

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commandes Electriques  
Thème

**L'impact des émissions électromagnétiques engendrées par des  
onduleurs dans un circuit électronique**

**Présenté Par :**

- 1) Melle. ERROUANE NARDJES
- 2) Mme. BENSALAH SOUMIA INES

**Devant le jury composé de :**

Mr. Ayache Zouaoui	M A A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Pr. Zelmat Samir	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. Benazza Baghdadi	M C A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

*Année universitaire 2021/2022*

# *REMERCIEMENT*

# REMERCIEMENT

*Un palier si important dans nos études à l'université d'Ain Temouchent "Belhadj Bouchaïb", au sein du département d'Électrotechnique ; Faculté de la Génie Électrique ; en l'occurrence le projet de fin d'étude résumant ainsi cinq années d'études universitaires entourées d'éminents enseignants. En cette circonstance si particulière, liée à nous parcours universitaire et plus précisément à nous projet de fin d'étude, nous sommes dans le besoin et l'obligation d'exprimer nous sincères sentiments de remerciements et de gratitude, à l'endroit de toutes les personnes qui nous encadrées soutenues et orientées afin d'arriver à bout de nos efforts. Leur présence à nous côtés était l'issue incontournable et la base même de cette expérience dans la recherche et la dissertation.*

*Nous première pensée va tout d'abord à l'endroit de la personne du professeur BAGHDADI BENZAÏA ; nous encadrant, qui par sa générosité, sa patience et son irréprochable pédagogie a su nous transporter dans cette expérience intellectuelle. Il a été la source de nous inspiration et l'énergie pour nous endurance.*

*Nous exprimons toutes nous gratitude à Mr. Ayache Zouaoui, d'avoir honoré en présidant le jury de notre soutenance.*

*Nous s'adressons aussi nous sincères remerciements à Mr. Zelmat Samir d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous remerciements aux personnels des différents établissements : UAT.*

*Avant de parachever cette attention à l'égard de toutes ces personnes si chères citées ci - dessus, nous tiens à leur exprimer aussi nous profonde reconnaissance pour leur dévouement à l'égard de nos personnes, et que sans eux notre projet n'aurait jamais pu être achevé avec autant de satisfaction et de plénitude.*

« QUE DIEU VOUS BENISSE »

LES POSTULANTES

ERROUANE NARDJES.

BENSALAH SOUMIA INES.

*Dédicace*

*Durant tout mon parcours scolaire, je suis passée par des hauts et des bas, et grâce à dieu j'ai pu enfin achever mon cursus.*

*Mon choix s'est porté sur l'électrotechnique sans enthousiasme, mais lors de mon inscription j'ai tout de suite compris que c'était ça ma voie. Je dédie ce mémoire :*

*A mon très cher père, Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, e voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension... Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Je t'aime papa*

*A ma très chère mère, Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement. Je t'aime maman.*

*A mes deux frères HĀBĪB, ABD EL MADJID et ma sœur FOUZIA, auxquels j'exprime mon amour.*

*A mes grand-mères maternelles et paternelles Je vous dédie ce travail pour vos attentions particulières, vos prières et votre amour inconditionnel, que Dieu vous donne bonne santé et longue vie parmi nous.*

*A mes tantes et oncles paternels et leurs conjoints*

*A mes tantes et oncles maternels et leurs conjoints*

*A mes cousins et cousines*

*Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.*

*A mn oncle maternelle, merci pour ton soutenu, réconforté et encouragé durant cette période de travail, merci beaucoup.*

*A toute la famille ERROUANE sans exception.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnait durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis, toi FATIMA, WIEMME.*

*A mes chers (es) ami (es) qui m'ont toujours soutenu et encouragé.*

*A mon binôme SOUMIA et toute la famille BENSALAH.*

*A mon encadrant qui m'a suivi minutieusement dans mon travail et m'a orienté dans ma démarche de recherche et m'a même assuré un stage qui m'a permis de me former afin de réaliser l'approche de mon étude ; mes remerciements les plus sincères.*

*A tous mes enseignants du primaire, moyen, secondaire et universitaire qui m'ont transmis leur savoir pour devenir ce que je suis maintenant, trouvez ici ma gratitude et ma reconnaissance.*

*A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

**ERROUANE NARDJES**

*Dédicace*

*Tous d'abord, je remercie le bon <Dieu> le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la volonté et la force afin d'accomplir ce travail ainsi que l'audace de passer à travers toutes les épreuves durant ces longues années d'études*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, Je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A L'homme. Ma précieuse offre du dieu. Qui doit ma vie réussite et tout mon respect. Mon cher père*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir. Qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui ne m'épargner aucun effort pour me rendre heureuse. Mon adorable mère, la nommé femme en fer*

*A mon ange, mon confident, à mon soutien morale et physique  
Mon mari Med jallel batouchi*

*A mon petit rêve que j'attends avec impatience pour qu'il soit exaucé et comblé ma vie de joie et de bonheur et de courage inshallah.*

*A mes chers frères Zaki et Youcef et leurs femmes Soria et hannen sans oublier le petit ange Abd el Aziz et Karima, Wiem mes petites nièces qui n'ont pas cessé de m'encourager à faire plus.*

*A ma cher sœur Ikhlase et son mari mon frère Mehdi qui n'ont pas cessé de me conseiller, m'encourager et soutenir tout au long de mes études que dieu les protéger et leur offre la chance et le bonheur avec leur petites princesses Ambre, Djena, Tesnim.*

*A l'adorable ma petite sœur khawla qui soit toujours comment procuré la joie et le Bonheur pour toute la famille.*

*A mes grands-parents, mes oncles et mes tantes paternelle et maternelle et leur enfant.*

*Que dieu leur donner un paie au paradis et longue et joyeuses vie*

*A toutes mes cousins et mes cousines et les amis que j'ai connus jusqu'à maintenant nardjes, wieme, Imen, Nesrine, Nadia, radjaa, abir*

*Sans oublier mon binôme et ma chère amie ERROUANE NARDJES pour sans soutien morale, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

**BENSALAH SOUMIA INES**

# *SOMMAIRE*

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I :

### *Généralités sur la Compatibilité Électromagnétique(CEM)*

I.1. Introduction.....	3
I.2. Un peu d'historiques.....	4
I.3. Définition de la CEM.....	4
I.6.1.Champ électrique, champ magnétique et champ électromagnétique.....	5
I.4. Tests de performance.....	6
I.4.1. Testes d'immunité.....	6
I.4.2. Testes d'émissions.....	6
I.5. Décomposition d'un problème de CEM.....	7
I.5.1. Les sources de perturbations.....	7
I.6. Classifications des perturbations.....	8
I.6.1. Mode de couplages (Mode commun et différentiel).....	9
I.6.1.1. Modes commun.....	9
I.6.1.2. Modes différentiel.....	10
I.6.2.Types de couplages.....	10
I.6.2.1. Couplage par conduction.....	10
I.6.2.1.1. Liaison directe ou perturbations directement conduites.....	11
I.6.2.1.2. Impédance commune.....	11
I.6.2.2. Couplage par rayonnement.....	11

I.6.2.2.1. Couplage Champ proche.....	11
I.6.2.2.2. Couplage inductive.....	12
I.6.2.2.3. Couplage capacitif.....	12
I.6.2.2.4. Couplage champ lointain.....	13
I.6.2.2.5. Couplage par ionisation.....	14
I.6.3. La victime ou perturbé.....	14
I.7. Dispositifs de mesure des perturbations.....	14
I.7.1. Le RSIL.....	14
I.8. La CEM dans électronique de puissance.....	16
I.8.1. Pourquoi la CEM en électronique de puissance ?.....	16
I.8.2. Les causes des perturbations en électroniques de puissance.....	16
I.8.3. Etendue spectrale du bruit dans les convertisseurs statiques.....	17
I.8.4. Sources de bruit : la cellule de commutation et sa commande.....	17
I.8.5. Origine des perturbations conduites et rayonnées dans les convertisseurs Statiques.....	18
I.9. Les normes de la CEM.....	18
I.10. Techniques de protection en CEM.....	19
I.10.1. Blindages.....	19
I.10.2. Filtrages.....	20
I.10.3. Torsadage.....	20
I.11. Conclusion.....	20

## **CHAPITRE II**

### *Généralité et modélisation des convertisseurs DC/AC*

II.1. Introduction.....	22
II.2. Les convertisseurs statiques.....	23
II.2.1. Définitions.....	23
II.2.2. Composant de l'électronique de puissance.....	24
II.2.2.1. Diodes.....	24
II.2.2.2. Thyristor.....	24
II.2.2.3. Transistor (bipolaire-MOSFET).....	24
II.3. Classification des convertisseurs statiques.....	25
II.3.1. Le redresseur.....	26
II.3.1.1. Définition.....	26
II.3.1.2. Les différents types.....	26
II.3.2.3. L'utilisation d'un redresseur.....	27
II.3.2. Le gradateur.....	27
II.3.2.1. Définition.....	27
II.3.2.2. Les types de gradateur.....	27
II.3.2.3. L'utilisation d'un gradateur.....	27
II.3.3. Le hacheur.....	28
II.3.3.1. Définition.....	28
II.3.3.2. Les type d'un hacheur.....	28
II.3.3.3. L'utilisation d'un hacheur.....	28
II.3.4. L'onduleur.....	28
II.3.4.1. Définitions.....	28
II.3.4.2. Les type d'onduleur.....	29
II.3.4.3. Les applications d'un onduleur.....	29
II.4. L'étude d'un convertisseur DC/AC (Onduleur).....	29
II.4.1. Onduleur monophasé.....	29
II.4.1.1. Pull push.....	30
II.4.1.2. En pont.....	30
II.4.1.3. Demi- pont.....	31

