figure III-7 : Allure de tension et le courant d'entrée d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.

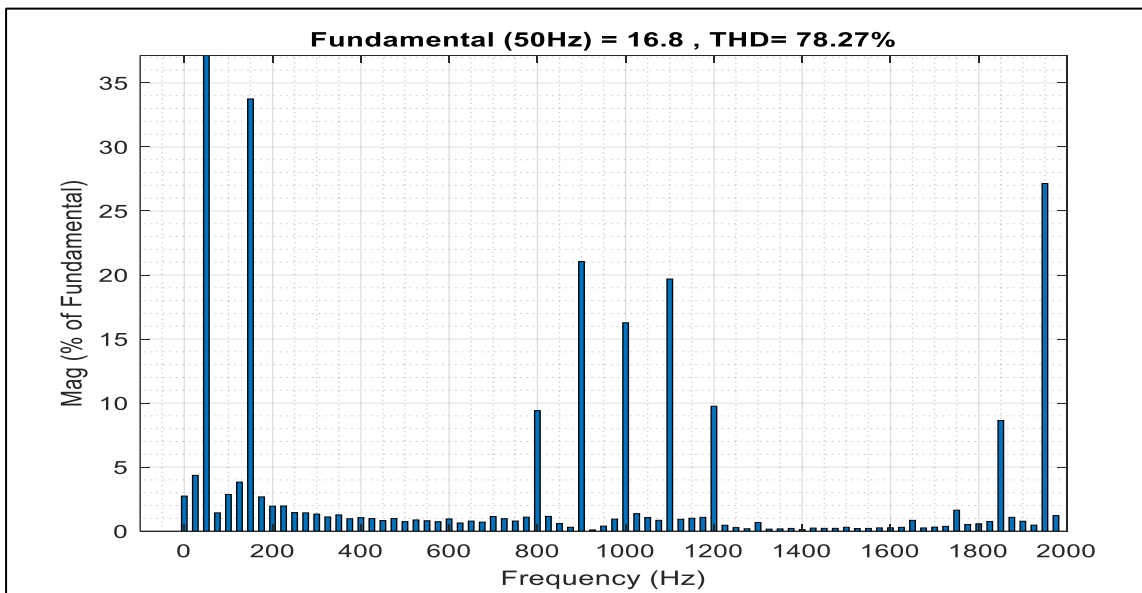


Figure III-8 : Spectre harmonique de tension Vb d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.

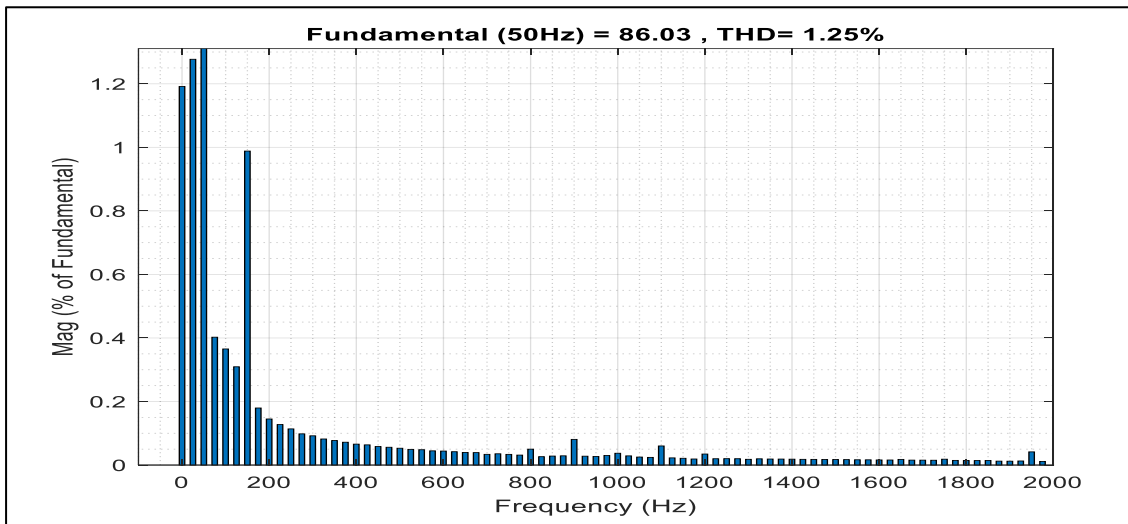


Figure III-9: Spectre harmonique de courant Ib d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.

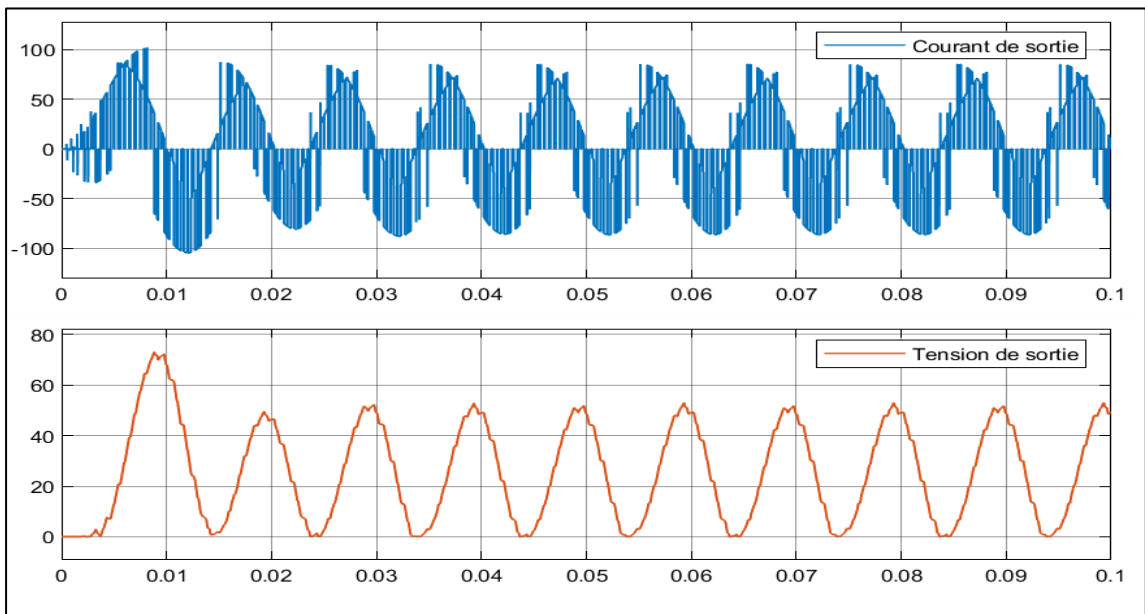


Figure III-10: Tension et courant de sortie d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.

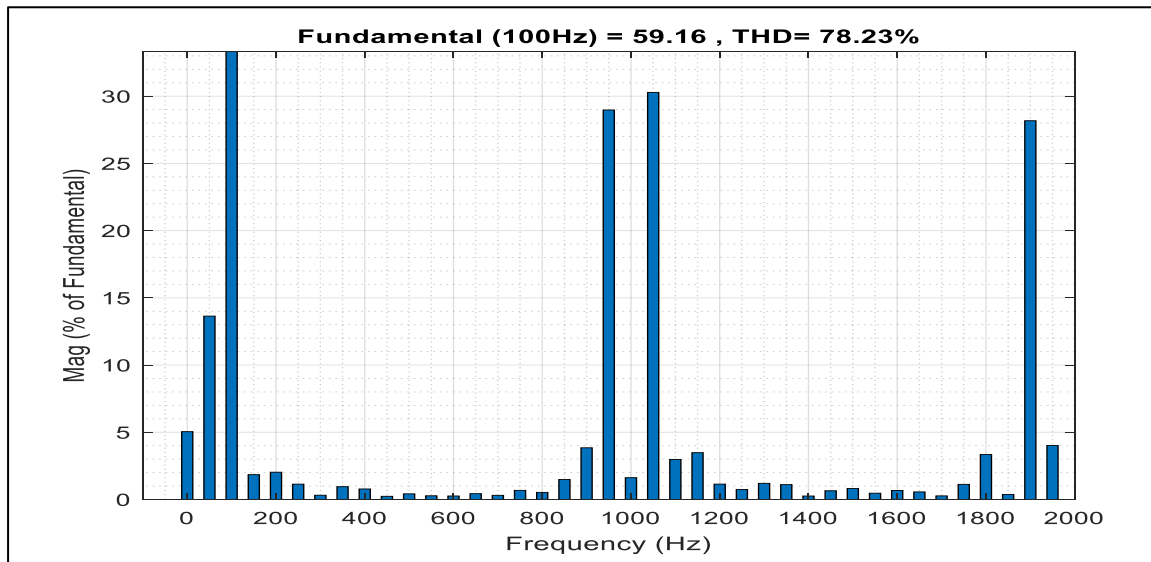


Figure III-11 : Spectre harmonique de courant de sortie d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.

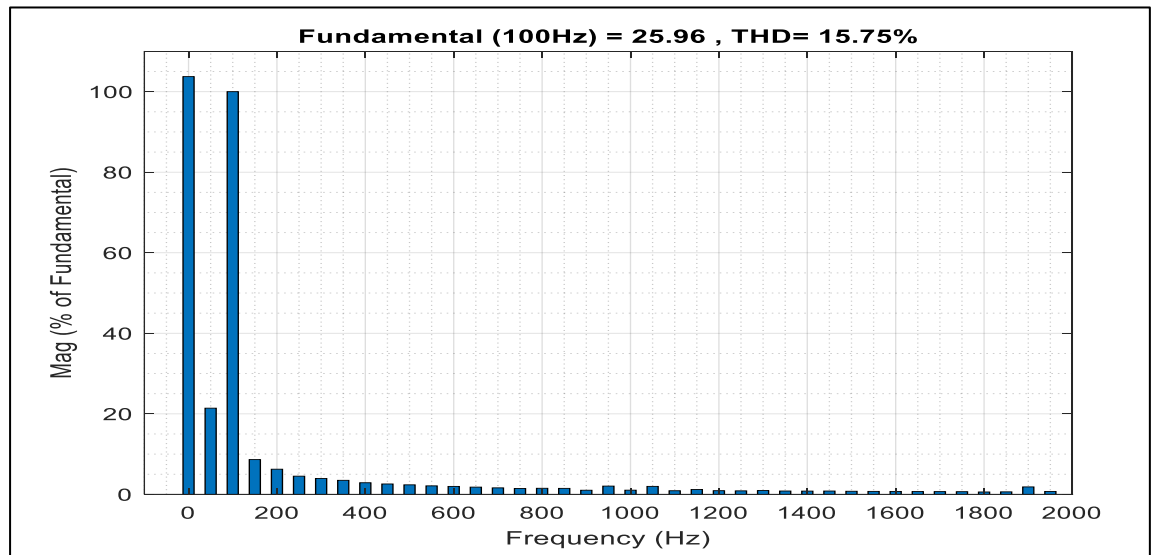


Figure III-12 : Spectre harmonique de tension de sortie d'un redresseur MLI Sinus-dent de scie.

➤ **Interprétation des résultats :**

- La figure (1) représente la tension ( $V_a$ ) et le courant ( $I_a$ ) du premier phase avec leurs spectres harmoniques pour l'onduleur MLI sinusoïdal en dents de scie :

THD ( $V_a$ ) = 79,41% et THD ( $I_a$ ) = 32,07%, en remarque que le courant est presque sinusoïdal comme le montre la figure (3). De plus, la figure(4) représente le signal de tension simple avec THD (tension simple) = 79,45 % et fondamental 178,6.

-La figure (7) montre la tension d'entrée ( $V_b$ ) et le courant ( $I_b$ ) du deuxième étage du redresseur PWM à dents sinusoïdales : THD( $V_b$ )=78,24 %, THD( $I_b$ )=1,25 %, en notant que son THD

(Ib) a été considérablement réduit, au point d'atteindre un THD = 1,25 %, ce qui est conforme aux normes internationales. De plus, la figure (10) montre le courant et la tension de sortie du redresseur de scie SINUS et leurs spectres harmoniques : THD (courant de sortie) = 78,23 %, THD (tension de sortie) = 16,76 %, les harmoniques du courant de sortie (h2.... ..h19) sont innégligeables.

### III.3.2 Technique MLI sinus-triangle

- Onduleur triphasé :

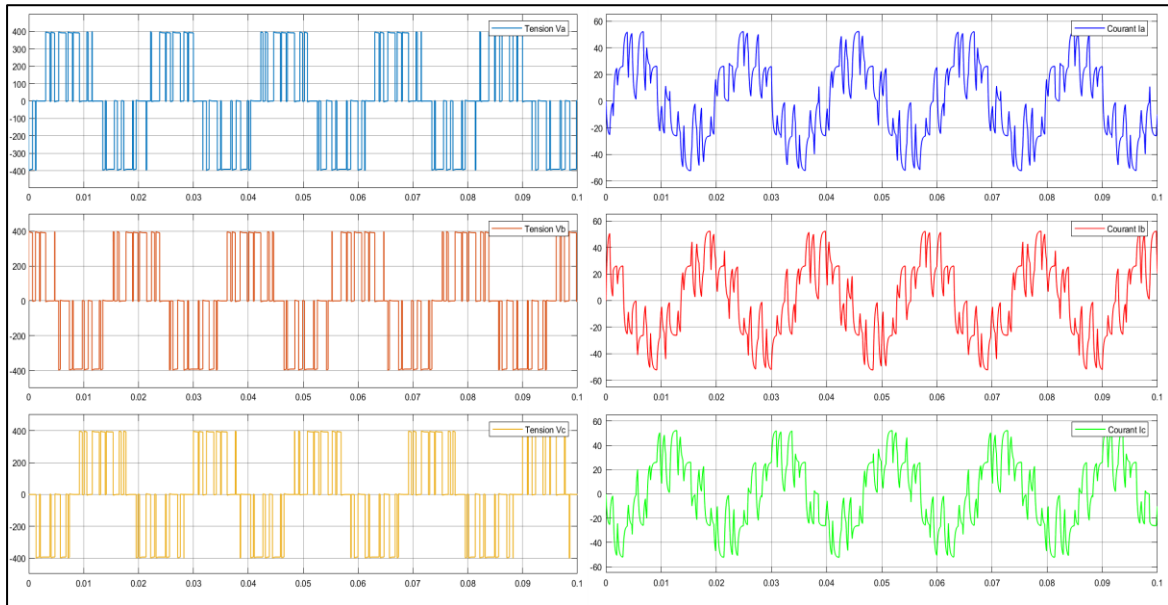


Figure III-13 : Tensions et courants d'entrées d'un onduleur MLI sinus-triangle.

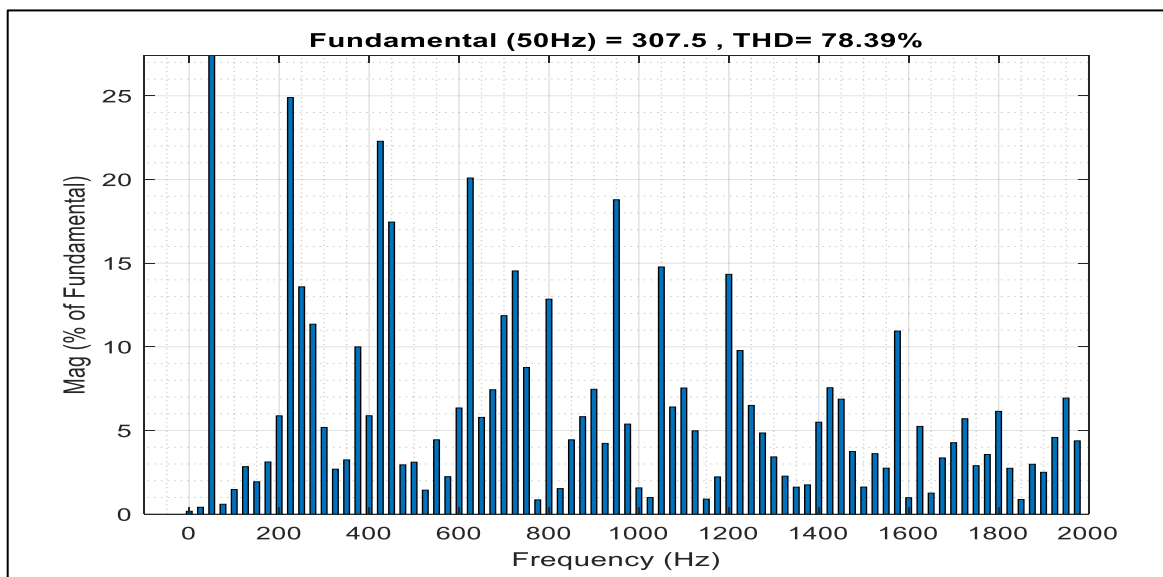


Figure III-14: Spectres d'harmoniques de tension Va d'un onduleur MLI sinus-triangulaire.

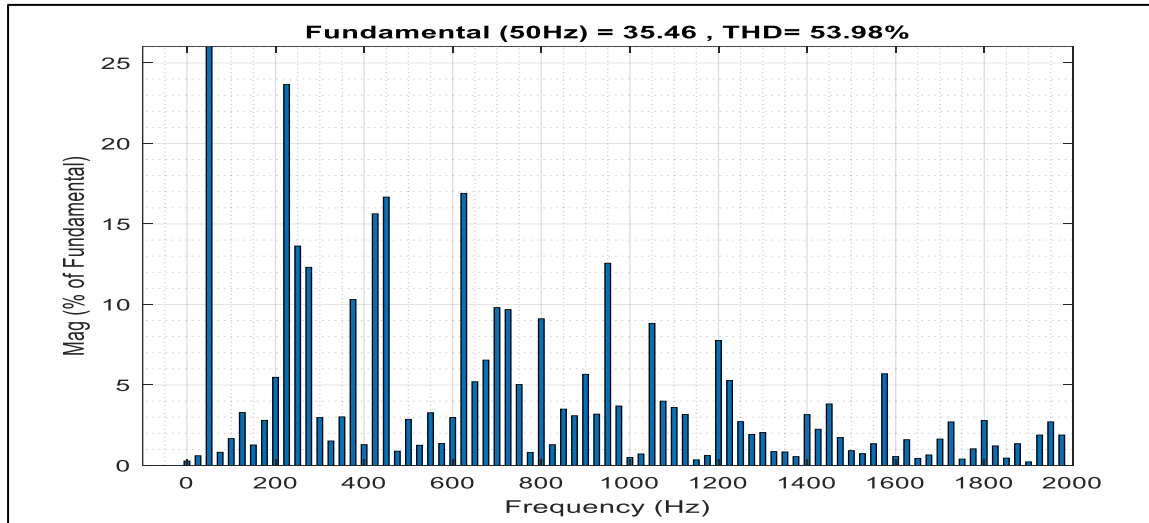


Figure III-15: Spectres d'harmoniques de courant Ia d'un onduleur MLI sinus-triangulaire.

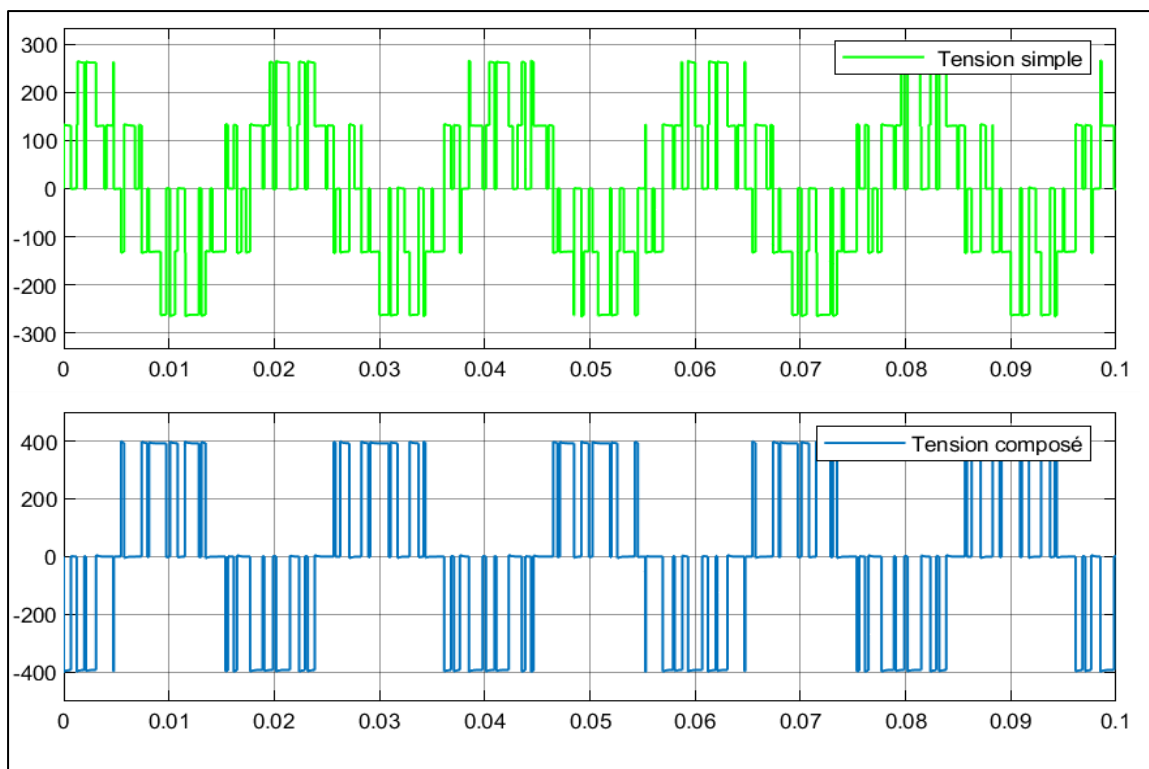


Figure III-16: Tension simple et composé d'un onduleur MLI sinus-triangulaire.



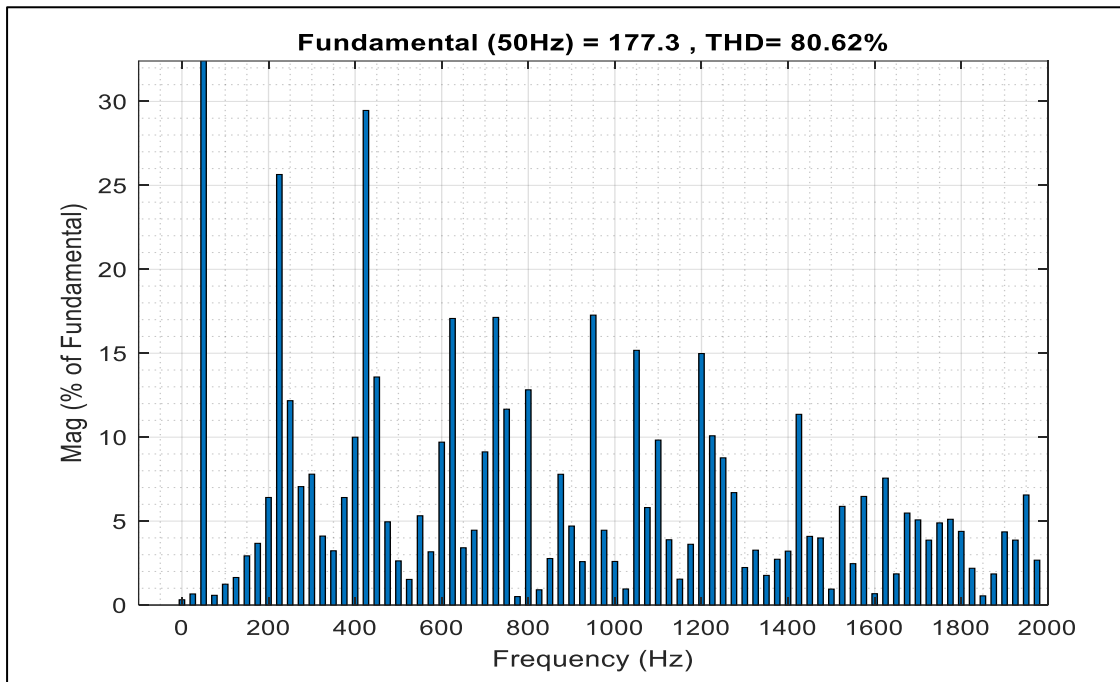


Figure III-17: Spectres d'harmoniques de tension simple d'un onduleur MLI sinus-triangular.

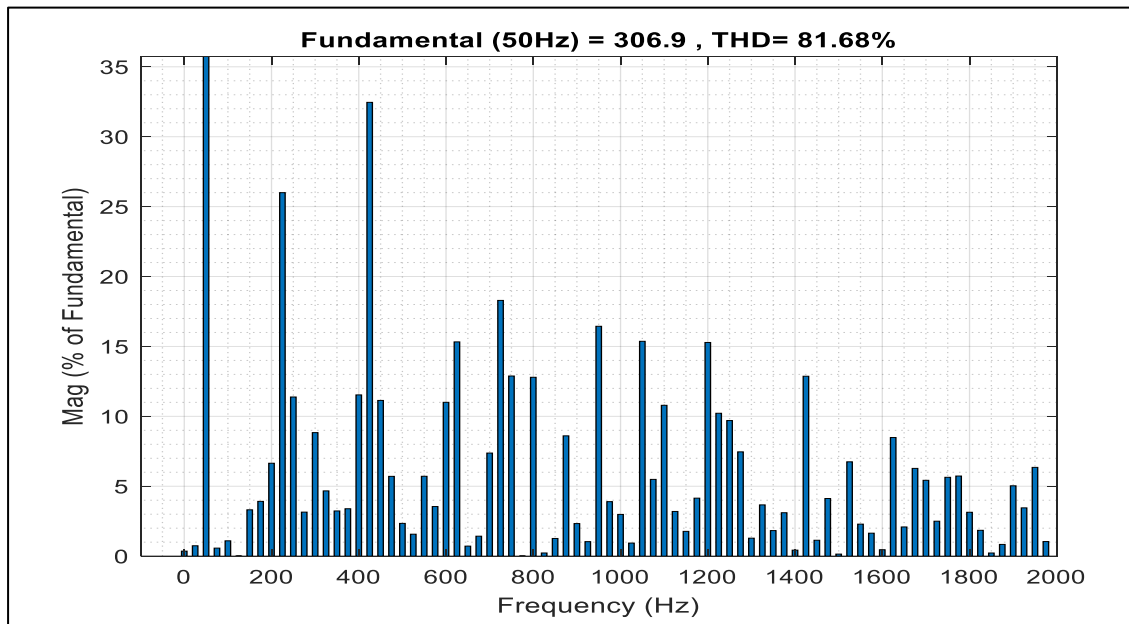


Figure III-18 : Spectres d'harmoniques de tension composé d'un onduleur MLI sinus-triangular.

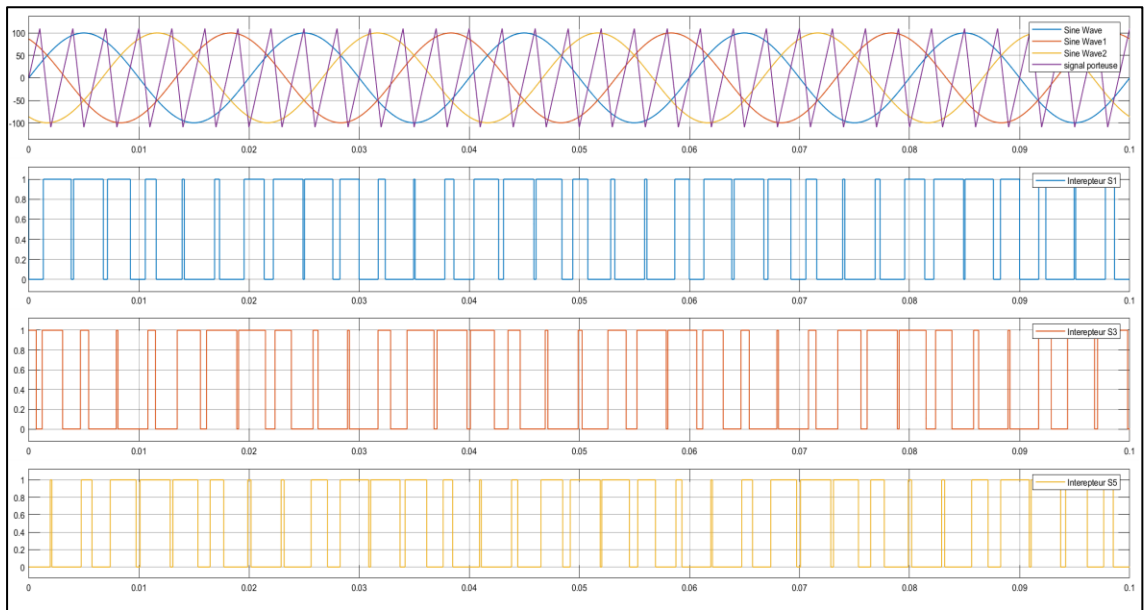


Figure III-19 : Illustration de MLI sinus-triangle d'un onduleur triphasé.

- Redresseur triphasé

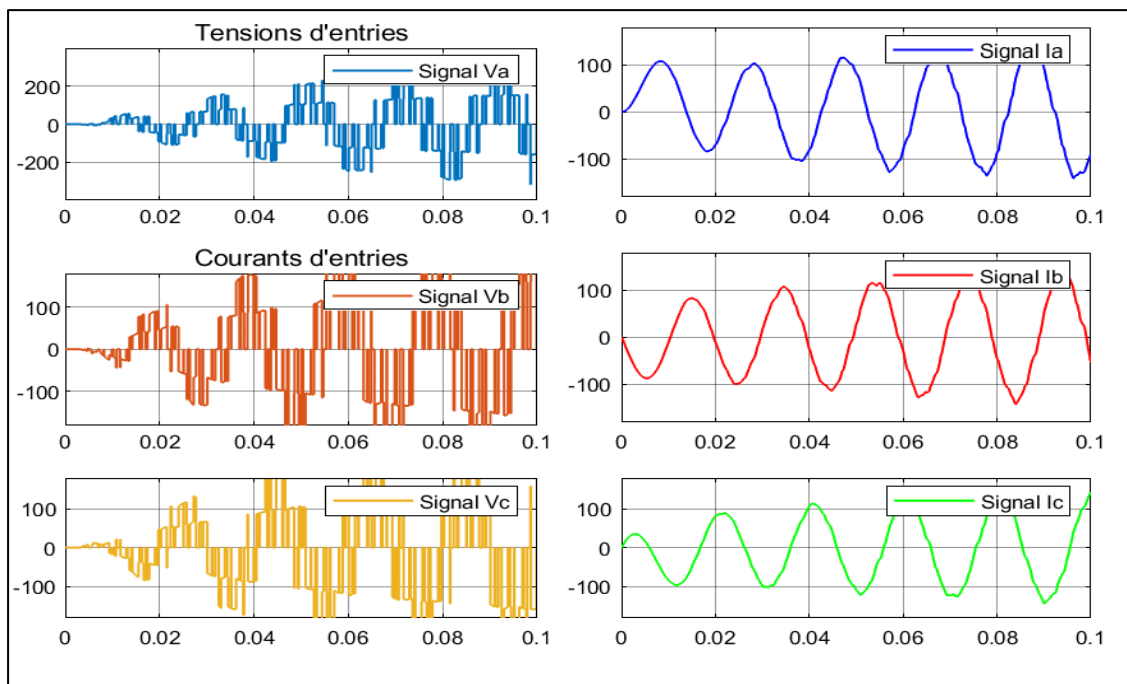


Figure III-20: Résultats de simulation d'un redresseur MLI sinus-triangularaire.