II.4.1.4. Fonctionnement on MLI.....	32
II.4.2. Onduleur triphasé.....	33
II.4.2.1. Onduleur à onde rectangulaire.....	34
II.4.2.2. Onduleur à modulation de largeur d'impulsion.....	35
II.4.2.3. Fonctionnement en commande MLI.....	35
II.5. Modélisations des onduleurs.....	36
II.5.1. Modélisation de MLI.....	36
II.5.1.1. Modélisation bipolaire.....	36
II.5.1.2. Modélisation unipolaire.....	38
II.6. Conclusion.....	41

## **CHAPITRE III**

### *Simulation des perturbations électromagnétiques d'un convertisseur statique DC/AC*

III.1. Introduction.....	42
III.2. Définition.....	42
III.3. Présentation.....	43
III.3.1. Dessin de circuit.....	45
III.3.2. Effectuer une simulation.....	46
III.4. Onduleur monophasé en pont H.....	46
III.5. Simulation.....	47
III.5.1. Sans RSIL.....	47
III.5.1.1. Sans filtre.....	47
III.5.1.1.1. Principe de fonctionnement.....	47
III.5.1.2. Avec le filtre.....	50
III.5.2. Simulation MLI (sinus-triangulaire).....	53

III.5.2.1. Principe de fonctionnement.....	53
III.5.3. Avec RSIL Avec Filtre .....	55
III.5.3.1. La réponse temporelle.....	56
III.5.3.2. La réponse fréquentielle.....	57
III.5.4. Avec RSIL sans Filtre.....	58
III.5.4.1. La réponse temporelle.....	58
III.5.4.2. La réponse fréquentielle.....	59
III.5.4.3. La réponse temporelle de RSIL.....	60
III.5.4.4. La réponse fréquentielle de RSIL.....	61
III.6. Conclusion.....	62

## **CHAPITRE IV**

### *Etude expérimentale sur PEM d'un onduleur en pont H*

IV.1. Introduction.....	64
IV.2. Définition d'un AURDUINO-UNO.....	64
IV.3. Réalisation.....	64
IV.4. Résultats.....	69
IV.5. Comparaison des résultats temporels.....	70
IV.5.1. Avant le filtrage.....	71
IV.5.2. Après le filtrage.....	72
IV.6. Conclusion.....	72
CONCLUSION GENERALE.....	73
BIBLIOGRAPHIE	

## *Tables des figures*

# *Tables des figures*

## **CHAPITRE I**

Figure I.1 : différence entre champ électrique et magnétique.....	3
Figure I.2 : Niveaux de perturbation en CEM.....	4
Figure I.3 : Méthode générale d'analyse de la CEM.....	5
Figure I.4 : classifications des sources de perturbations.....	6
Figure I.5 : Récapitulatif des différents modes de couplage.....	7
Figure I.6 : le mode commun.....	7
Figure I.7 : le mode différentiel.....	8
Figure I.8 : couplage par impédance commun.....	9
Figure I.9 : diaphonie inductive.....	10
Figure I.10 : diaphonie capacitive.....	10
Figure I.11 : couplage par rayonnement.....	11
Figure I.12 : émission champ électrique.....	11
Figure I.13 : émission champ magnétique.....	11
Figure I.14 : photos d'un RSIL.....	13
Figure I.15 : schéma de principe d'un RSIL monophasé.....	13
Figure I.16 : Principe de la mesure des perturbations.....	13
Figure I.17 : Répartition spectrale des bruits électromagnétiques dans un convertisseur statique.....	15
Figure I.18 : Cellule de commutation et formes d'ondes associées.....	15
Figure I.19 : Origine et mode de couplage des perturbations électromagnétiques d'un convertisseur statique.....	16
Figure I.20 : principales normes européennes en matière de CEM.....	17
Figure I.21 : Blindage ou écran électromagnétique (a) Contenir les émissions rayonnées ; (b) exclure les émissions rayonnées.....	17
Figure I.22 : filtrages.....	18
Figure I.23 : Diminution du champ magnétique par le principe de torsadage.....	18

## **CHAPITRE II**

Figure II.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance...21	21
Figure II.2 : Architecture générique d'un convertisseur statique.....	21
Figure II.3 : symbole de diode.....	22
Figure II.4 : symbole de thyristor.....	22

Figure II.5 : symbole de transistors bipolaire.....	23
Figure II.6 : symbole de transistors MOSFET.....	23
Figure II.7 : Schéma de principe de la conversion alternatif – Continu.....	24
Figure II.8 : schéma de redresseur non commandé.....	24
Figure II.9 : schéma de redresseur commandé.....	24
Figure II.10 : Schéma de principe de gradateur.....	25
Figure II.11 : schéma de principe de hacheur.....	26
Figure II.12 : schéma de principe d'un onduleur.....	27
Figure II.13 : onduleur monophasé.....	28
Figure II.14: Onduleur push-pull.....	28
Figure II.15 : Schéma de principe de l'onduleur en Pont.....	29
Figure II.16 : Principe d'un onduleur en demi-pont.....	29
Figure II.17 : schéma démontre les différentes fluctuations de tentions par rapport au temps.....	30
Figure II.18 : Principe du schéma de commande pour la MLI.....	30
Figure II.19 : Forme d'onde pour un onduleur monophasé fonctionnant en MLI.....	31
Figure II.20 : Structure d'un onduleur triphasé.....	32
Figure II.21 : Construction des chronogrammes des tensions composées.....	32
Figure II.22 : Forme d'onde pour un onduleur triphasé fonctionnant en MLI.....	33
Figure II.23 : Courbes et schémas MLI.....	34
Figure II.24 : Circuits analogiques pour modulation bipolaire dans le logiciel LTSpice.....	35
Figure II.25 : Reprise de la modulation bipolaire.....	35
Figure II.26 : Formes d'ondes principales de modulation bipolaire.....	36
Figure II.27 : Circuits analogiques pour modulation unipolaire dans le logiciel LTSpice.....	36
Figure II.28 : Résumé de la modulation unipolaire.....	37
Figure II.29 : Principales formes d'onde de modulation unipolaire.....	38
Figure II.30 : Forme d'onde de sortie avec modulation bipolaire (haut) et modulation unipolaire.....	38
Figure II.31 : Forme d'onde de sortie avec modulation bipolaire (haut) et modulation unipolaire .....	39

## **CHAPITRE III**

Figure III.1 : LTspice une fois lancé.....	42
Figure III.2 : les commandes disponibles sur Ltspice.....	42
Figure III.3 : les symboles de la barre d'édition.....	44

Figure III.4 : symbole de résistance.....	44
Figure III.5 : modifier les valeurs de composants.....	44
Figure III.6 : attachement des résistances.....	45
Figure III.7 : schéma coumplet après le placement des composants.....	45
Figure III.8 : Onduleur en pont H.....	46
Figure III.9 : L'allure de la tension au borne de la charge.....	46
Figure III.10 : la tension d'un onduleur.....	46
Figure III.11 : schéma d'onduleur sans filtre sous LTSPICE.....	46
Figure III.12 : la tension à la borne de la charge sans filtre.....	47
Figure III.13 : le courent au borne de la charge sans filtre.....	47
Figure III.14 : représentation fréquentiel de la tension aux bornes de la charge sans filtre.....	48
Figure III.15 : représentation fréquentiel de courant au borne de la charge son filtre.....	49
Figure III.16 : schéma de l'onduleur avec filtre LC sur LTSPICE.....	49
Figure III.17 : tentions au borne de la charge avec le filtre LC.....	50
Figure III.18 : courant au borne de la charge avec le filtre LC.....	50
Figure III.19 : représentation fréquentiel de la tension au borne de la charge avec le filtre LC.....	51
Figure III.20 : représentations fréquentiel de courant de la charge avec le filtre LC.....	51
Figure III.21 : schéma de la fonction triangulaire sous LTSPICE.....	53
Figure III.22 : le schéma de la fonction sinusoïdale sur ltspace.....	53
Figure III.23 : schéma de deux tensions sinusoïdales et triangulaires sous LTSPICE.....	54
Figure III.24 : schéma d'onduleur avec RSIL.....	54
Figure III.25 : la tension au borne de la charge avec RSIL.....	55
Figure III.26 : le courant au borne de la charge avec RSIL.....	55
Figure III.27 : représentation fréquentiel de tension au borne de la charge avec RSIL.....	56
Figure III.28 : représentation fréquentiel de courant au borne de la charge avec RSIL.....	56
Figure III.29 : la réponse temporelle de tension RSIL.....	57
Figure III.30 : La réponse temporelle du courant RSIL.....	57
Figure III.31 : la tension fréquentielle de RSIL.....	58
Figure III.32 : le courant fréquentielle de RSIL.....	58

## CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Photo de la carte Arduino-Uno.....	61
--	----

Figure IV.2 : Image du banc de test de l'onduleur.....	61
Figure IV.3 : ARDUINO + Inverseur.....	62
Figure IV.4 : les signaux de l'arduino.....	62
Figure IV.5 : test d'INVERSEUR.....	63
Figure IV.6 : signales de sortie des deux portes inverseurs avec les deux entrés en MLI d'ARDUINO.....	63
Figure IV.7 : Banc expérimentale.....	64
Figure IV.8 : signales de sortie de la porte de Driver.....	64
Figure IV.9 : la partie commande et puissance d'onduleur.....	65
Figure IV.10 : la partie commande.....	65
Figure IV.11 : la partie puissance.....	65
Figure IV.12 : Image du résultat du banc de test d'onduleur.....	66
Figure IV.13 : la tension de sortie de l'onduleur d'amplitude 5V.....	66
Figure IV.14 : la tension de sortie de l'onduleur d'amplitude 10V.....	67
Figure IV.15 : Résultat expérimentale.....	67
Figure IV.16 : Résultat en simulation.....	67
Figure IV.17 : Résultat en simulation du signal sinusoïdal.....	67
Figure IV.18 : Résultat en simulation.....	68
Figure IV.19 : Résultat expérimentale.....	68
Figure IV.20 : Résultat simulation.....	69
Figure IV.21 : Résultat expérimentale.....	69

## *LISTE DES TABLEAUX*

Tableaux II.1 : présentation les différent types des convertisseurs et Certains leurs caractéristiques...	25
Tableau II.2 : principe d'ouverture et fermeture des interrupteur.....	31

# *Introduction Générale*

## Introduction Générale

Le développement par les fabricants d'électronique est essentiellement caractérisé par des appareils toujours plus performants et des tailles toujours plus grandes réduire. Cette évolution rapide nécessite une remise en question permanente des méthodes de recherche conçue pour assurer le contrôle du comportement de l'appareil environnement électromagnétique difficile, c'est ce qu'on appelle la "compatibilité Électromagnétique" (CEM). [5]

La Compatibilité Electromagnétique (CEM) est l'aptitude d'un appareil électrique à fonctionner dans un environnement électromagnétique déterminé sans être perturbé et sans perturber les autres équipements avoisinants. Par conséquent, il doit avoir à la fois un niveau d'immunité ou "susceptibilité" suffisamment élevé et un niveau d'émission relativement réduit. Par extension, la CEM est devenue le nom de la partie des sciences qui étudie l'ensemble des perturbations électromagnétiques : depuis leurs sources (par exemple l'étude de la foudre et des champs électromagnétiques qu'elle induit), en passant par l'étude des moyens de propagation des perturbations, l'étude des couplages, jusqu'à l'étude des appareillages et de leurs niveaux de perturbations. [1]

Les normes couvrent différents aspects : elles fixent les seuils minimum de perturbations devant être supportés sans dysfonctionnement, par la définition de signaux de forme et d'amplitude reproduisant l'environnement électromagnétique réel et qui sont utilisés lors des tests de susceptibilité. Elles limitent le niveau maximum des perturbations pouvant être générés en fonction du type d'appareillages, ainsi que les conditions de mesure à respecter lors des tests de compatibilité. [2]

Il est par ailleurs nécessaire de mieux prendre en compte la CEM lors de la conception, car plus un produit approche de sa phase finale, plus le coût de la CEM augmente s'il est presque gratuit d'appliquer de bonnes règles de câblage, il est par contre très onéreux de devoir blinder un produit fini ! Il est également important de penser CEM lors de la conception, afin de réduire le volume des filtres à utiliser surtout lorsqu'il est question des systèmes embarqués. [2]

Le fonctionnement d'un convertisseur statique est intrinsèquement polluant, les grandeurs électriques étant fortement variables à cause de leurs commutations rapides, sur des durées très courtes (1 $\mu$ s à 10 ns), avec des fortes amplitudes (de l'ordre du kilo Volt et du kilo Ampère) et des fréquences pouvant être élevées (100 Hz à 1 MHz).

Plus que leurs amplitude, ce sont surtout les dérivées de ces grandeurs qui sont à l'origine des perturbations électromagnétiques. En effet, tous les phénomènes de couplages opèrent proportionnellement à la dérivée d'une grandeur électrique [1]. L'analyse de la tension de sortie des convertisseurs suppose généralement les composants semi-conducteurs de puissance de parfaits interrupteurs. Si en basses fréquences cette supposition est acceptable, en hautes fréquences, la commutation provoque certains effets dont il faut tenir

compte. Parmi ces effets on peut citer : le rayonnement des convertisseurs et les courants du mode commun à travers les capacités parasites. [1]

Dans notre travail, nous nous intéressons à la famille des convertisseurs continu-alternatif ou DC-AC. Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la conversion de l'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternée (AC).

L'onduleur est l'un des montages les plus répandus de l'électronique de puissance, on trouve ces convertisseurs dans de nombreuses applications à différents niveaux de puissance, Par exemple, les alimentations de secours, les alimentations sans interruption, le raccord des panneaux solaires au réseau électrique, les nombreux dispositifs nécessitant de fonctionner à une fréquence spécifique. [3]

Les travaux que nous avons réalisés sont présentés et structurés en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente des généralités sur la Compatibilité Electromagnétique : sources, victimes et moyens de propagation et aborde la normalisation : les différentes références de normes CEM, leur contenu et leur mise en œuvre.

Le deuxième chapitre contient une partie consacré aux généralités sur les convertisseurs statiques, et une autre partie concerne les onduleurs, ses types, ses principes de fonctionnement, en plus on fera une modélisation d'un seul type d'onduleur en pont H (modélisation de MLI), on va étudier et modéliser tous qui est concerné de la modélisation par MLI.

Dans le troisième chapitre, on va faire la simulation d'onduleur monophasé en pont H parfois avec et sans filtre LC à la charge, après on place le réseau stabilisateur d'impédance de ligne RSIL. Tous les résultats de simulations sont obtenus en utilisant le logiciel « LTspice ».

Le dernier chapitre, en doit faire une petite réalisation et une étude expérimentale des perturbations électromagnétiques sur l'onduleur de types complet, et nous doit faire une comparaisent des résultats théorique et pratiques.

Enfin, Nous clôturons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives que nous jugeons nécessaire pour la continuité.

# **Chapitre I**

*Généralités sur la Compatibilité Électromagnétique(CEM)*

## Chapitre I : Généralités sur la Compatibilité Électromagnétique(CEM)

### I.1. Introduction :

Dans de nombreux domaines d'activité, l'effet des perturbations électromagnétiques sur le système électronique peut conduire à un dysfonctionnement potentiellement dangereux. En d'autres termes, tout dispositif, appareil ou système capable de fonctionner dans son environnement électromagnétique de manière satisfaisante et sans même produire de perturbation électromagnétique est susceptible de perturber gravement le fonctionnement de l'équipement ou des systèmes dans son environnement. [7]

Mais on ne peut pas empêcher complètement l'appareil de produire des ondes électromagnétiques dans son environnement, parce que presque tous les microprocesseurs peuvent émettre et un "bruit" électromagnétique, et ils peuvent également être affectés par le bruit électromagnétique d'autres appareils. [7]

Par exemple, lorsqu'un téléphone portable sonne trop près d'un écran de télévision ou de radio, les images sont perturbées et des sons indésirables sont entendus dans les haut-parleurs de l'équipement audio, et certaines vieilles cloches électriques produisent des ronflements parasites aux stations de radio à proximité...etc. C'est parce que dans le fonctionnement normal ces dispositifs produisent des champs électromagnétiques variables qui peuvent avoir des effets catalytiques sur beaucoup d'autres dispositifs électriques autour d'eux. [7]

Étant donné la prolifération des appareils électriques sur le marché, nous devons être justes, c'est-à-dire que les fabricants du monde entier doivent établir et suivre des règles précises de construction et de contrôle lors de la conception d'un dispositif qui, est susceptible de créer un niveau de perturbation qui pourrait nuire au bon fonctionnement des autres dispositifs environnants. [7]

Et c'est là qu'on peut dire, Tous les systèmes électriques et électroniques sont soumis à des perturbations qui proviennent de l'énergie parasite qui franchit d'une manière non intentionnelle leurs frontières. Cette énergie parasite est appelée perturbation électromagnétique. [8]

En s'intéressant à l'environnement électromagnétique d'un dispositif électronique, nous allons voir qu'il existe différentes sources de perturbations d'origines différentes, Les perturbations d'origines naturelles et le sources de perturbations due à l'activité humaine ,Par conséquent, nous pouvons placer deux facteurs fondamentaux dans ces situations : premièrement, la capacité de l'appareil à fonctionner dans son environnement perturbé, et deuxièmement, la capacité de l'appareil à fonctionner sans trop de perturbations dans son environnement. [8]

La Compatibilité électromagnétique est une discipline qui a pour objectif d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique, d'abord pour réduire les perturbations électromagnétiques causées par des dispositifs ou des systèmes électriques ou électroniques, deuxièmement protéger l'équipement électronique contre les perturbations électromagnétiques et enfin, réduire le lien entre le défaut et la victime. [9]

L'objectif de cette partie introductive est de définir la problématique CEM en générale. Nous chercherons tout a d'abord à comprendre l'origine et les chemins de propagation des

perturbations électromagnétique d'une manière générale. Nous parlerons pour cela de la source de perturbations et des couplages parasites.

## **I.2. Un peu d'historiques :**

Au début des années 1939, la communication radio a commencé à développer des problèmes d'interférences radio (dus aux moteurs électriques etc.).

On 1933 c'est la Création du CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) par la CEI (Commission électrotechnique internationale) qui développe des normes pour éviter les interférences. Durant la deuxième guerre mondiale, l'utilisation d'appareils électroniques (radio, navigation, radar) s'est accélérée. [8]

Beaucoup de cas d'interférences entre radios et systèmes de navigation aérienne. Le CISPR continue son activité en produisant plusieurs publications techniques présentant des techniques de mesure des perturbations, et recommandant des valeurs limites d'émissions. Plusieurs pays européens ont adopté ces valeurs limites recommandées par le CISPR. [8]

L'augmentation la plus significative des problèmes d'interférences est apparue avec l'invention des composants électroniques à haute densité, tels que le transistor bipolaire dans les années 1950, le circuit intégré dans les années 1960, et les puces à microprocesseur dans les années 1970. Par ailleurs, le spectre fréquentiel utilisé devient beaucoup plus large, ce pour subvenir aux besoins de plus en plus croissants de transmission d'information.