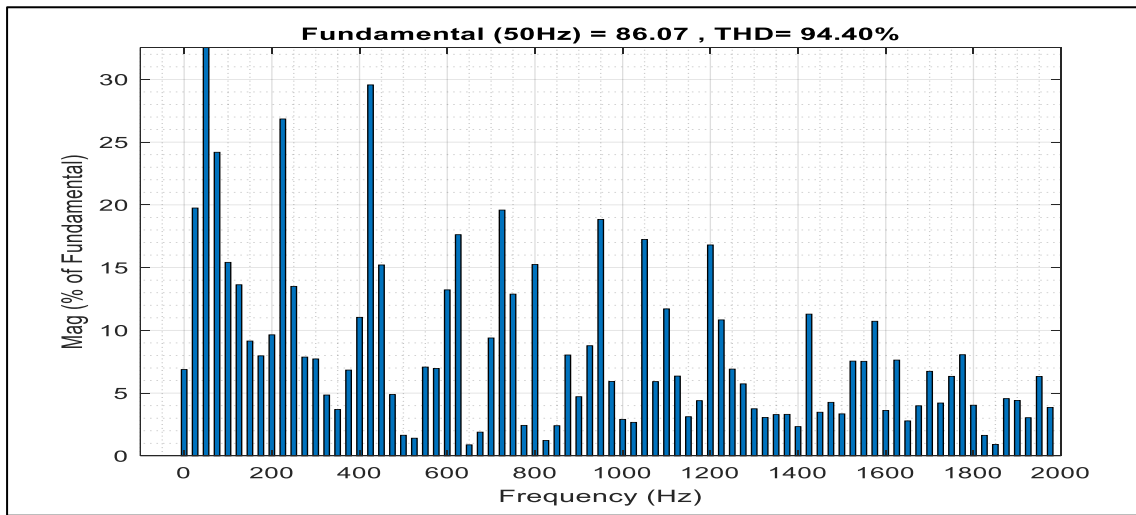


Figure III-21: Spectres d'harmoniques de tension  $V_a$  d'un redresseur MLI sinus-triangular.

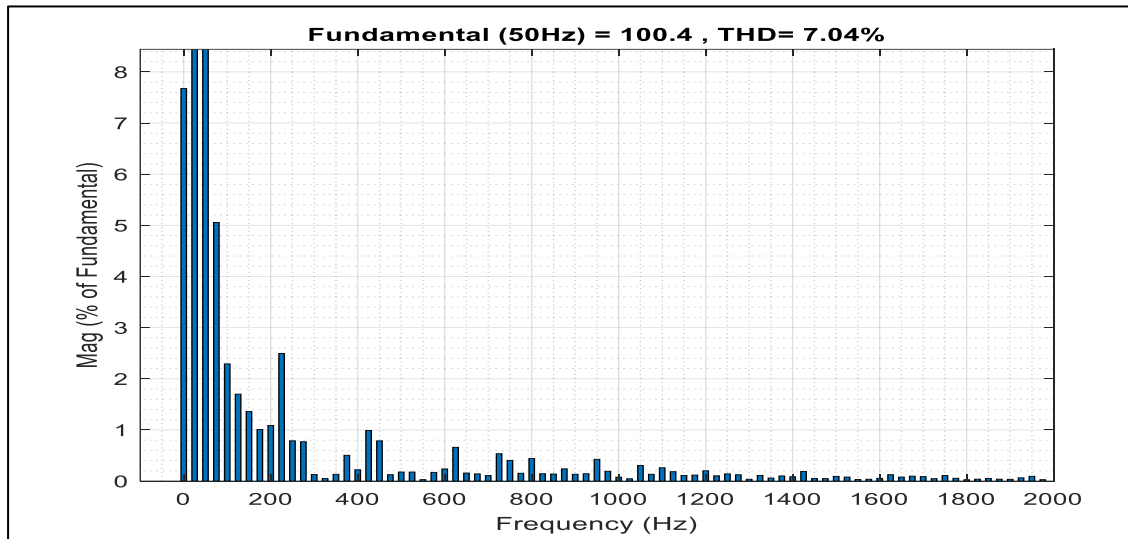


Figure III-22: Spectres d'harmoniques de courant  $I_a$  d'un redresseur MLI sinus-triangular.

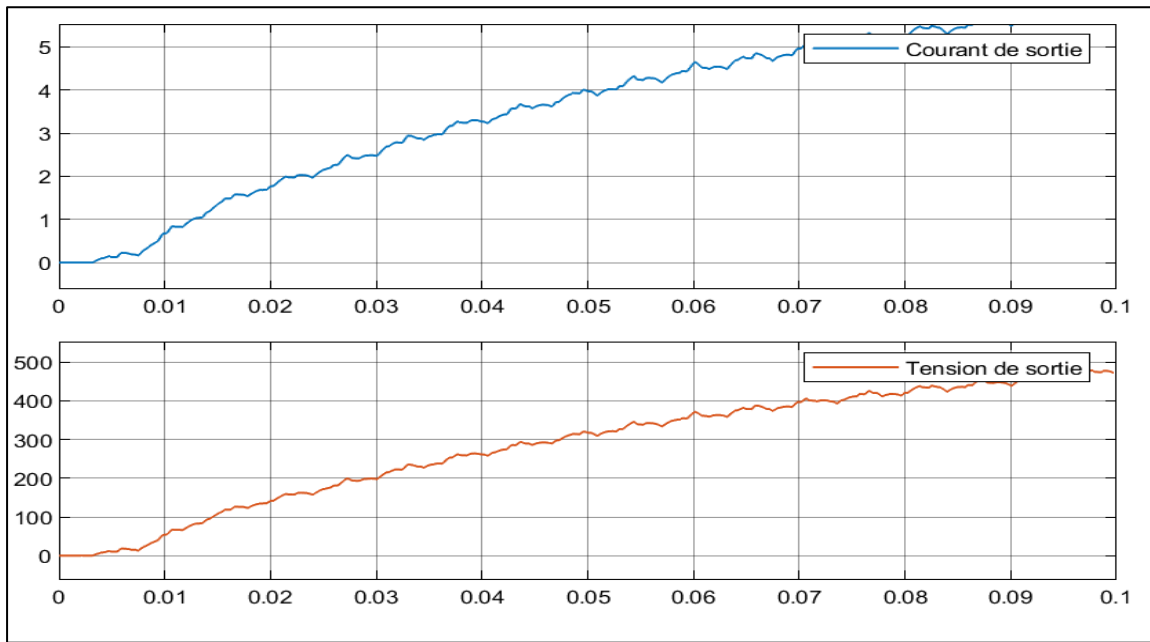


Figure III-23 : Courant et tension de sortie d'un redresseur MLI sinus-triangulaire.

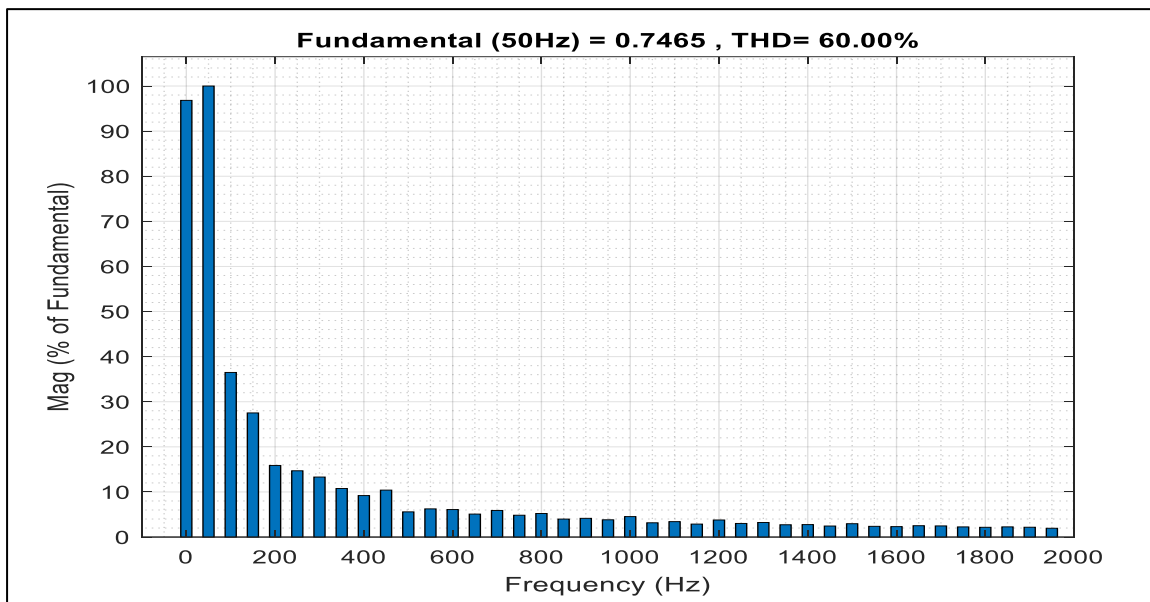


Figure III-24 : Spectres d'harmoniques de courant de sortie d'un redresseur MLI sinus-triangulaire

➤ **Interprétation des résultats**

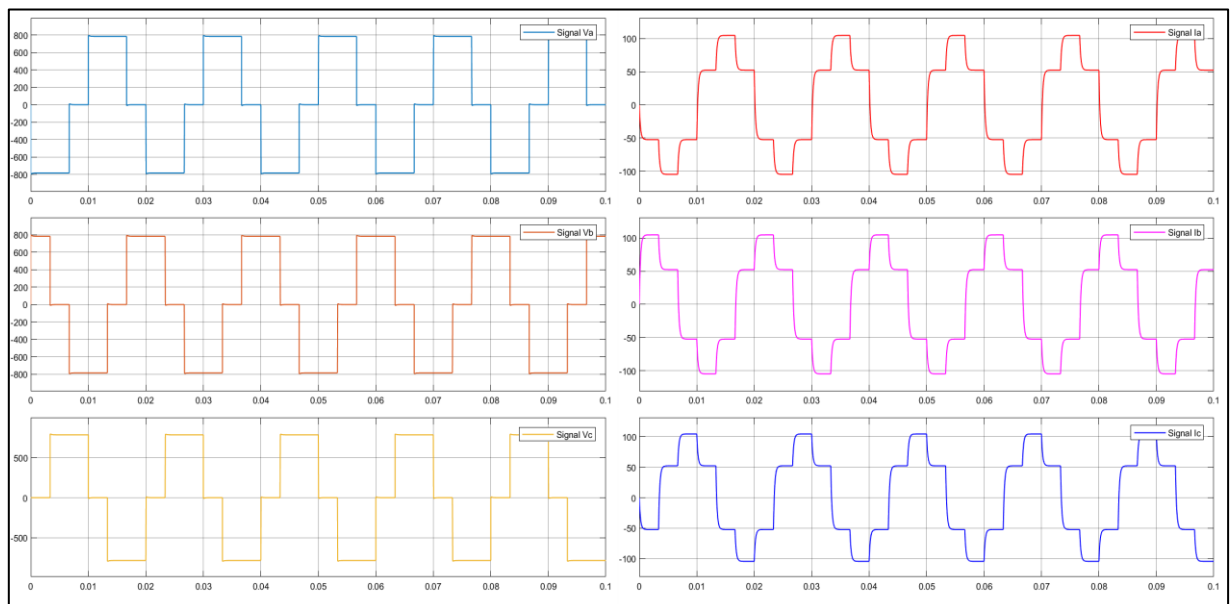
La figure (13) représente la tension et le courant d'entrée d'un onduleur MLI sinusoïdal-triangulaire et leurs spectres harmoniques :  $Thd (V_a) = 78,39 \%$ ,  $THD (I_a) = 53,98 \%$ . De plus, la figure (16) représente la tension simple et composé d'un onduleur MLI sinusoïdal-triangulaire et leurs spectres harmoniques :  $THD (tension\ simple) = 80,62\%$ ,  $THD (tension\ composé) = 81,68\%$ , selon les valeurs de  $THD$  de courant  $I_a$  et  $THD$  de tension simple est importante, en remarque que la distorsion harmonique est grand car  $THD$  (tension

simple et composé)  $\geq 8\%$  De même pour la valeur du taux de distorsion harmonique de de courant  $THD_{ia} \geq 50\%$ .

-La figure (20) montre la tension et le courant d'entrée d'un redresseur MLI sinusoidal triangulaire et leurs spectres harmoniques :  $THD(V_a) = 94,40\%$ ,  $THD(I_a) = 7,04\%$ , en notant que  $THD(I_a) \leq 10\%$ . Il n'y a aucun risque et les ondes de courant  $I_a$  sont presque idéales. De plus, la figure (23) représente le courant de sortie d'un redresseur sinusoidal-triangulaire MLI et leur spectre harmonique est  $THD=60\%$ . Cette valeur est très grande, c'est-à-dire qu'elle est plus grande supérieur ou égal à  $50\%$ . La courbe de sortie de courant est déformée.

### III.3.3 Injection harmonique d 'ordre 3 dans la référence

- Onduleur triphasé :



**Figure III-25 :** Tensions et courants d'entrees d'un onduleur MLI injection harmonique d'ordre 3 dans la référence.

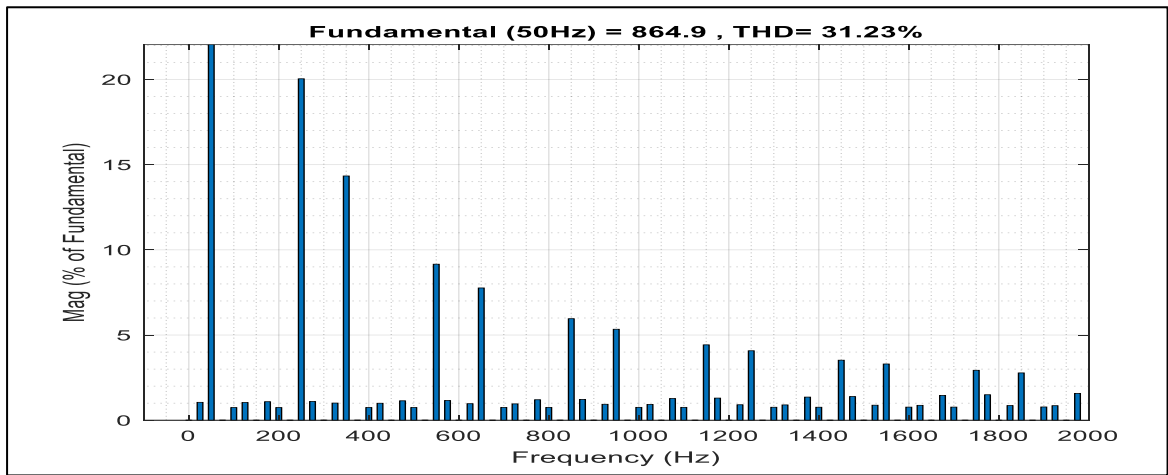


Figure III- 26: Spectre harmonique de tension Va d'un onduleur MLI avec injection harmonique d'ordre 3.