Due à la sensibilité de plus en plus accrue des circuits électroniques, l'American Fédéral Communications Commission (FCC) a publié en 1979 des normes limitant les émissions électromagnétiques de tous les appareils électroniques. Les valeurs limites définies par la FCC correspondent dans l'ensemble à celles recommandées par le CISPR. [9] [10]

D'après les plusieurs recherches, on 1996 la CEM entrés en vigueur de caractère obligatoire de la réglementation.

## **I.3. Définition de la CEM :**

La compatibilité électromagnétique ou CEM (en anglais, électromagnétic **compatibility** ou EMC) est la capacité de différents appareils et composants électroniques de fonctionner correctement même en présence d'autres appareils émettant des ondes électromagnétiques.

Cela signifie que chaque pièce d'équipement qui émet des ondes électromagnétiques ou des perturbations doit être limitée à un certain niveau et que chaque dispositif doit avoir une immunité suffisante aux perturbations électromagnétiques dans l'environnement dans lequel il est censé fonctionner. [10] [11]

En raison des normes, la compatibilité électromagnétique est devenue une norme très importante pour la commercialisation d'un produit électronique. Si le produit ne répond pas aux exigences de compatibilité électromagnétique d'un pays, il ne peut pas être vendu dans ce pays.

Depuis 1996, les normes CEM sont obligatoires pour les appareils électroniques. Pour cette raison, les fabricants qui souhaitent vendre leurs produits doivent étiqueter "CI" sur leurs appareils qui ont passé des tests différents. [12]

Après le développement de la technologie, la compatibilité électromagnétique dans la conception d'un dispositif ou d'un système électronique est devenue une norme de conception importante comme d'autres normes de conception traditionnelles.

Pour être compatible, un appareil ou un système ne doit pas envoyer beaucoup de perturbations, et être en mesure de fonctionner correctement même si "un" ou "plusieurs" dispositifs génèrent des perturbations dans les voisinages.

On peut dire aussi qu'Une bonne compatibilité électromagnétique décrit un état de « bon voisinage électromagnétique » c'est à dire :

- Limiter le niveau des émissions non désirées provenant de l'appareil, afin de ne pas perturber la réception radio ou les autres équipements ;
- Être suffisamment immunisé contre les perturbations provenant des autres équipements, ou plus généralement de l'environnement. [13]

Et Pour vérifier la CEM d'un dispositif, on procède en vérifiant par des mesures, que le dispositif fonctionne correctement en présence de perturbations. On vérifie également que l'appareil n'envoie pas trop de perturbations vers l'extérieur en mesurant les champs électriques et magnétiques à une certaine distance (perturbations rayonnées). [14]

### I.3.1. Champ électrique, champ magnétique et champ électromagnétique :

Pour les usages courants de l'électricité (en basse fréquence), champ électrique et champ magnétique sont disjoints. Le champ électrique est lié à la tension et se mesure en volts par mètre (V/m). Plus la tension d'alimentation d'un appareil est grande, plus le champ électrique qui en résulte est intense il est présent dès que l'on branche un appareil, même si le courant ne passe pas.

A l'inverse du champ électrique, le champ magnétique est lié au courant et n'apparaît que si un courant est consommé, autrement dit si l'appareil électrique est allumé L'unité du champ magnétique est donc **ampère/mètre**. [15]

Par contre, un champ électromagnétique apparaît dès lors que des charges électriques sont en mouvement. Ce champ résulte de la combinaison de 2 ondes (l'une électrique, l'autre magnétique) qui se propagent à la vitesse de la lumière. Tout conducteur traversé par un courant électrique rayonne un champ magnétique H.

Si un conducteur électrique formant une boucle S est traversé par le champ magnétique H, toute variation de H va induire une force électromotrice dans la boucle, entraînant la circulation d'un courant de perturbation dans le circuit fermé. [15]

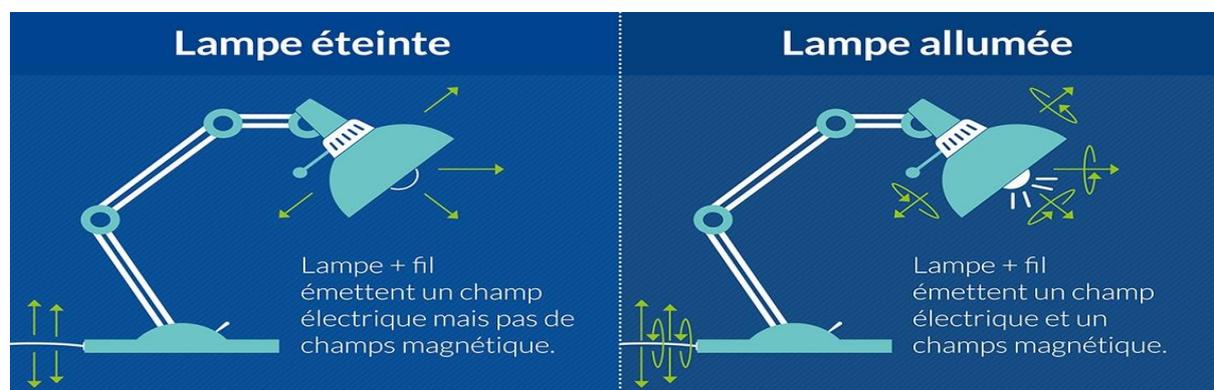


Figure I.1 : différence entre champ électrique et magnétique [7]

## I.4. Tests de performance :

Les essais CEM permettent de vérifier la conformité d'un appareil vis à vis des normes. Ils consistent à placer un exemplaire du produit dans un environnement de référence. Ce dernier représente l'environnement dans lequel sera utilisé le produit.

Les tests diffèrent selon que l'on souhaite étudier les émissions ou la susceptibilité d'un appareil, et selon le mode de couplage.

### I.4.1. Testes d'immunité :

Les tests d'immunité permettent de vérifier la résistance d'un appareil, vis à vis des décharges électrostatiques, des perturbations conduites et des perturbations rayonnées, Ou dans un autre sens, c'est l'Aptitude d'un appareil ou dispositif électronique à ne pas être perturbé par l'extérieur (son environnement). Immunité contre : [15]

- Les perturbations conduites.
- Les perturbations rayonnées.

### I.4.2. Testes d'émissions :

Les mesures permettent d'analyser les émissions d'un appareil afin de vérifier sa conformité. Elles concernent aussi bien les perturbations conduites que les perturbations rayonnées. On dans un autre sens, C'est l'aptitude d'un appareil ou dispositif électronique à transmettre la perturbation qui en résulte : [16]

- Perturbations (câbles, support, etc.).
- Perturbations radioactives (ondes électromagnétiques)

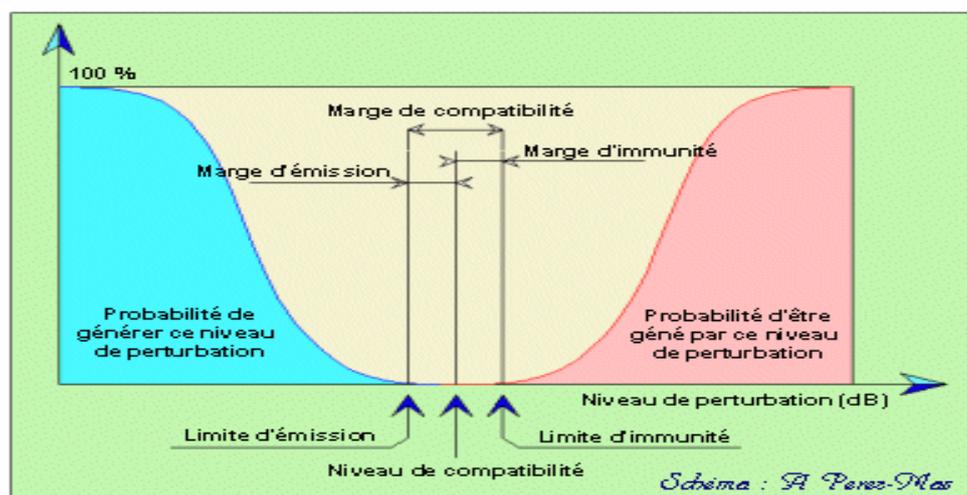


Figure I.2 : Niveaux de perturbation en CEM [8]

Pour assurer la CEM, différentes marges ont été définies (Figure 2) :

- Niveau d'immunité : il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.
- Niveau de compatibilité : c'est le niveau maximal de perturbation auquel on peut s'attendre dans un environnement donné.

- Niveau d'émission : c'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'immunité.
- Marge d'émission : c'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau d'émission.

Pour cela signifier que Les tests, la validation et la certification CEM constituent un processus à long terme visant à prouver qu'un produit ou un équipement est conforme aux réglementations et aux directives CEM en vigueur dans le pays ou la région du monde où il est employé.