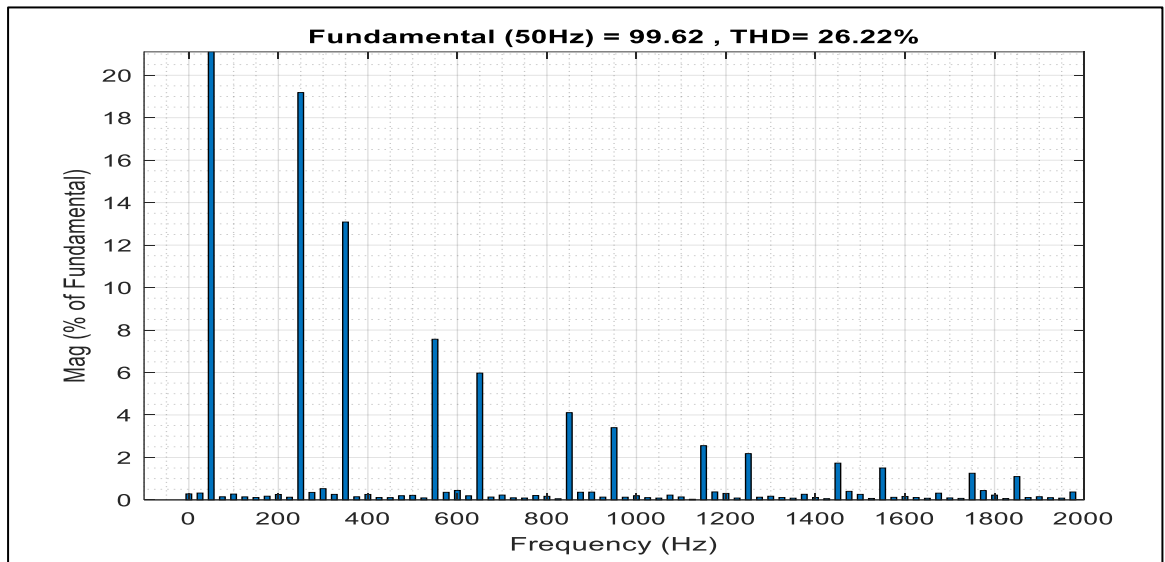


Figure III- 27: Spectre harmonique de courant Ia d'un onduleur MLI avec injection harmonique d'ordre 3.

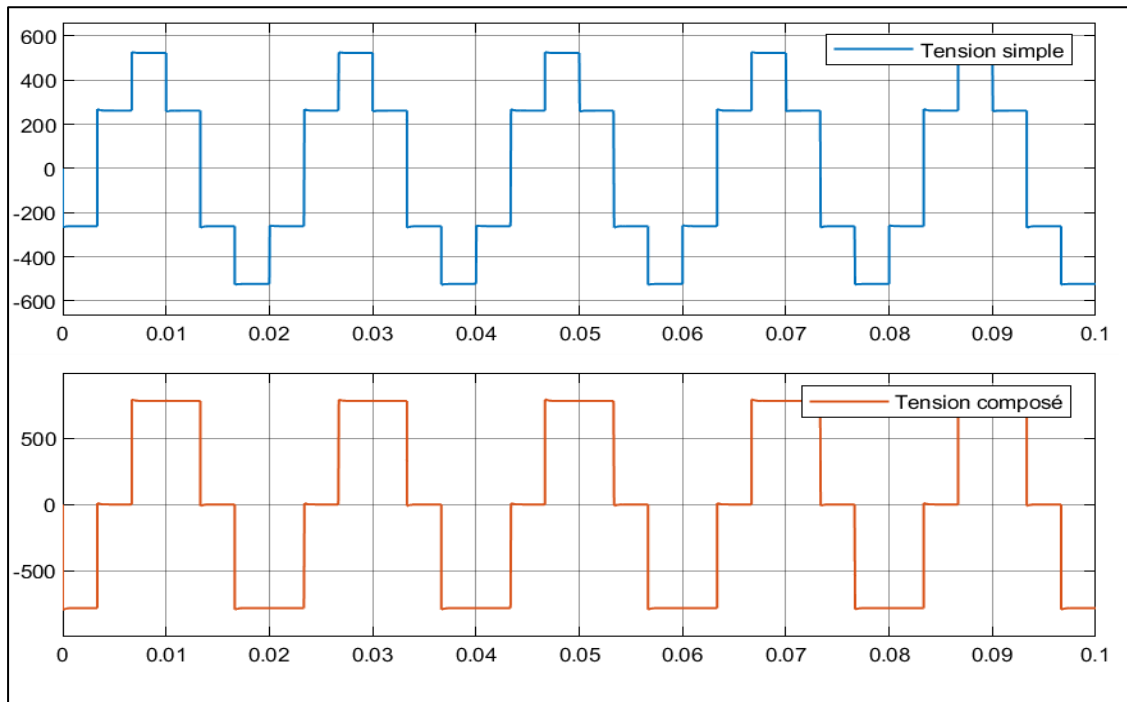


Figure III- 28: Tension simple et composé d'un onduleur MLI avec injection harmonique d'ordre 3.

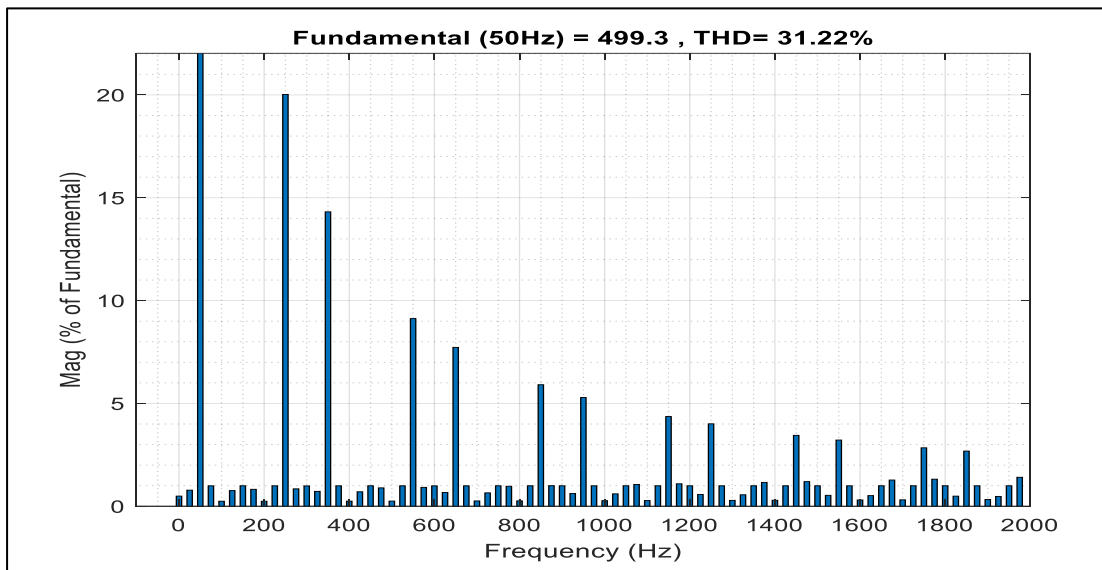
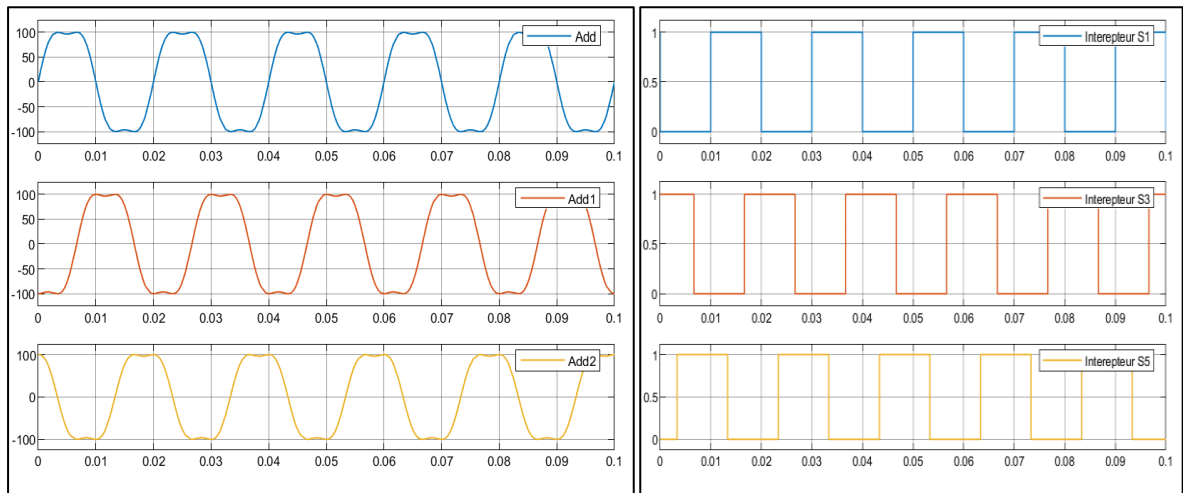
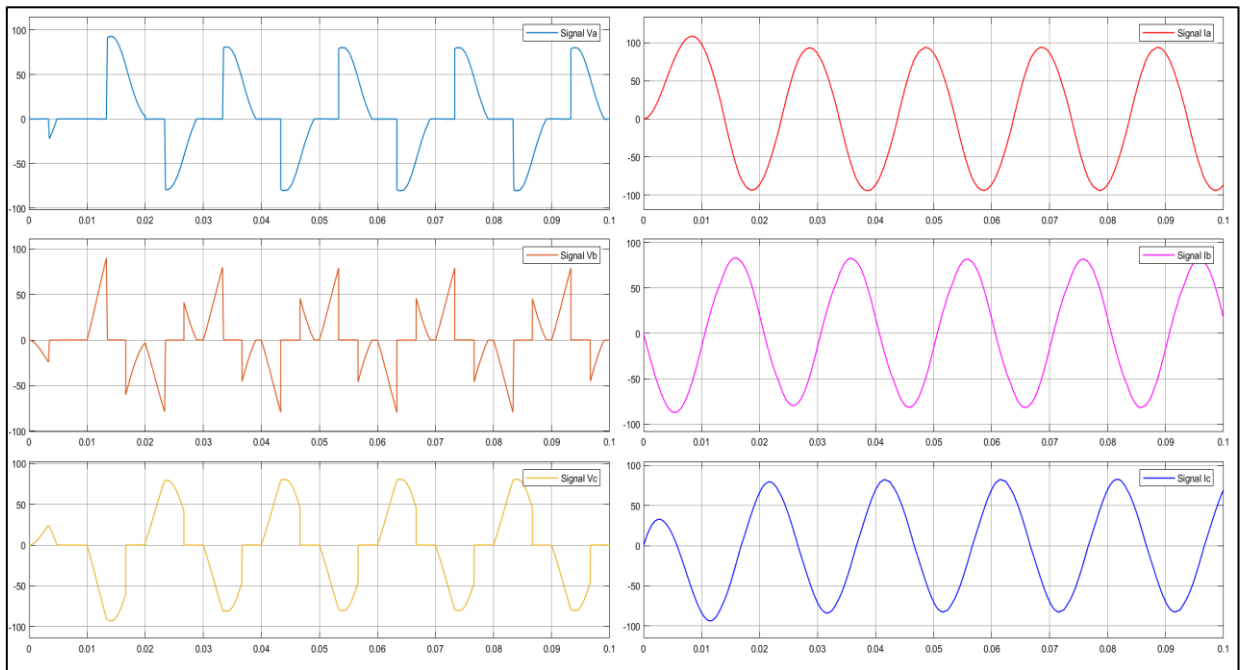


Figure III- 29: Spectre harmonique de tension simple d'un onduleur MLI avec injection harmonique d'ordre 3.



**Figure III-30 :** Résultat de la commande MLI avec d'injection harmoniqd'ordre 3 d'un onduleur triphasé.

- **Redresseur triphasé :**



**Figure III-31:** Tensions et courants d'entrées d'un redresseur a technique MLI avec injection harmonique.



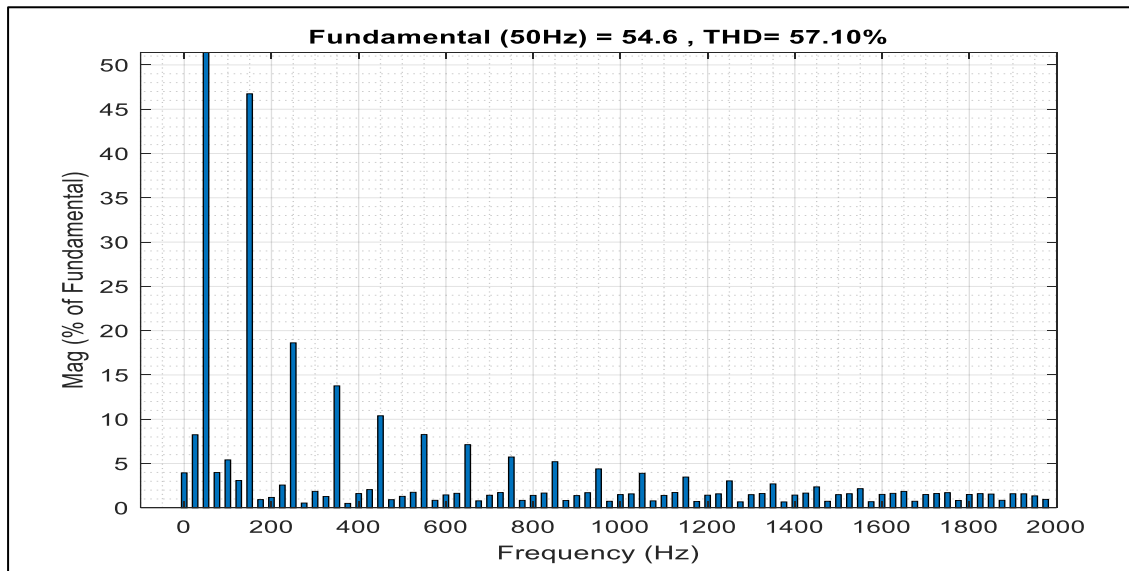


Figure III- 32: Spectre harmonique de tension  $V_a$  d'un redresseur MLI avec injection harmonique d'ordre 3.