La réussite du programme de test fournit l'assurance de la fiabilité de l'appareil ou de l'équipement électrique ou électronique réduisant ainsi les risques et les coûts d'entretien. Les tests mettent également en évidence des problèmes potentiels ou de conception du produit qui peuvent être résolus avant sa mise en production. [17]

### I.5. Décomposition d'un problème de CEM :

Lors de l'analyse d'un problème de perturbation électromagnétique, on constate que le problème englobe trois éléments : une source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique, un canal de couplage au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage et enfin, un récepteur qui capte cette énergie, la traite et la superpose à sa fonction normale.[18]

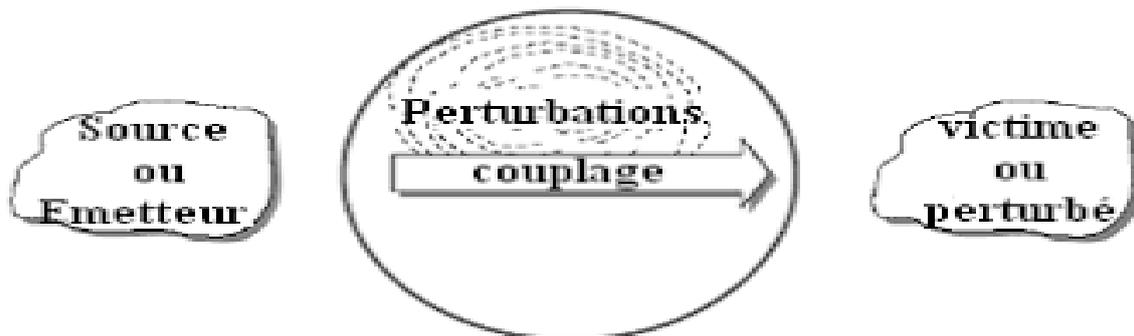


Figure I.3 : Méthode générale d'analyse de la CEM [9]

#### I.5.1. Les sources de perturbations :

Si nous nous intéressons à l'environnement électromagnétique d'un équipement, nous pouvons distinguer les sources de perturbations d'origine naturelle et les sources de perturbations qui tiennent à l'activité humaine, pour cela on peut dire qu'il existe de nombreuses sources éventuelles de perturbations. Nous pouvons les classer ainsi : [19]

- Sources naturelles (foudre, rayonnements solaires, Les rayonnements cosmiques et en particulier solaires...etc.)
- Sources électrostatiques : elles apparaissent lors de la friction de matériaux entre eux, c'est t'a dire qui impliquent le corps humain ou des matériaux mis en mouvement par l'homme. (une personne, un ballon de baudruche, ...etc.)
- Sources liées à l'activité humaine : son des sources volontaire (émetteurs radio, télévision, radar, téléphones portables,...etc.)

- Sources involontaires : qui proviennent de l'utilisation de l'électricité (lignes de transport de l'énergie, éclairage fluorescent, moteurs électriques, alimentations des systèmes électroniques, ...etc.)

On a cependant tendance à classer les perturbations en fonction de leur type plutôt que de leur nature, par exemple basse ou haute fréquence, transitoires ou entretenues, la figure si déçue résume tout :

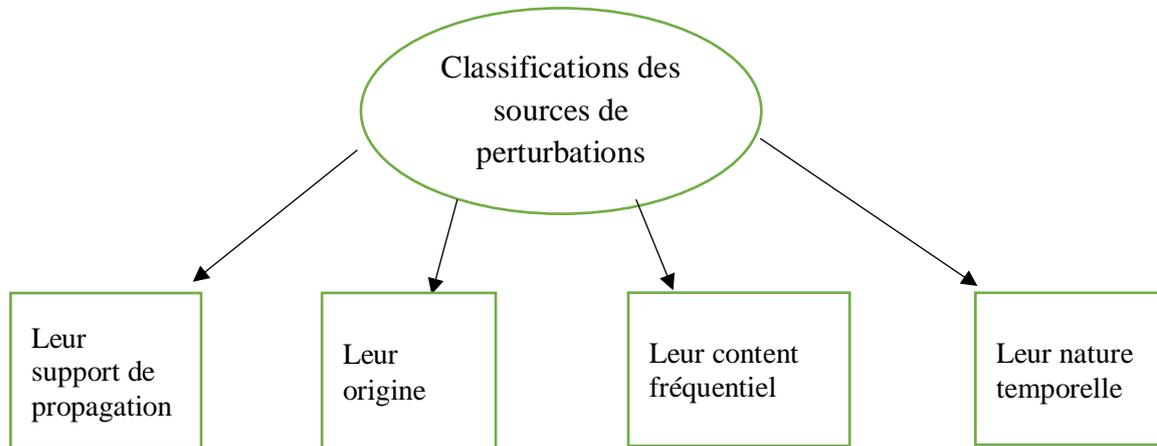


Figure I.4 : classifications des sources de perturbations [9]

- Leur support de propagation : c'est à dire les signaux qui caractérisés par leur courant, différents de potentiel ou par un champ électriques et magnétique.
- Leur origine : c'est t'a dire les sources de perturbation d'origine naturelle ou de l'activité humaine.
- Leur contenu fréquentiel : c'est ta dire en BF ou HF ou MF.
- Leur nature temporelle : c'est t'a dire de sources permanentes (fréquence fixe) ou entretenue ou transitoire (large de bande de fréquence). [9]

## I.6. Classifications des perturbations :

Le couplage est un phénomène physique permettant la propagation d'une perturbation de la source à la victime, il existe principalement 6 mode de couplage deux en mode conduit et quatre en mode rayonné (deux en champ proche et deux en champ lointain), cette figure exprime tout ce que nous avons dit : [10]

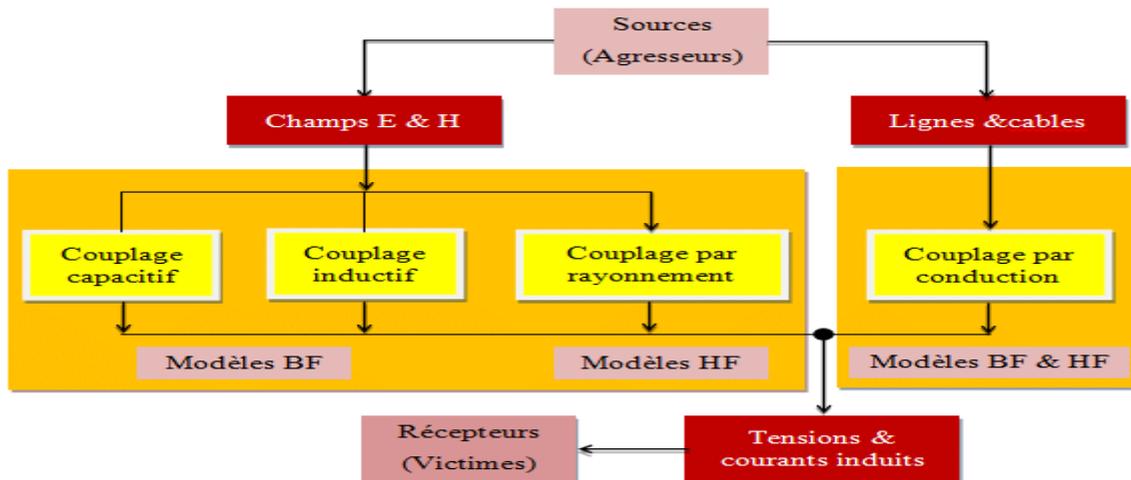


Figure I.5 : Récapitulatif des différents modes de couplage [10]

### I.6.1. Mode de couplages (Mode commun et différentiel) :

Sur une liaison bifilaire (deux conducteurs), le signal perturbateur peut se déplacer de deux façons (modes) : Mode Commun (MC) et Mode Différentiel (MD) : [22]

Dans un circuit la circulation des courants s'établit toujours par l'intermédiaire de courants de mode commun et de mode différentiel.

- Le mode commun utilise le réseau de masse ou de terre comme potentiel de référence commun.
- Le courant de mode différentiel se transmet par une liaison bifilaire en aller et retour.

#### I.6.1.1. Modes commun :

Le mode commun est très peu utilisé pour les signaux utiles, il correspond souvent à un mode parasite. Il est aussi appelé mode « parallèle », mode « longitudinal », ou mode « asymétrique ».

La tension de mode commun est définie comme étant égale à la valeur moyenne de la d.d.p, entre les différents et la masse. Le courant de mode commun est égal au courant qui s'écoule à la masse. [23]

Ce courant se partage entre les différents fils de liaison, dans le même sens sur chacun des fils c'est le cas le plus fréquent de transmission des perturbations, car le fil de signal et le fil de retour sont proches et reçoivent la même perturbation. En peut dire que presque 90% des matériaux son de mode commun. [23]

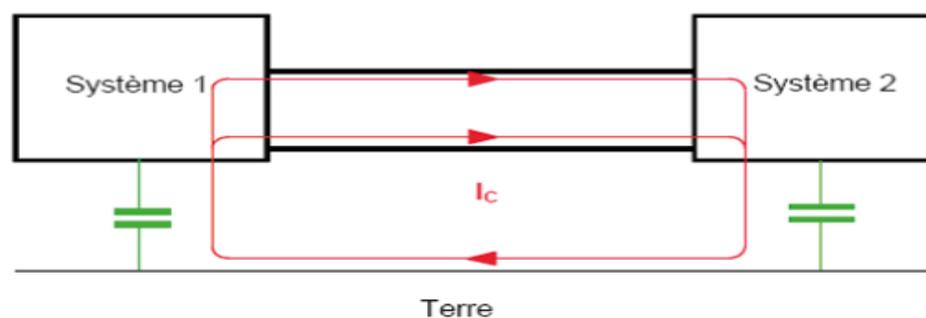


Figure I.6 : le mode commun [23]

### I.6.1.2. Modes différentiel :

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode différentiel, appelé aussi mode « série », mode « normal » ou mode « symétrique ». Le courant de mode différentiel se boucle sur les 2 fils de liaison. Il circule en sens opposé sur chacun des fils. [24]

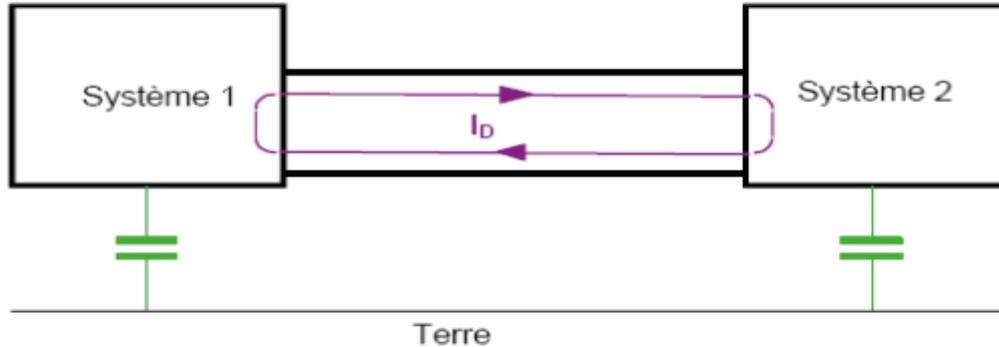


Figure I.7 : le mode différentiel [23]

C'est le mode normal de fonctionnement d'une liaison électrique. Il est difficile de filtrer une perturbation en mode différentielle si le signal utile est aussi rapide que la perturbation. Il faut donc éviter que ce mode de couplage puisse se produire, en peut dire aussi que presque 10% des matériaux son de mode différentielle. [23]

### I.6.2. Types de couplages :

Il existe 03 types de couplages : [24]

1. Couplage par Conduction (ou par impédance commune) qui se traduit par la circulation d'un courant perturbateur.
  - Liaison directe.
  - A travers les câbles et les composants reliant la source à la victime.
2. Couplage par Rayonnement qui se transmis par le champ électrique E, ou magnétique B ou électromagnétique (E, B) :
  - Rayonnement dans la zone de champ proche.
  - Rayonnement dans la zone de champ lointain.
3. Couplage par Ionisation qui se transmet à travers une décharge électrique dont le courant est constant :
  - Ionisation d'un milieu diélectrique (souvent de l'air) dû à la chaleur.
  - Ionisation de l'air dû à l'humidité (foudre).

#### I.6.2.1. Couplage par conduction :

Il s'agit d'un contact électrique direct entre la source perturbatrice et les circuits électriques. Deux protections sont nécessaires pour dévier cette perturbation : [24]

- Couplage par liaison directe (contact) ou perturbations directement conduites.
- Couplage par impédance commune à travers les câbles et les composants.

### I.6.2.1.1. Liaison directe ou perturbations directement conduites :

Les perturbations captées par un fil sont conduites à l'intérieur de l'appareil est transmise directement (telle quelle) à la victime sans qu'elle soit modifiée lors du parcours. Il existe 3 thèmes dans la perturbation conduite, premièrement la variation rapide de tension qui est causée par des défauts où la tension peut augmenter ou diminuer de quelques % dont la durée est de quelques ms. Deuxièmement variation lente de tension, cette variation est causée par la variation de la charge sur le réseau de distribution dont la durée peut atteindre plusieurs secondes. Et dernièrement Creux ou microcoupures de tension et la Surtension, la première et causée par des défauts sur les lignes d'alimentation, orage, vent, et il a une durée comprise entre 1 ms et 1 set le deuxième et causée par une variation rapide du courant traversant un circuit bobiné ou par résonance du circuit LC, délestage du réseau, ...) [24]

### I.6.2.1.2. Impédance commune :

Le couplage par impédance commune, se passe-t-il, lorsqu'un courant circule entre deux sous-systèmes, et le lien entre ces deux systèmes sont des impédances qui bloque ce système par une chute de tension qui il est à l'intérieur et qui bloque le courant à travers système 1 vers système 2. [24]

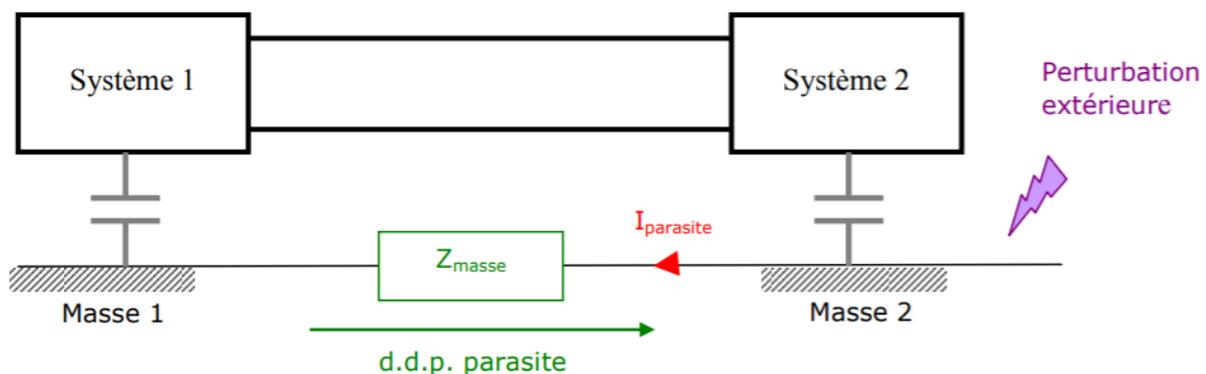


Figure I.8 : couplage par impédance commun [14]

Ou dans un autre sens, un couplage par impédance se produit quand 2 mailles ont en commun un tronçon dont l'impédance ne peut être considérée comme négligeable. On peut éviter c'est tronçon, on relit alors les masses en un seul point ou en diminuant leur impédance. [25]

### I.6.2.2. Couplage par rayonnement :

Pour ce mode de couplage, il est nécessaire de différencier le rayonnement en champ proche et celui en champ lointain. [26]

#### I.6.2.2.1. Couplage Champ proche :

Ces couplages de champs électriques ou magnétiques peuvent être représentés respectivement par des connexions capacitives ou des inductances mutuelles. Lorsque ces couplages se produisent au niveau des connexions électriques, on parle de phénomènes de diaphonie capacitive ou inductive. [27]

Un signal électrique traversant un conducteur crée des champs électriques et magnétiques autour du conducteur. Des conducteurs adjacents baignent dans ces champs et sont à leur tour traversés par le premier signal électrique induit. Ces effets sont appelés couplage diaphonique inductif (effets de champ magnétique) et capacitif (effets de champ électrique). [27]

### I.6.2.2.2. Couplage inductif :

Dans ce cas, Les courants dans le circuit d'interférence peuvent provoquer des interférences. Près de ce circuit se trouve un circuit victime. Les courants provenant des conducteurs de circuits perturbateurs créent des champs magnétiques autour d'eux, et induit un courant dans le circuit victime. Exemple : diaphonie inductive. [12]

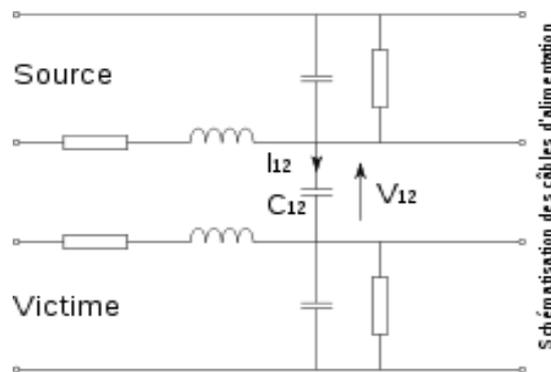


Figure I.9 : diaphonie inductive [12]

Les conducteurs du circuit perturbateur sont dans le même câble que les conducteurs du circuit victime, et des tensions parasites sont induites dans ce dernier. Plus l'impédance du circuit victime est faible, plus l'énergie perturbatrice que cette tension produit dans le circuit victime est importante. [12]

### I.6.2.2.3. Couplage capacitif :

Dans ce cas, il y a une tension sur le circuit perturbateur qui peut provoquer des interférences. Il y a aussi un condensateur entre ce circuit parasite et un autre circuit qui en sera la victime. Grâce à cette capacité, l'énergie électrique perturbatrice atteint le circuit victime. Exemple : phénomène de diaphonie capacitive. [12]

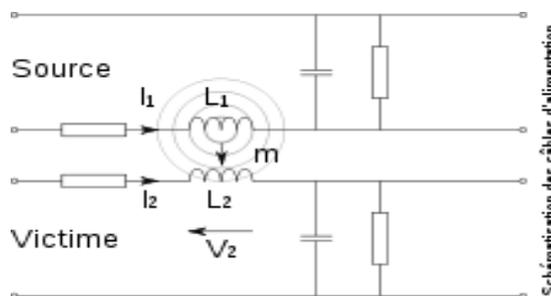


Figure I.10 : diaphonie capacitive [12]

Les conducteurs appartenant au circuit perturbé sont dans le même câble que les conducteurs. Appartenant au circuit perturbé. Les deux conducteurs sont proches l'un de l'autre et il y a un condensateur entre eux qui est responsable du couplage. Le couplage devient plus

élevé à mesure que l'impédance du circuit victime est plus élevée en raison du pont diviseur de tension. [12]

#### I.6.2.2.4. Couplage champ lointain :

L'interférer et la victime sont couplés par un milieu tel que l'air. Le niveau d'interférence dépend de la puissance de la source rayonnante et de l'efficacité des antennes d'émission et de réception. [22]

Les champs électromagnétiques sont constitués de champs électriques et magnétiques interdépendants. Les composants électriques et magnétiques peuvent être considérés séparément (voir Figure 11).