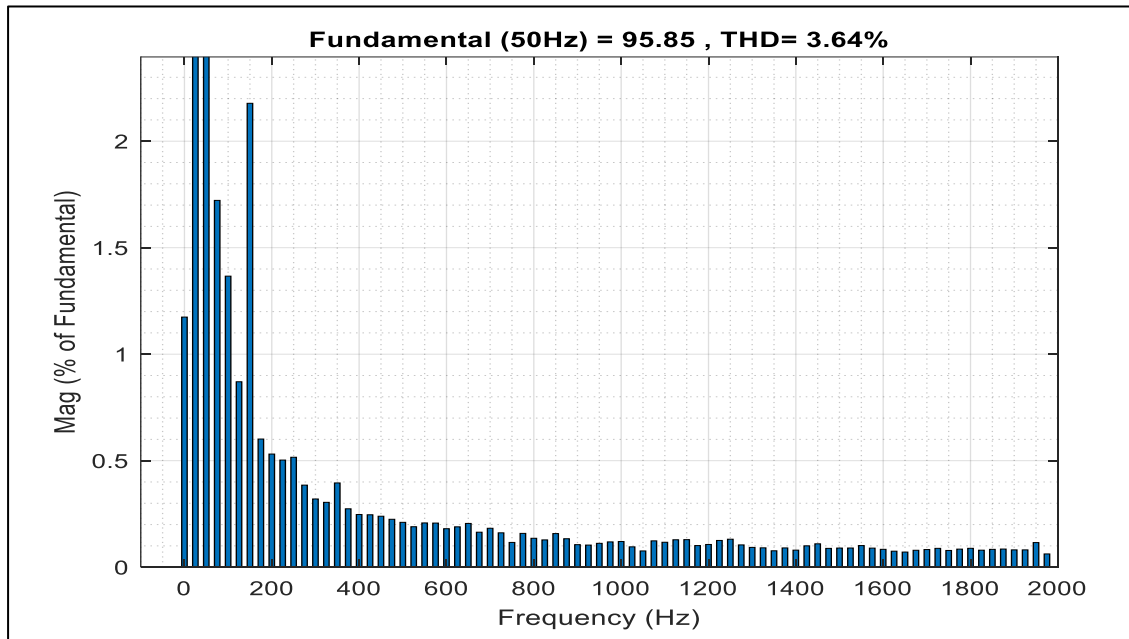
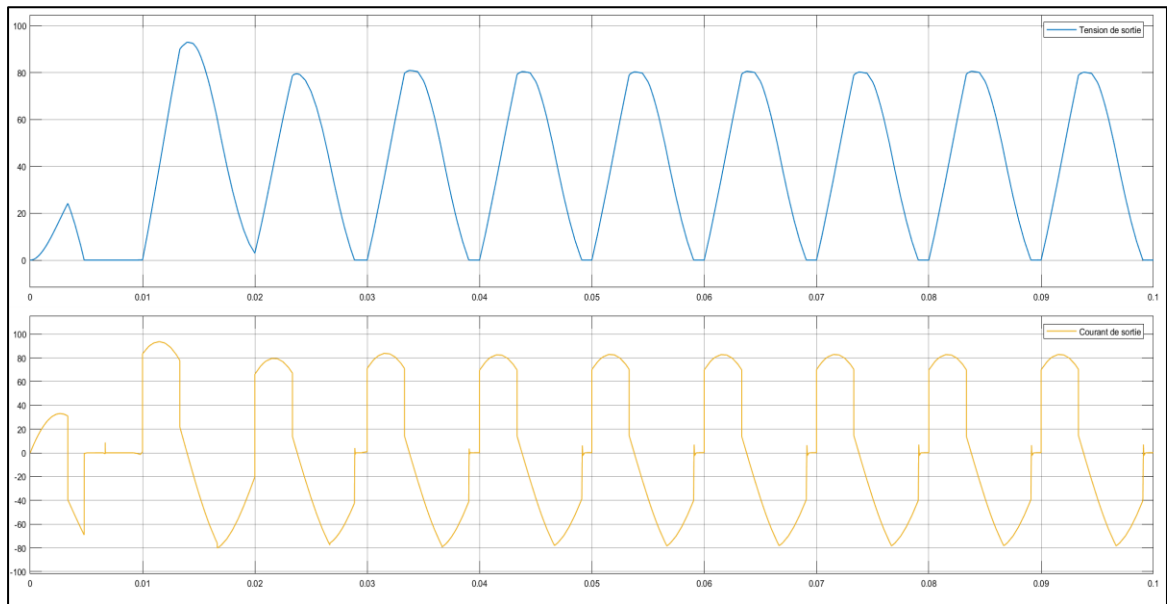
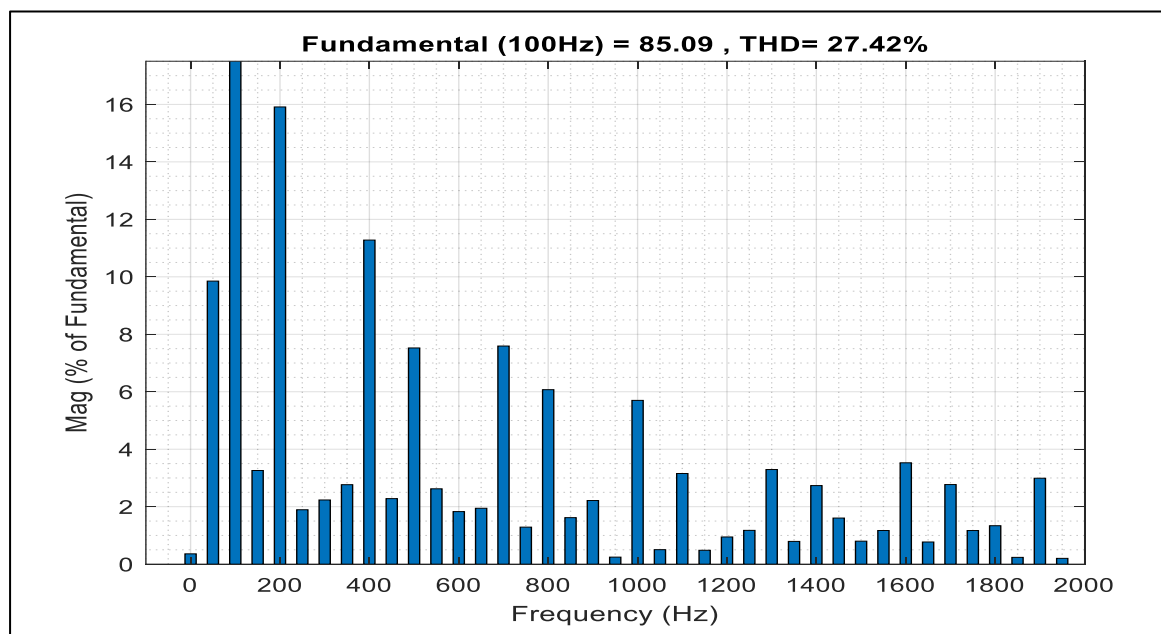


Figure III- 33: Spectre harmonique de courant  $I_a$  d'un redresseur MLI avec injection harmonique d'ordre 3.



**Figure III-34 :** Courant et tension sortie d'un redresseur MLI injection harmonique avec leurs spectres harmoniques.



**Figure III-35 :** Spectre harmonique de courant de sortie d'un redresseur MLI injection harmonique .

➤ **Interprétation des résultats**

-La figure (25) montre la tension et le courant d'entrée d'un onduleur MLI avec injection d'harmoniques d'ordre 3 :  $THD(V_a) = 31,23 \%$  ,  $THD(I_a) = 26,22 \%$  , en remarque que  $10\% < THD(I_a) < 50\%$  : distorsion harmonique significative les barres de spectre harmonique impaire de courant  $I_a$  est décroissent et les barres paires presque nulle. En plus de la figure (28) représente une tension simple et composé d'un onduleur MLI à injection

d'harmoniques de Classe 3, THD (tension simple) = 31,22%, les barres impaires de spectre harmonique de tension simple sont décroissées.

-La figure (31) représente la tension et le courant d'entrée du redresseur MLI avec injection d'harmonique d'ordre 3 : THD(Va)=57,10 %, THD(Ia)=3,64 %, et la figure (34) le courant et la tension de sortie de l'harmonique MLI. Redresseur à injection avec leurs spectres harmoniques :

THD (courant de sortie) = 8,79%, THD (tension de sortie) = 27,42%, d'après les résultats du THD, notant que le THd du courant Ib est inférieur à 10% ne présente pas de danger pour toutes les ondes. Le courant Ib est de forme sinusoïdale, et la même observation est pour le courant de sortie.

#### III.3.4 Techniques MLI par hystérésis

- Onduleur triphasé :

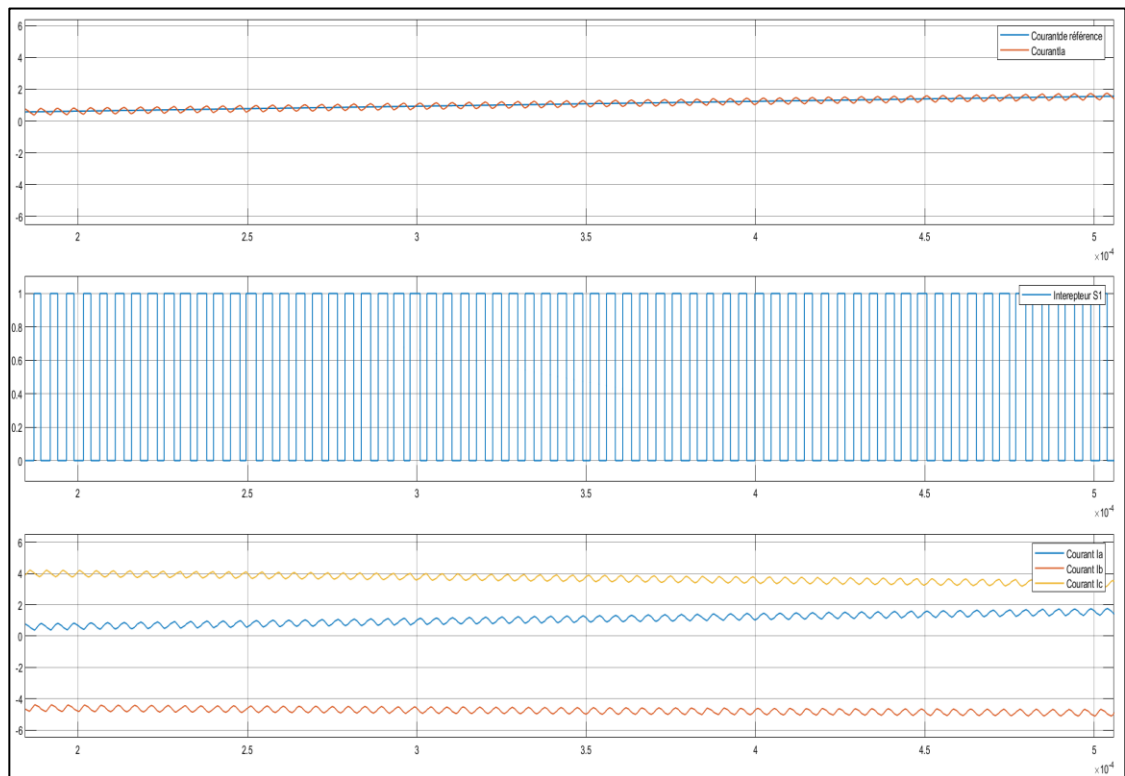


Figure III- 36: Résultat de la commande MLI hystérésis d'un onduleur triphasé.

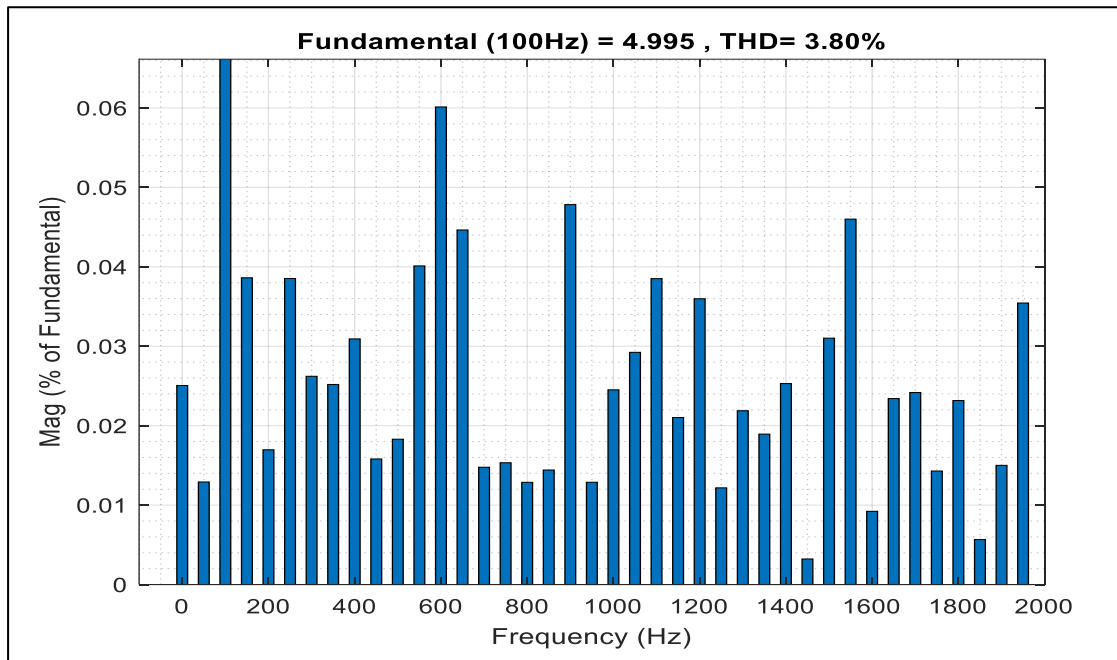


Figure III- 37 : Spectre harmonique de courant Ia de source d'un onduleur MLI hysteresis.

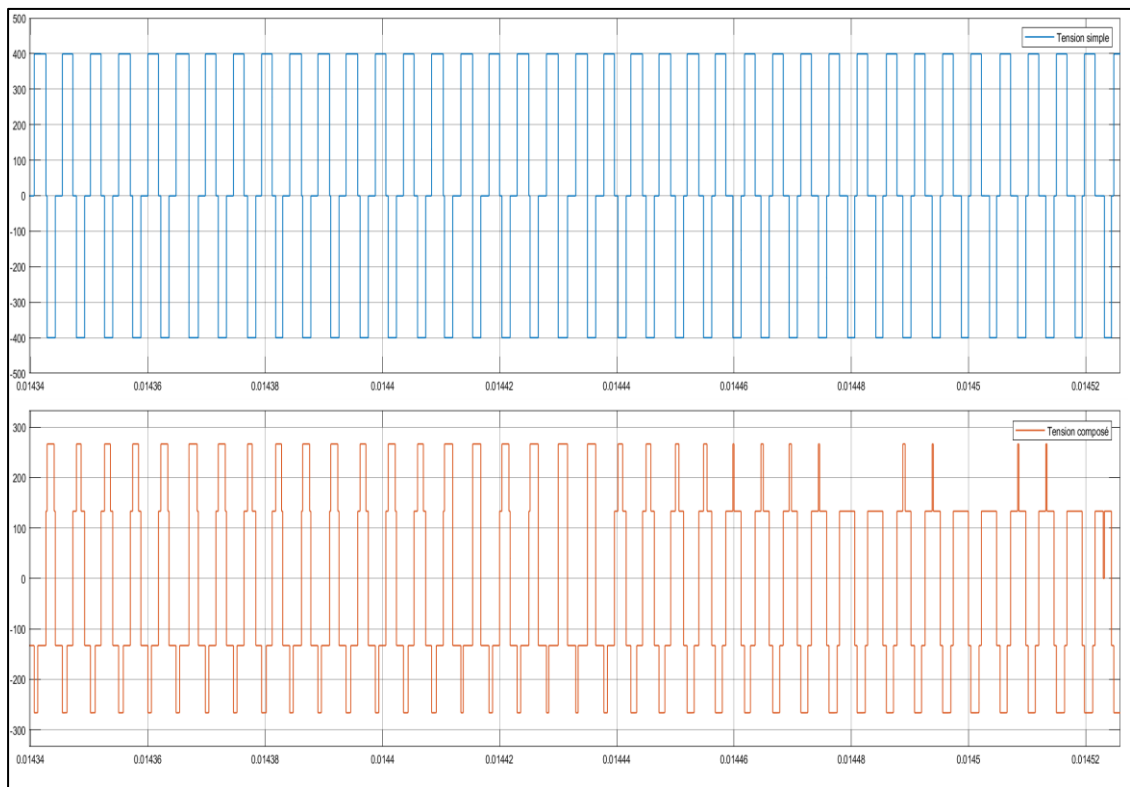


Figure III-38 : Tension simple et composé d'un onduleur MLI hystérésis.