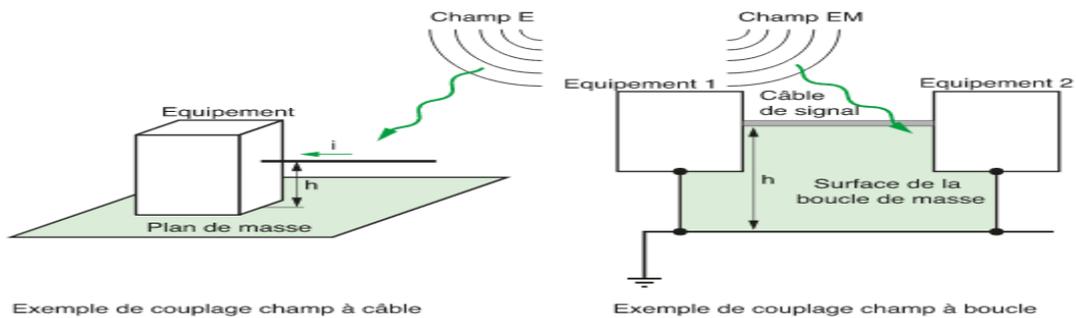


Figure I.11 : couplage par rayonnement [15]

Les champs électriques (champs E) et les champs magnétiques (champs H) sont couplés dans les systèmes de câblage par des fils et des boucles. Lorsqu'un câble est soumis à un champ électrique variable, un courant est généré dans ce câble. Ce phénomène est appelé couplage champ-câble. De même, lorsqu'un champ magnétique changeant traverse la boucle, il crée une force contre-électromotrice qui crée une tension entre les deux extrémités de la boucle. Ce phénomène est appelé couplage champ-boucle. [27]

Le champ électrique s'exprime en  $V/m$ . Son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée  $v$  (figure 12), par contre le champ magnétique s'exprime en  $A/m$ . Son émission est engendré par un circuit basse impédance parcouru par un courant  $i$  (figure 13). [30]

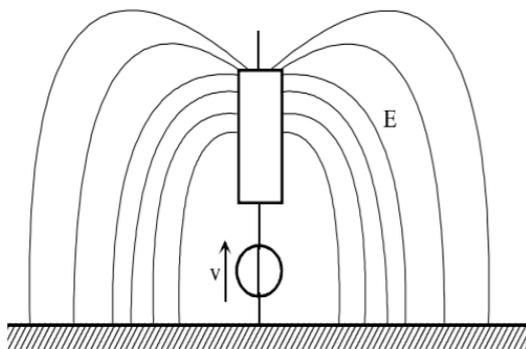


Figure I.12 : émission champ électrique [30]

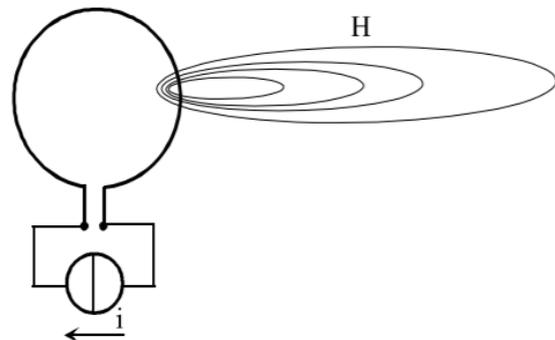


Figure I.13 : émission champ magnétique [30]

### **I.6.2.2.5. Couplage par ionisation :**

Le couplage par ionisation divisé en deux sections : par chaleur comme un exemple de Détecteur de flamme ou Soudure à l'arc, et la deuxième par humidité exemple de la foudre Ce que nous allons comprendre maintenant. [30]

Le champ rayonné qui en résulte peut à son tour induire des courants électriques dans les installations (ou structures métalliques) environnantes. [22]

– On assimile le canal de foudre à un conducteur vertical qui se crée à distance du champ H et du champ électrique E.

Sur les réseaux de distribution d'énergie, les coups de foudre génèrent des ondes de choc (surtensions) qui se propagent sur la ligne.

– Les courants de foudre circulant dans la prise de terre entraînent une augmentation du potentiel du conducteur de protection.

– Si le courant de foudre traverse la structure métallique, il provoquera une élévation du potentiel du bloc métallique

Cela peut provoquer des courants, des défauts et même des défauts d'isolation dans le câble. [22]

### **I.6.3. La victime ou perturbé :**

C'est La victime, dans la trilogie source/couplage/ victime, représente tout matériel susceptible d'être perturbé. [29]

En générale, un équipement est constitué de composants électroniques, qui tombent en panne en raison de la présence de perturbation qui ont normalement leur origine à l'extérieur de l'équipement.

Les défauts peuvent être de différentes natures : [29]

- permanents et mesurables.
- aléatoires non répétitifs survenant lors de l'apparition des perturbations.
- Le caractère aléatoire non répétitif persiste après les perturbations.
- pannes permanentes dues à la destruction des composants de l'appareil.

## **I.7. Dispositifs de mesure des perturbations :**

Il existe deux types d'équipements de mesure utilisés en CEM. Le premier concerne la mesure des perturbations conduites haute fréquence et comprend un réseau d'impédance de ligne stable (RSIL) basé sur le principe du transformateur de courant et des capteurs de courant passifs. La deuxième catégorie, il existe différents types d'antennes Pour les mesures en champ proche ou en champ lointain. [30]

Dans tous les cas, à partir de Les capteurs sont analysés dans le domaine temporel (oscilloscope) et plus généralement dans le domaine fréquentiel grâce aux analyseurs de spectre hétérodynes. [30]

### **I.7.1. Le RSIL :**

Le RSIL s'apparente à un filtre inséré entre l'appareil testé et le réseau fournissant l'énergie. [30] (Figure 14).

Son rôle est double. Il doit isoler les réseaux qui peuvent avoir des interférences en mode commun et en mode différentiel de l'appareil testé. Il doit cependant présenter une chute de tension sortie/entrée inférieure à 5% de la tension nominale à la fréquence du réseau lorsqu'il est traversé par le courant nominal.

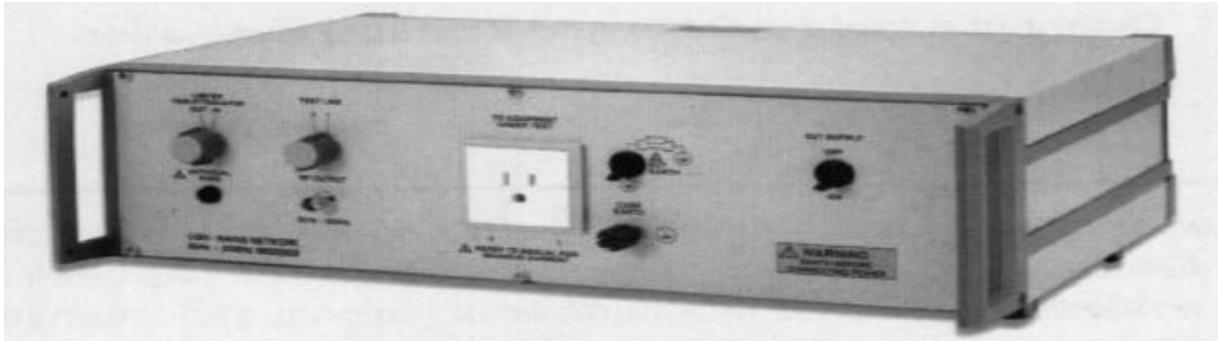


Figure I.14 : photos d'un RSIL [30]

Enfin, il doit présenter une impédance fermée constante aux perturbations hautes fréquence émises par l'appareil sous test, que ce soit en mode commun ou en Différentiel, qui est indépendant de l'impédance présentée par le réseau d'énergie. Cette impédance est normalisée par le CISPR [1-2]. La norme définit des limites de variation de cette impédance, mesurée entre la sortie et la terre dans la gamme de fréquence 10kHz-100MHz. La structure de RSIL est illustrée à la figure (15). [30]

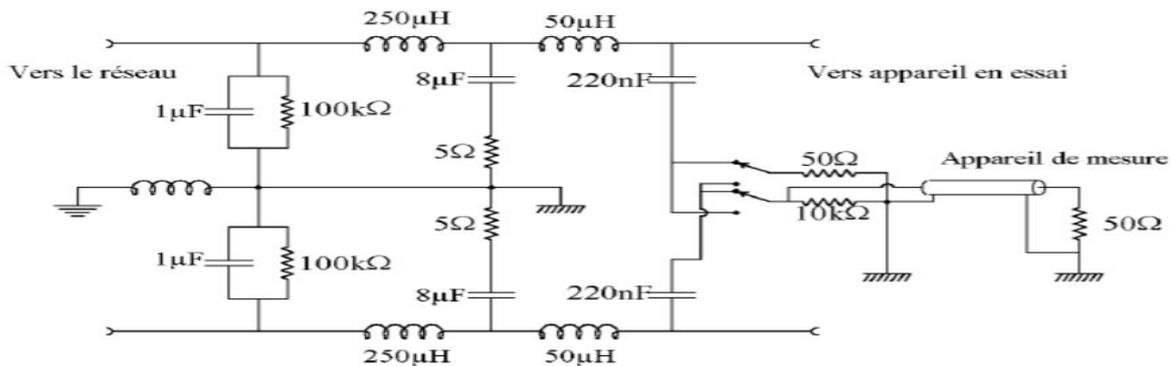


Figure I.15 : schéma de principe d'un RSIL monophasé. [30]

La mesure est effectuée au-dessus d'une surface conductrice reliée à la masse du banc de mesure (Figure 16). Les distances et longueurs des connexions sont spécifiées dans la norme.