- Redresseur triphasé :

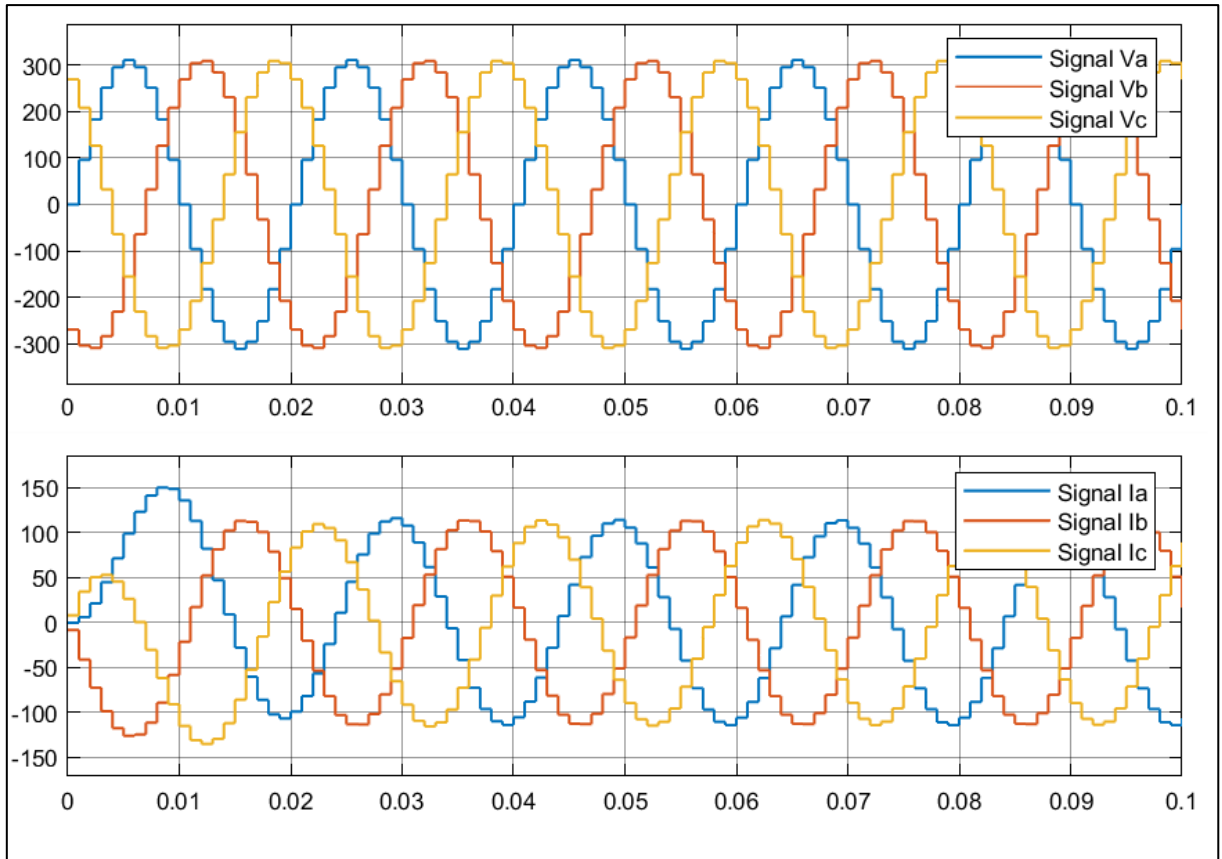


Figure III-39: Résulta de simulation redresseur MLI hystérésis.

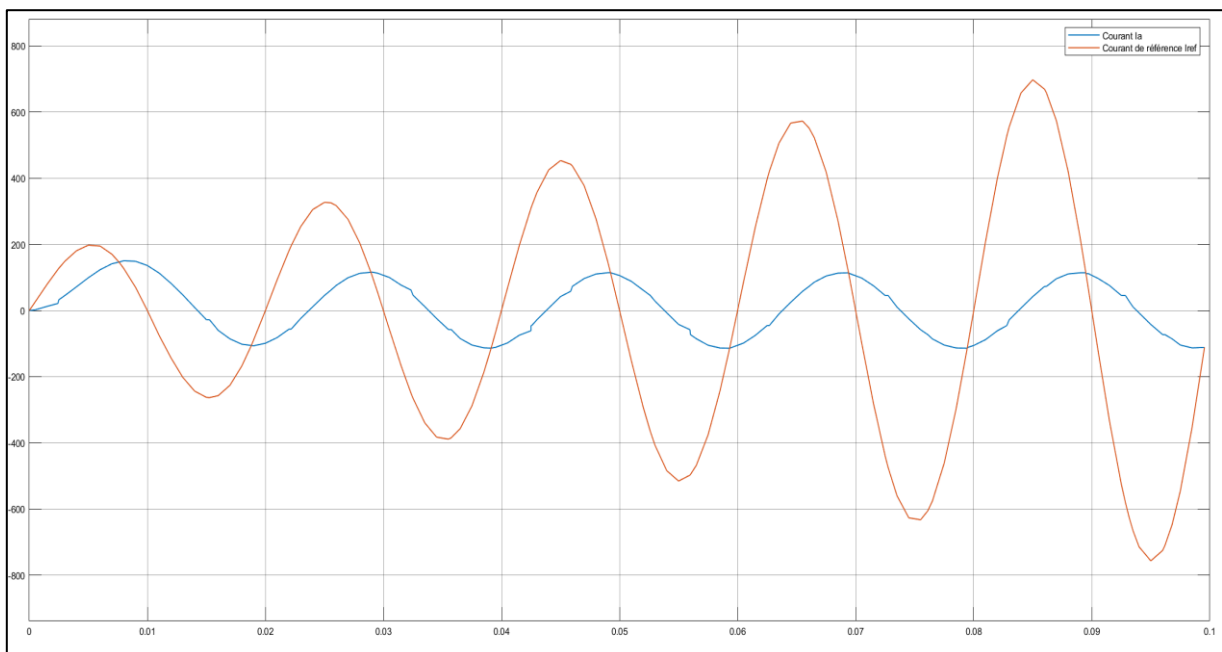


Figure III-40:Aluure de courant Iref avec Ia.

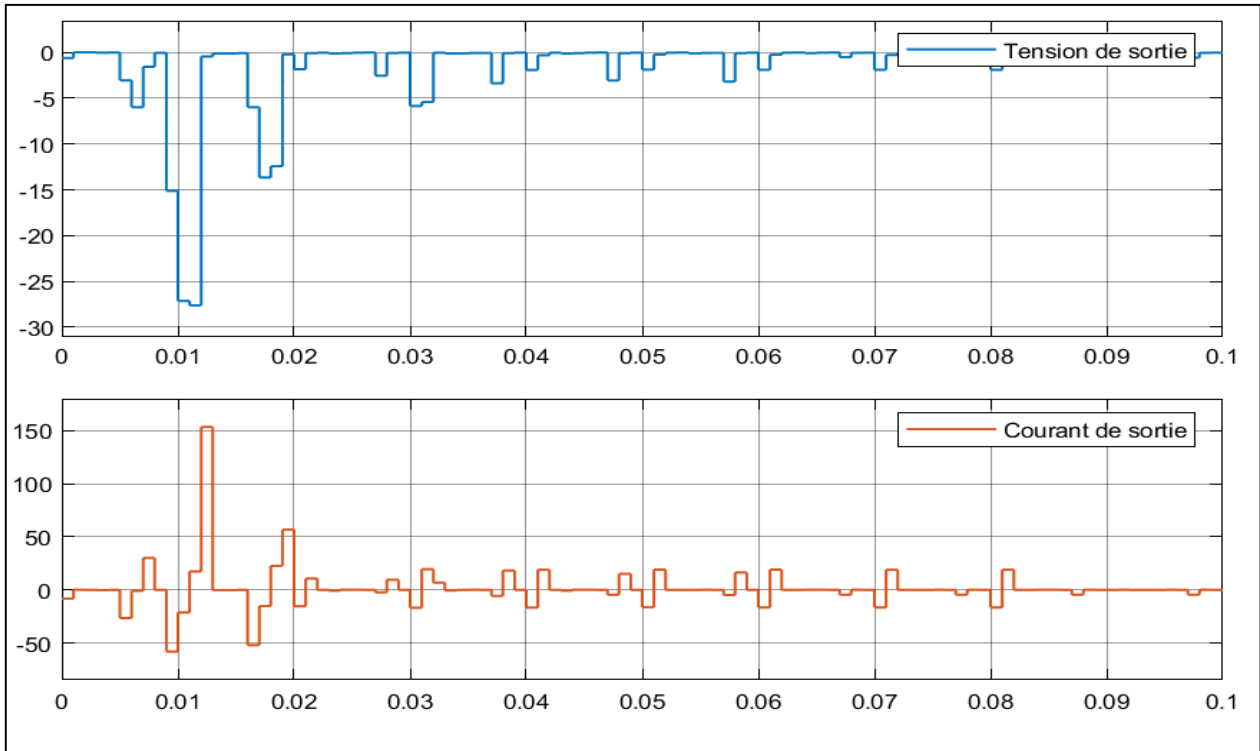


Figure III-41: Tension et courant de sortie d'un redresseur MLI hysteresis.

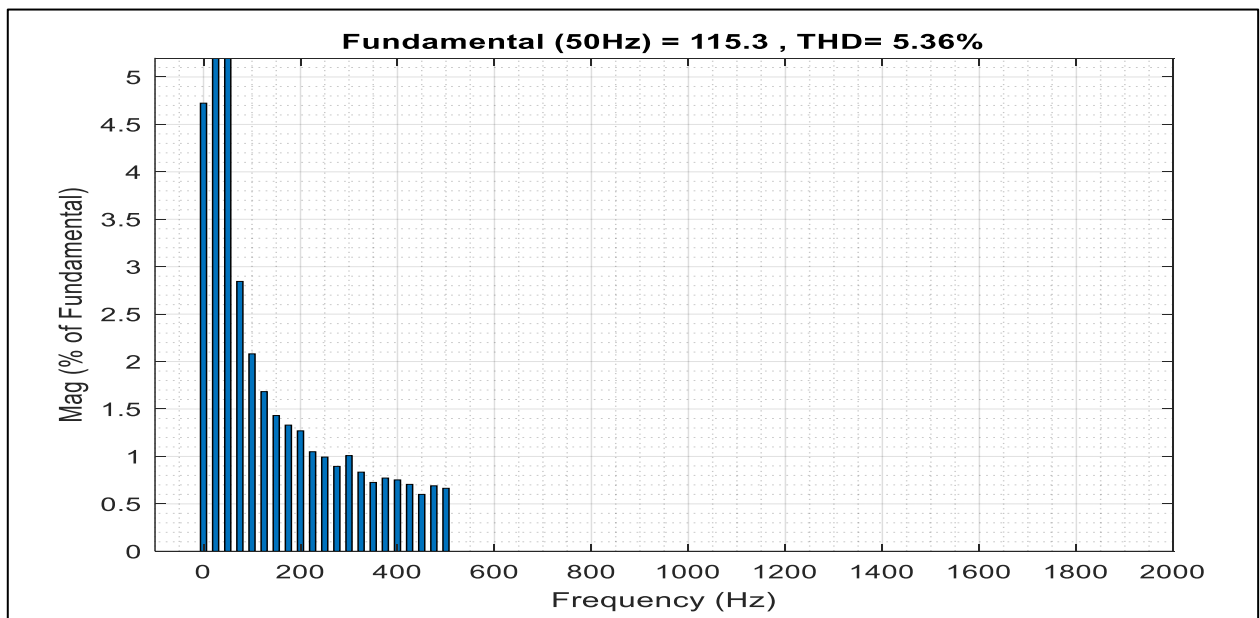


Figure III-42: Le spectre harmonique de courant d'entrée Ia d'un redresseur MLI hysteresis.

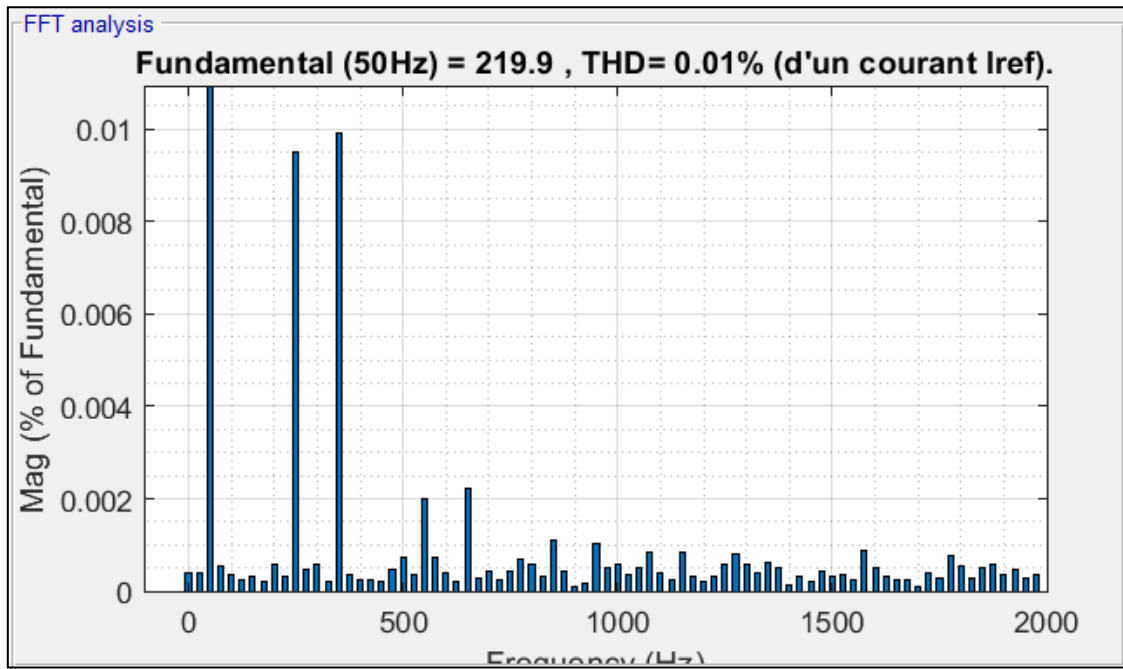


Figure III-43: Spectre harmonique de courant  $I_{ref}$  d'un redresseur MLI hysteresis.

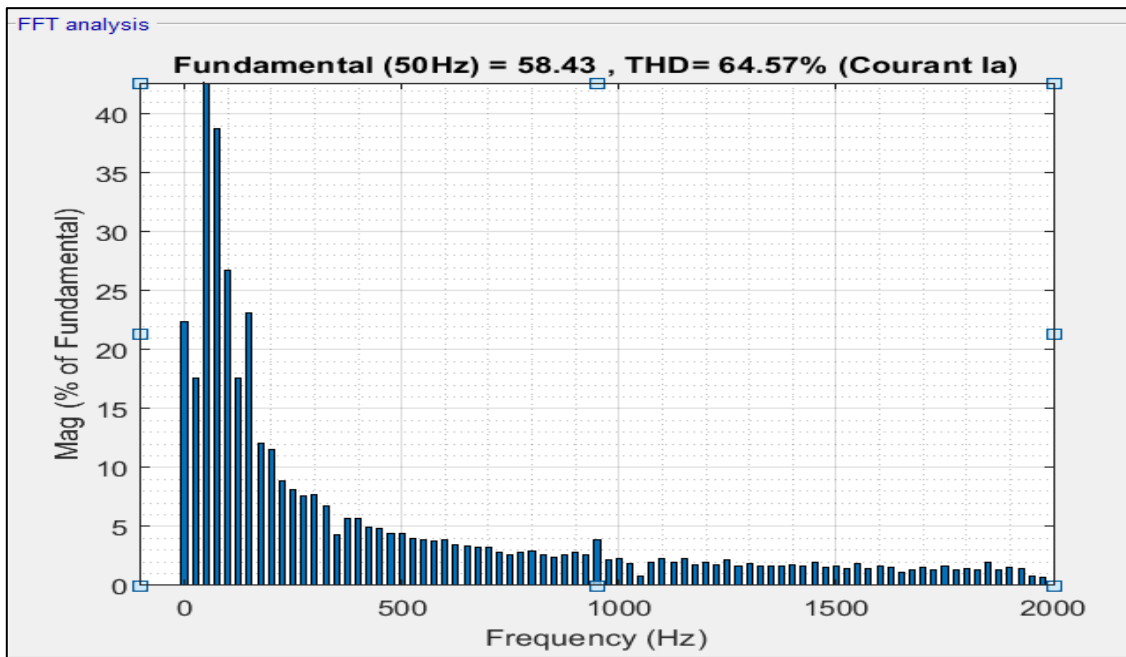


Figure III-44: Spectre harmonique de courant de la source  $I_a$  d'un redresseur MLI hysteresis.

➤ **Interprétation des résultats**

-La figure (37) Spectre harmonique de courant  $I_a$  de source d'un onduleur MLI hysteresis,  $THD(I_a) = 3.80\%$  cette valeur est inferieur a 10% les onde de courant est presque parfait.

-La figure (42) represente Le spectre harmonique de courant d'entree  $I_a$  d'un redresseur MLI hysteresis.,  $THD(I_a) = 5.36\%$  cette valeur est inferieur a 10% les onde de courant est presque parfait.

-la figure (43) représente Le spectre harmonique de courant Iref d'un redresseur MLI hysteresis THD(Iref)=0.01%, et la figure(44) représente Le spectre harmonique de courant Ia THD(Ia)= 64.57% en ramarque que Les barres de spectre harmonique de courant Ia est décroissante.

**Tableau III-1** :Comparaison entres les techniques de commande MLI pour les harmoniques THD des courants.

Les technique de commande	Onduleur triphasé	Redresseur triphasé
MLI sinus-dent de scie	32.07%	78.23%
MLI sinus-triangle	53.39%	8.19%
MLI avec injection harmonique d'ordre 3 dans la référence.	26.22%	8.79%
MLI hysteresis	3.80%	64.57%

- **Remarque :**

Le meilleur résultat obtenu :

- Pour la MLI hysteresis, on remarque que le THD de spectre harmonique d'un onduleur THD=3.80% (de courant a diminué par rapport aux autres commandes).
- Pour la MLI sinus-triangle, on remarque que le THD de spectre harmonique d'un redresseur THD=8.19% (de courant a diminué par rapport aux autres commandes).



## Conclusion Générale

Ce présent travail est lié à l'étude de différentes techniques de contrôle MLI appliquées aux onduleurs et redresseurs triphasés sur la qualité de l'énergie du système d'énergie éolienne. Les résultats de simulation pour les deux convertisseurs ont montré la valeur de distorsion harmonique (THD) pour les deux techniques de contrôle appliquées. Ce taux est lié à la qualité de l'énergie, notamment sa valeur en termes de courant et de tension de sortie pour chaque transformateur. Enfin, le convertisseur statique est un élément important et indispensable dans tous les secteurs de production d'énergie électrique instable, car la vitesse de conversion de l'énergie est très élevée.

Bien que cet convertisseur soit important, il présente un défaut. Faible facteur de puissance : certains convertisseurs fonctionnent avec un facteur de puissance très faible et il peut être nécessaire d'installer un équipement de compensation de puissance réactive. De plus, le problème des harmoniques est le seul défaut grave des systèmes électroniques qui injectent des harmoniques importantes des deux côtés du côté charge et du côté source d'alimentation.

## Références bibliographiques

- [1] <https://www.cafedelabourse.com/>
- [2] Flèche B et Délagnes D. « Energie Solaire Photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque.pdf, consulté janv. 2023.
- [3] <https://energiemines.ma/>
- [5] Attar A. Les énergies renouvelables" ancien PDG de Sonagraphe et ancien Ministre des Ressources en Eau.
- [6] Belakehal S.2010. Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies noergies Renouvelables, Thèse de doctorat, Université de Constantine.
- [7] <https://www.acteurdurable.org/>
- [8] <https://www.alec-grenoble.org/>
- [9] <http://www.lechauffage.com/>
- [10] Bouraiou A. 2009. « Elaboration et Caractérisation des Couches Minces CuInSe2 par Electrodeposition », Thèse de doctorat u M'entourai-CONSTANTINE.
- [11] ZIDANE N. 2014. Etude et Dimensionnement des Systèmes de production d'énergies renouvelables : Université Ferhat Abbas. Sétif.
- [4] [Les énergies renouvelables | Ministères Écologie Énergie Territoires \(ecologie.gouv.fr\)](http://ecologie.gouv.fr)
- [12] projet-eolien.com. info.projet-eolien.com/faq. [En ligne] [Citation : 13 mars 2016.] <http://www.info.projet-eolien.com>. 3.
- [13]: Benkaddour O A et Cheradid A. 2020. Conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance, memoire de fin d'étude, Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued.
- [14]L'éolien à axe vertical - Introduction, 12/03/2023, <https://web.eolieenergie.fr/presentation/eolienne-a-axe-vertical>
- [15] [Energie hydraulique - Définition \(xpair.com\)](http://xpair.com)
- [16] Khelfat L, Maataoui L. 2017. Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée, memoire de master, Université Badji Mokhtare-Anaba.
- [17]<https://www.explorateurs-energie.com/index.php/enseignants/les-energies/geothermique>
- [18] <https://www.franceenvironnement.com/>

- [19] Gergaud O. 2002. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Docteur de l'École Normale Supérieure de Cachan.
- [20] [Biomasse solide | Chiffres clés des énergies renouvelables \(developpement-durable.gouv.fr\)](https://developpement-durable.gouv.fr)
- [21] <http://jeunes.edf.com/>
- [22] <https://www.futura-sciences.com/>
- [23] [Définition du biogaz : une énergie renouvelable en développement \(connaissancedesenergies.org\).](https://connaissancedesenergies.org)
- [24] [Sources d'énergie renouvelable - Énergie et Mines \(gnb.ca\).](https://gnb.ca)
- [25] [Avantages & Inconvénients des Energies Renouvelables | Vattenfall.](https://vattenfall.com)
- [26] [Les convertisseurs statiques : définition et exemples \(automation-sense.com\).](https://automation-sense.com)
- [27] Bennaceur Y. 2015. Commande d'un convertisseur CA/CC et contrôle par différentes techniques », mémoire de master, UNIVERSITE D'EL- OUED.
- [28] [Redresseur : définition et explications \(techno-science.net\).](https://techno-science.net)
- [29] Cherrati N. 2020. Optimisation des pertes de commutation d'un hacheur survolteur boost,mémoire de master ,Universiter Saad Dahlab de Blida.
- [30] Babai H B. 2019. Commande non linéaire d'un convertisseur multicellulaire, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra.
- [31] B. Abdelkader. 2009. Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph, Memoire de magister, Universite Ferhat Abbas de Setif.
- [32] <https://sites.uclouvain.be/>
- [33] <https://www.electronique-mixte.fr/>
- [34] Mechaouf M L. 2019. Gradateur monophasé et triphasé, modélisation et application, Mémoire master, Université Badji Mokhtar- Annaba.
- [35] <https://physicsup13.blogspot.com/>
- [36] Zemouri A. 2014. Etude Experimentale D'un Convertisseur Dc/Dc Controler Par Une Commande Robuste, Mémoire de Magister, Universite de Batna.

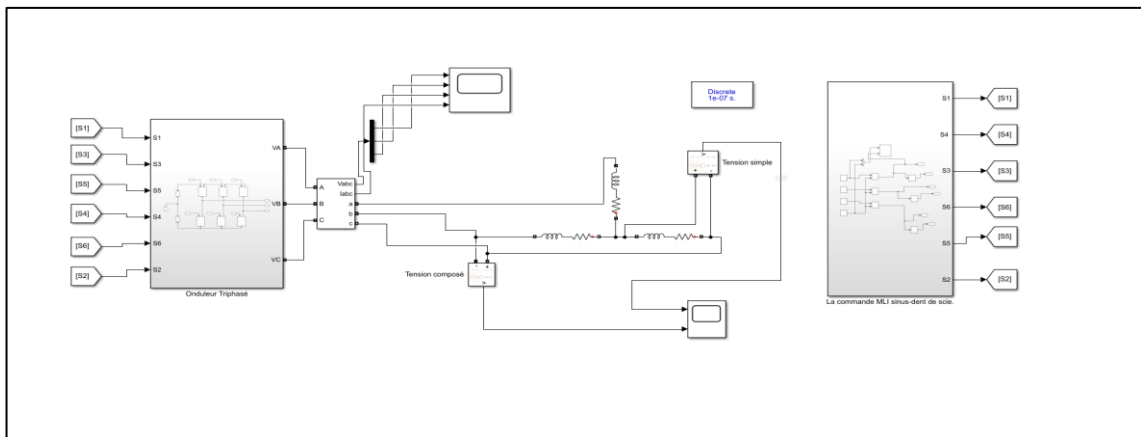
- [37] Boudouh T, Khelif N R. 2020. Montages hacheurs et ses applications, Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra.
- [38] Hanoun B. « étude et réalisation d'un hacheur Boost destine à l'implémentation des commandes à base de DSP ». Mémoire de magister, Université DE OUM EL BOUAGHI.
- [39] Nettari Y. 2014. « Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC ». Mémoire de magister, université Ferhat Abbas. Setif1.
- [40] Chihi T, Modulation en Largeur d'Impulsion(MLI) Pulse Width Modulation(PWM), Mastère de Recherche en Automatique, Robotique et Traitement de l'information (ARTI), (<https://fr.scribd.com/document/330333834/Modulation-en-Largeur-de-Impulsion-MLI>)
- [41] Bensalah W, Boutaleb N H. 2016. Etude de la commande des redresseurs MLI; Projet de fin d'études; Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [42] Ayachi Z, Djotni K. Etude et simulation d'un onduleur de tension triphase;
- [43] Bahi A; Djedidi M R. 2017. Commande d'un Onduleur Triphasé par Différentes Techniques MLI en Utilisant la Carte DSPACE ; mémoire fin etude ; Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.
- [44] Saidi A et Rachedi T. 2016. Contrôle direct de puissance d'un redresseur triphasé à MLI ; Mémoire de Fin d'Etudes ; Universite Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [45] Chebabi K. 2019. Etude d'une loi de commande En Courant par hystérésis à bande Adaptative pour un onduleur de tension ; mémoire fin étude ; Université Mohamed Khider de Biskra.
- [46] Adjimi N et Belaidi W. 2009. Modélisation et commande d'un onduleur MLI, Mémoire de fin d'études, Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi.
- [47] Salah, O. K. B. A., and B. E. D. D. I. A. R. Walid. Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI. Diss. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2019.
- [48] Schneider Electric, Wiki Installation Electrique, «Définition des harmoniques», [en ligne], mise à jour : 20 mais 2020, [consulté : 04/07/2020].
- [49] Schneider Electric, « Détection et filtrage des harmoniques », Guide expert basse tension, n°4, France, juin 2009, 45 pages, pdf, [consulté : 03/07/2020].
- [50] Bensalah.W, Boutaleb.N.H, « Etude de la commande des redresseurs MLI,Mémoire fin etude, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent,2016.

- [51] AICHE. M; FRARSA.S , « Contrôle du Convertisseur à MLI Coté Réseau Electrique », MÉMOIRE fin etude, Université de Médéa ,2012.
- [52] Sofiane.B, Ouahiba.H, « Commande en tension et analyse de stabilité d'un redresseur triphasé à MLI ». Mémoire de fin d'étude. Université Mouloud Mammari de Tizi Ouzou, 2015.
- [53] Megherbi. H,Hamri.S , « Etude et modélisation des convertisseurs statiques destinés a améliorer la qualité de l'énergie électrique,mémoire fin etude »,Université Dr.Tahar Moulay de saida,2016.
- [54] BOUAFIA. A, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI », Thèse de Doctorat Université FERHAT ABBAS –SETIF ,2010.
- [55] DEBBA.S, « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne à base d'un générateur synchrone à aimants permanents" », MEMOIRE DE FIN D'ETUDES, UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET, 2016.
- [56] HARITZA .C « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003. Algérie.
- [57] SAHAROU. M , GHRISSI. Y , LAMMARI. A et LAMMARI. A ; « Etude et Réalisation de l'association (Générateur synchrone– Convertisseur statique) » ; Mémoire de Fin d'Étude ; Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued ; 2022.

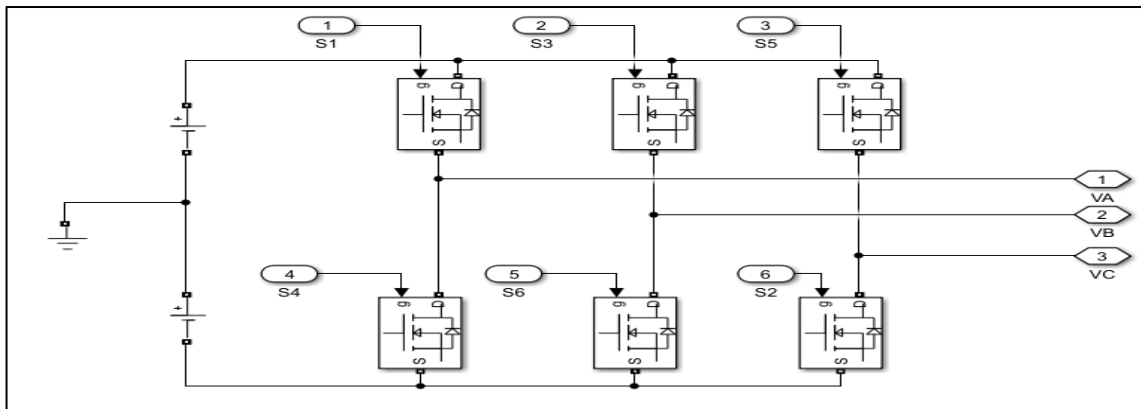
# Annexe

➤ Paramètres de simulation

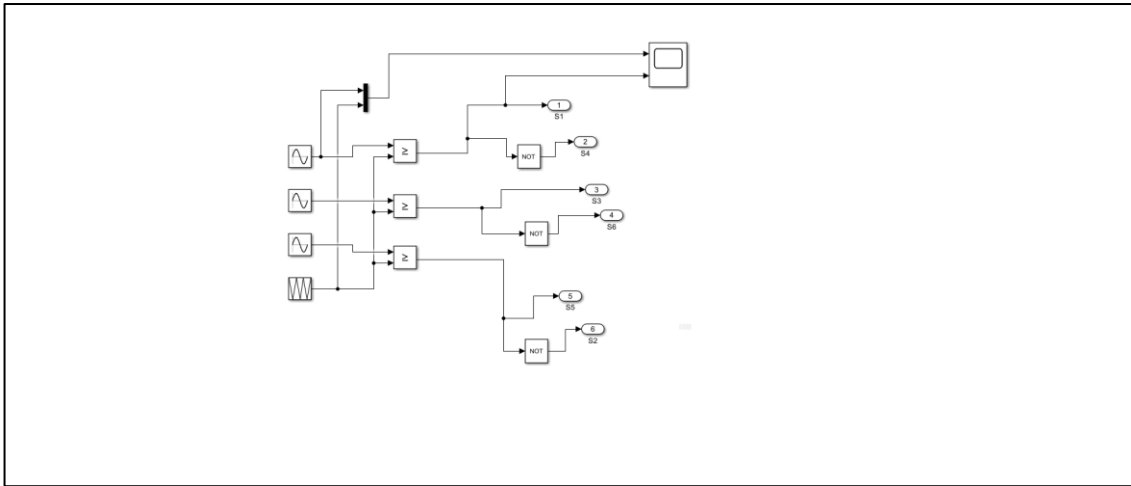
Onduleur triphasé	Redresseur triphasé
DC voltage = 400 V	$E_{\text{max}}$ (Tension maximale du réseau) = $V\sqrt{2}$ v
R = 5 Ohm	F (fréquence de réseau) = 50 Hz
L = 0.001 H	R(résistance de filtre) = 1 Ohm
Fp(la fréquence de porteuse) = 1kHz	L(Inductance du filtre) = 0.008 H
	C(Capacitédubus continu)= $3300*10^{(-6)}$ F
	Rch (résistance de charge) = 80 ohm
	Fw (Fréquence de la MLI)=50 Hz



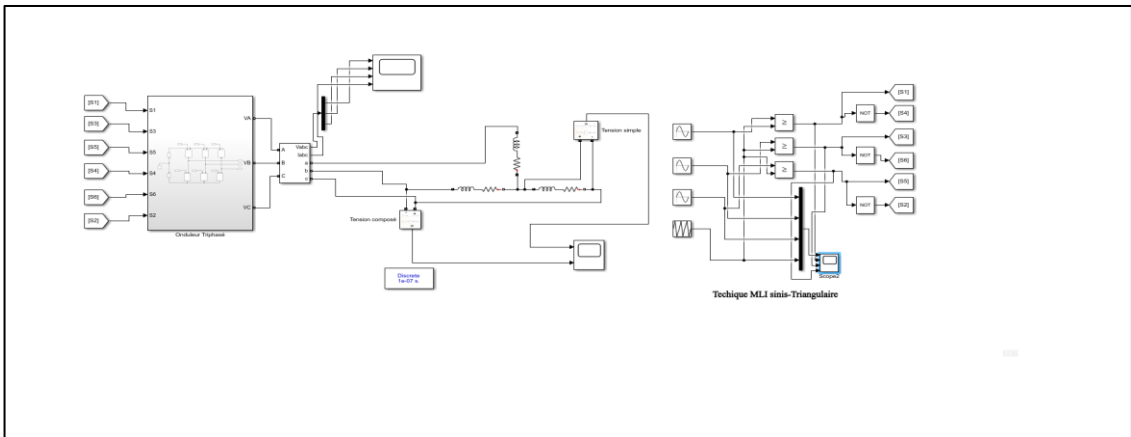
**Figure 1 :** simulation de commande MLI SINUS-DENT DE SCIE d'onduleur triphasé.



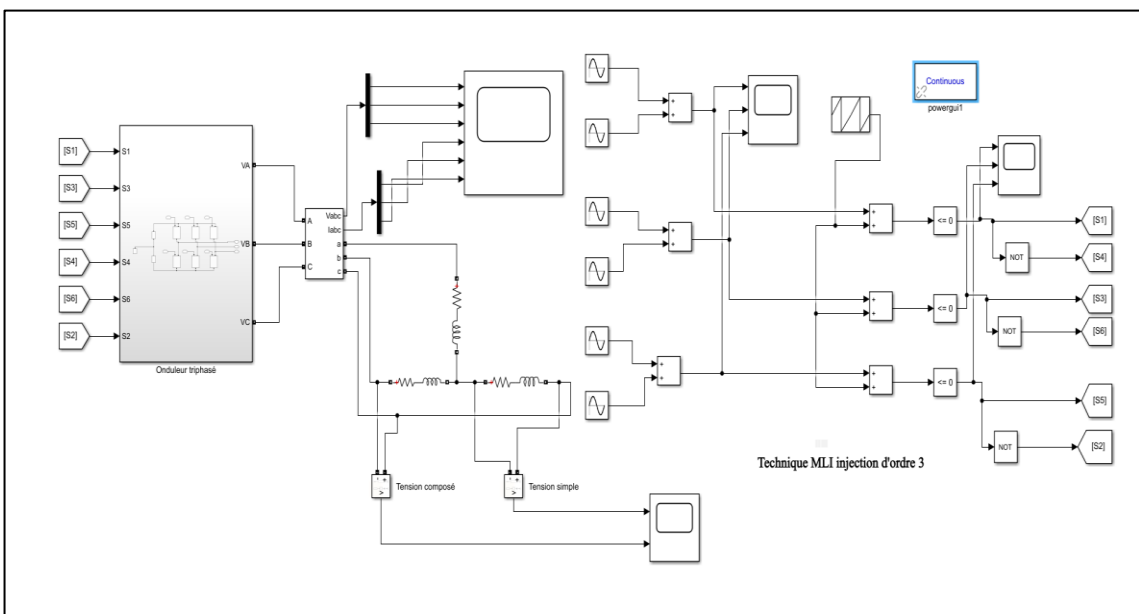
**Figure 2 :** Schéma de bloc Onduleur triphasé.



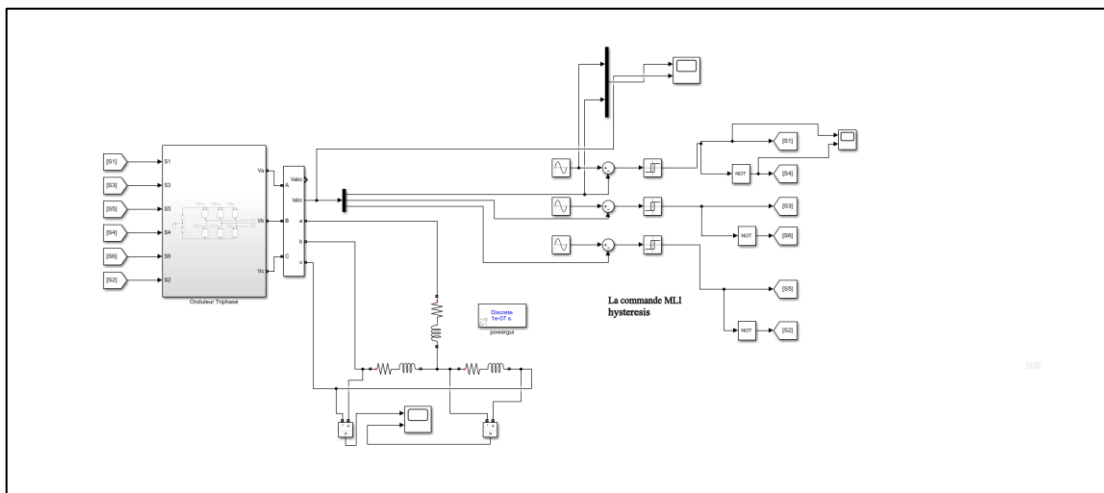
**Figure 3 :** Schéma de bloc commande MLI SINUS-DENT DE SCIE.



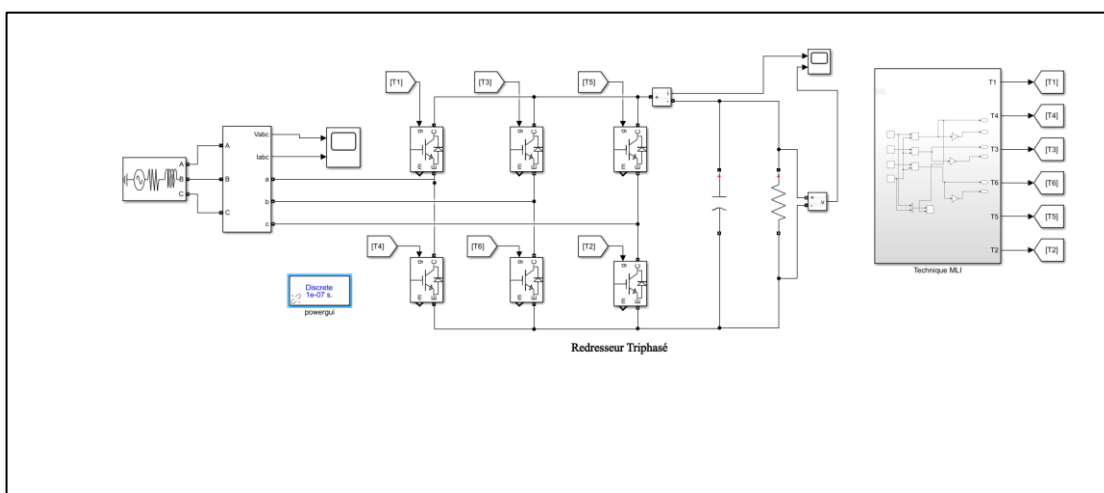
**Figure 4:** Simulation la commande MLI sinus-triangulaire.



**Figure 5 :** Simulation de la commande MLI par injection harmonique d'ordre 3 dans la référence.

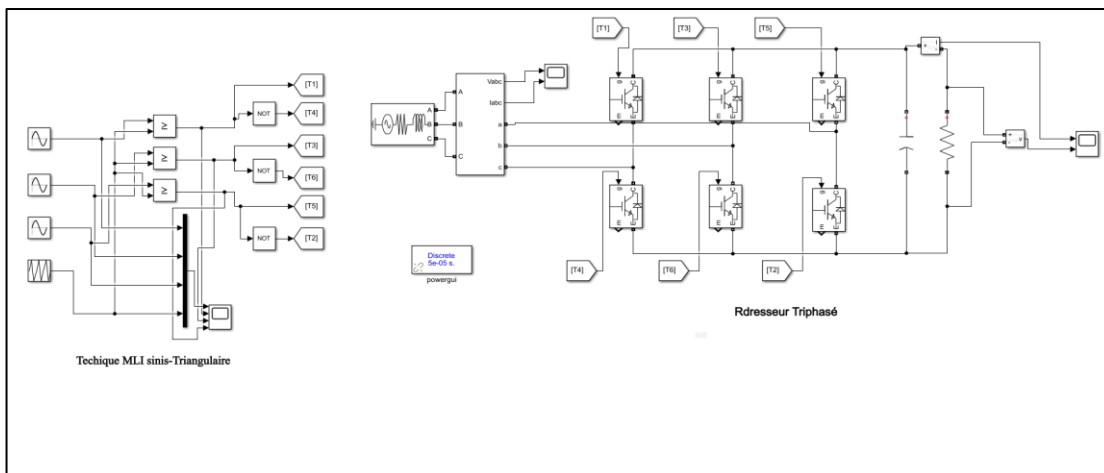


**Figure 6 :** Simulation d'un onduleur triphasé par la technique MLI hystérésis.

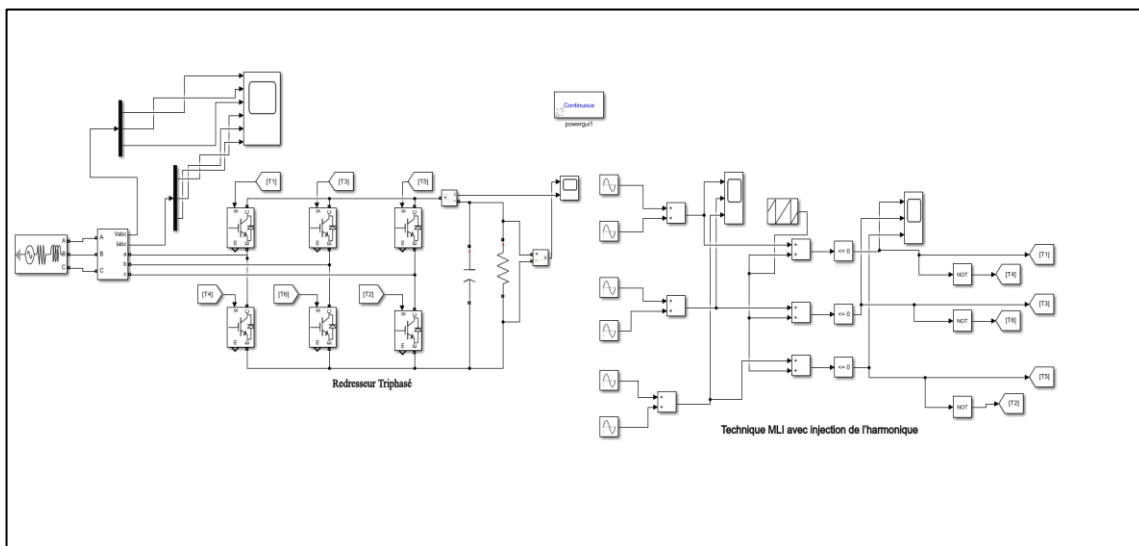


**Figure 7 :** Résultat de la commande MLI SINUS-DENT DE SCIE d'un redresseur triphasé.

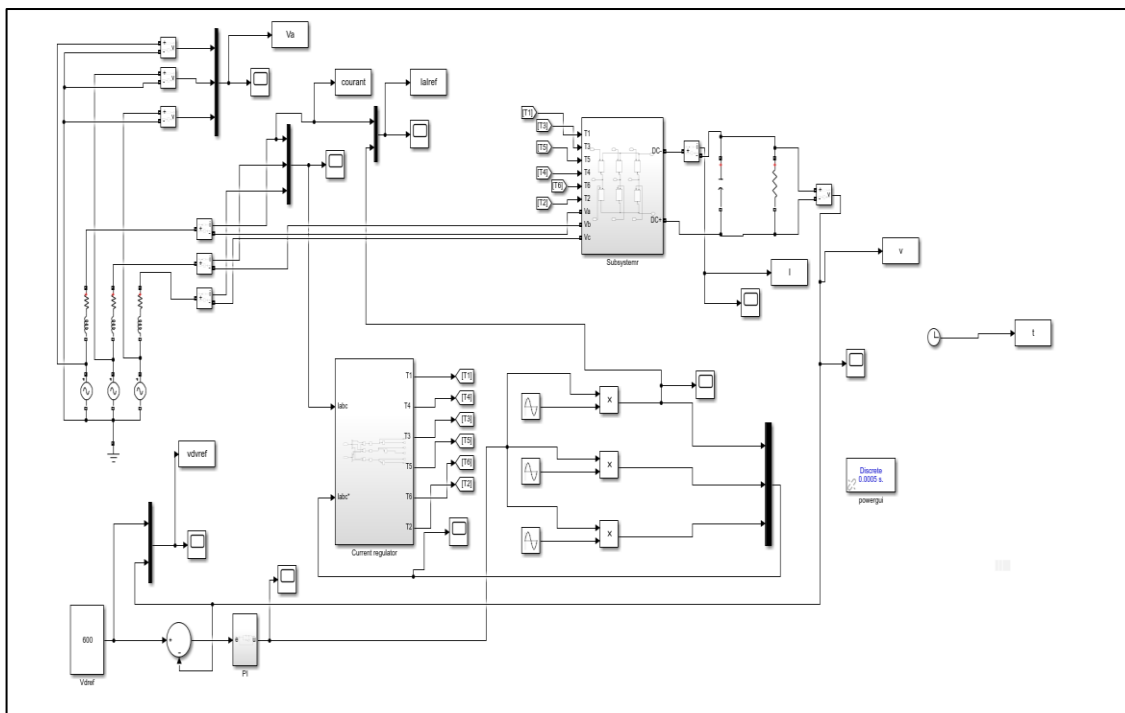




**Figure 8 :** Schéma d'un redresseur MLI sinus-triangulaire.



**Figure 9:** Schéma redresseur MLI avec injection harmonique.



**Figure 10:** Schéma d'un redresseur MLI hystérésis.

## ملخص

يتعلق العمل المقترح في هذه الأطروحة بدراسة تقنيات التحكم المختلفة بـ PWM للمحولات الثابتة (المقوم والعاكس)، والتي تعمل على تحسين جودة الطاقة في نظام الرياح. يتكون هذا العمل من ثلاثة فصول: في الفصل الأول سأقدم لمحة عامة عن الطاقات المتجددة والمحولات الساكنة. وفي الفصل الثاني، نمذجة المحولات الساكنة المرتبطة بتقنيات التحكم المختلفة في PWM. في الفصل الأخير، محاكاة المحولات الثابتة باستخدام برنامج MATLAB-SIMULINK.

**الكلمات المفتاحية:** التحكم بواسطة PWM، المحولات الساكنة (المقوم والعاكس)، الطاقات المتجددة، THD

وMatlab-simulink

## Résumé

Le travail proposé dans cette thèse concerne l'étude de différentes techniques de commande MLI pour les convertisseurs statiques (redresseur et onduleur), qui ont à améliorer la qualité de l'énergie dans le système éolien. Ce travail se compose de trois chapitres : Dans le premier chapitre, je vais présenter une généralité sur les énergies renouvelables et les convertisseur statiques. Dans le deuxième chapitre, modélisation des convertisseurs statiques associer aux différents technique de commande MLI. Dans le dernier chapitre, la simulation des convertisseurs statiques à l'aide de logiciel MATLAB-SIMULINK.

**Mots clés :** Commande par MLI, les convertisseur statiques (redresseur et onduleur) , les énergies renouvelables, THD et Matlab-simulink.

## Abstract

he work proposed in this thesis concerns the study of different PWM control techniques for static converters (rectifier and inverter), which have to improve the quality of energy in the wind system. This work is made up of three chapters: In the first chapter, I will present a general overview of renewable energies and static converters. In the second chapter, modeling of static converters associated with different PWM control techniques. In the last chapter, the simulation of static converters using MATLAB-SIMULINK software.

**Keywords:** Control by PWM, static converters (rectifier and inverter), renewable energies, THD and Matlab-simulink.