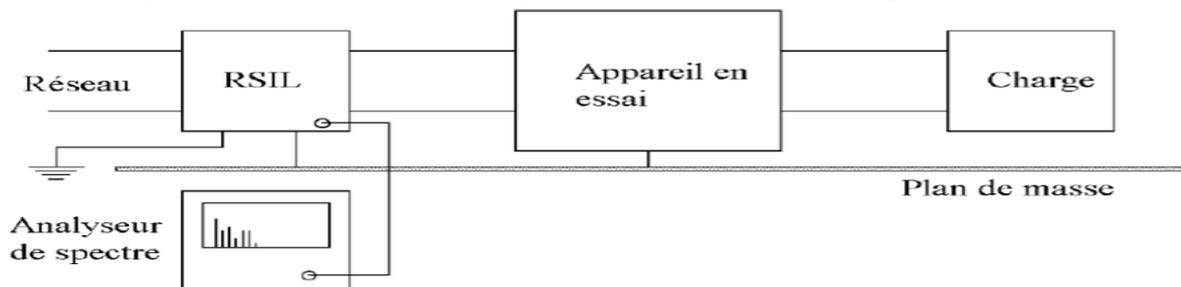


Figure I.16 : Principe de la mesure des perturbations. [30]

## I.8. La CEM dans électronique de puissance :

La demande croissante d'énergie électrique pour les transports terrestres et aériens a conduit à l'utilisation intensive d'appareils basés sur l'électronique de puissance. Les progrès des semi-conducteurs de puissance sont au cœur de la technologie de ces dispositifs, qui peuvent augmenter considérablement leur densité d'énergie avec une efficacité exceptionnelle. Cependant, la large diffusion de ces technologies, l'augmentation de la fréquence et l'augmentation de la vitesse de commutation des semi-conducteurs ont conduit à une augmentation significative de la pollution électromagnétique qu'ils génèrent. [20]

Les phénomènes de compatibilité électromagnétique en électronique de puissance sont traités et illustrés par des cas particuliers d'applications industrielles. Commencez par le concept de commutation de cellules, expliquez, modélisez l'émission d'interférences électromagnétiques, puis généralisez la méthode à des systèmes plus complexes. Enfin, des méthodes spécifiques pour réduire les parasites sont révélés, notamment celles liées à l'électronique de puissance, au filtrage et au blindage. [20]

Et pour cela on peut poser la question, pourquoi la CEM en électronique de puissance ?

### I.8.1. Pourquoi la CEM en électronique de puissance ?

Sécurité opérationnelle : [21]

- Auto-interférence (commande de puissance, etc.)
- Sources d'interférences provenant d'autres appareils
- Agression externe (naturelle ou non)

Problèmes de mise à niveau : [21]

- Augmentation de la fréquence de l'électronique de puissance
- Système d'intégration
- La diffusion des équipements électriques (voitures, etc.)
- Chute de tension d'alimentation du système de contrôle Pollution de l'environnement (radar, téléphone, etc.)

### I.8.2. Les causes des perturbations en électroniques de puissance :

L'utilisation de l'électronique de puissance a considérablement augmenté ces dernières années. Ces appareils sont de plus en plus utilisés pour le transport terrestre et aérien, les applications domestiques et grand public et les énergies renouvelables. Ils sont basés sur des opérations de commutation de semi-conducteurs. [31]

Le fonctionnement des convertisseurs statiques est pollué car les temps de commutation sont très courts et les amplitudes sont très élevées. La commutation rapide réduit les pertes de commutation (à la fois en tension et en courant dans le commutateur). L'amplitude du gradient de commutation peut varier de 100 à 1000 A/ $\mu$ s pour  $di/dt$  et de 5 à 50 kV/ $\mu$ s pour  $dv/dt$ . Un autre facteur qui augmente la pollution électromagnétique est la fréquence de découpage très élevée (qui peut être de 100Hz à 1MHz). [31]

### I.8.3. Etendue spectrale du bruit dans les convertisseurs statiques :

A l'inverse de dispositifs qui génèrent une pollution électromagnétique sur une plage réduite de fréquence, les dispositifs de conversion statique émettent sur une plage très large ainsi que décrit à la figure (14). Chaque étage de conversion, du redresseur d'entrée fonctionnant à la fréquence du réseau, jusqu'aux étages de puissance commutant à quelques dizaines ou centaines de kHz et aux étages de commandes contribuent de façon complexe à l'émission des perturbations conduites et rayonnées, selon la structure de conversion, son mode de commutation et la nature technologique des interrupteurs. De plus, les sources interfèrent entre-elles donnant lieu à des effets complexes d'intermodulation. [32]

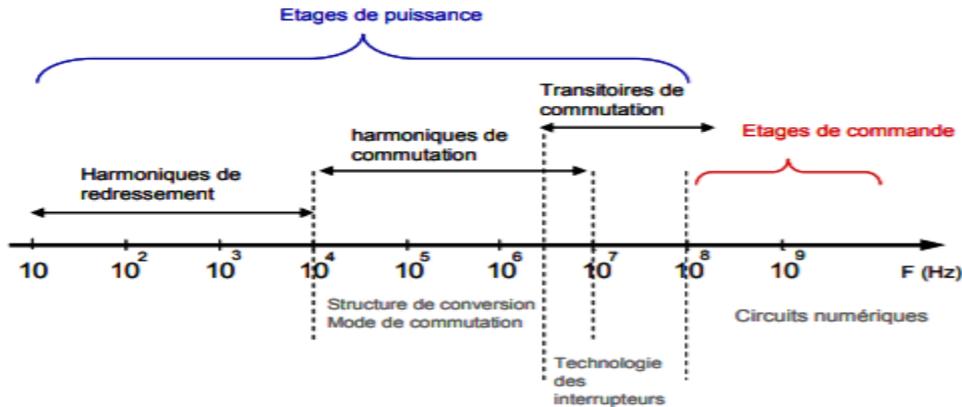


Figure I.17 : Répartition spectrale des bruits électromagnétiques dans un convertisseur statique. [32]

Ainsi, les dispositifs de conversion d'énergie électriques sont des contributeurs très sévères à la pollution électromagnétique. [32]

### I.8.4. Sources de bruit : la cellule de commutation et sa commande :

La conversion d'énergie en électronique de puissance repose sur deux étapes complémentaires, la commutation et le stockage d'énergie. La découpe est effectuée par un interrupteur de puissance avec des éléments semi-conducteurs. Il existe des commutateurs qui doivent être contrôlés (MOSFET, IGBT, JFET) et d'autres qui nécessitent une commutation naturelle (diodes Pin, Schottky). [22]

Le stockage d'énergie se produit dans des composants passifs tels que des condensateurs et des inductances. L'intégration de ces deux étages est le principe de l'unité de commutation. La figure 15 montre l'unité de commutation de base filtrée par un condensateur et ses formes d'onde associées. Cette structuration. L'interrupteur principal est commandé par une fonction de modulation (période  $F_m(t)$  de période  $T_d$  à valeur binaire et rapport cyclique variable  $\alpha = t_{on}/T_d$ ). Délivrance de puissance ajustée au cycle de service. [22]

Pour une étude simplifiée, les valeurs externes de la cellule de commutation ( $E$ ,  $I_0$ ) sont constantes alors que les valeurs internes ( $i_e$ ,  $v_k$ ) sont variables, modulées par la fonction  $f_m(t)$ . [22]

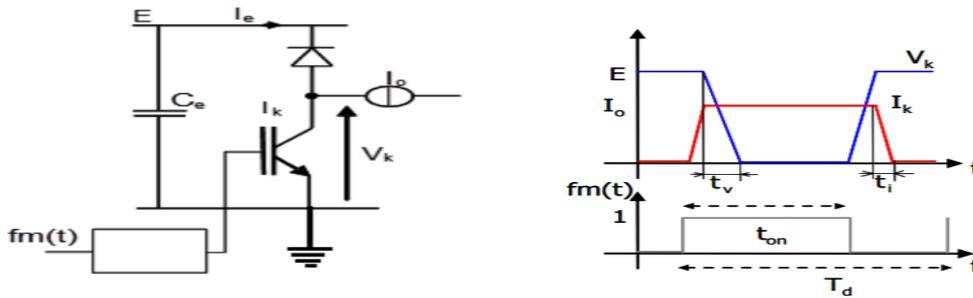


Figure I.18 : Cellule de commutation et formes d'ondes associées [32]

**I.8.5. Origine des perturbations conduites et rayonnées dans les convertisseurs statiques :**

La quantité d'électricité dans le réseau de commutation varie considérablement. En fait, la commutation doit être très rapide afin de réduire les pertes lors de la commutation (où la tension et le courant sont présents dans le commutateur). Actuellement, les gradients de commutation pour  $dI/dt$  sont de l'ordre de 100 à 1000 A/ $\mu$ s, et les gradients de commutation pour  $dV/dt$  sont de l'ordre de 5 à 50 kV/ $\mu$ s. [32]

A titre d'exemple, la figure 16 illustre ces phénomènes dans un hacheur connecté à un réseau de stabilisation d'impédance de ligne (RSIL) : Dans le maillage autour de la zone grisée, le courant  $I_e$  subit des variations très rapides aux hautes fréquences ; cela crée la boucle s'apparente à un dipôle rayonnant magnétique : le condensateur de découplage d'entrée  $C_e$ , dont la fonction est limitée par ses imperfections (résistance et inductance série  $I_p$ ), est généralement insuffisant pour empêcher les courants parasites pulsés de se propager  $I_p$  sur le réseau électrique. [32]

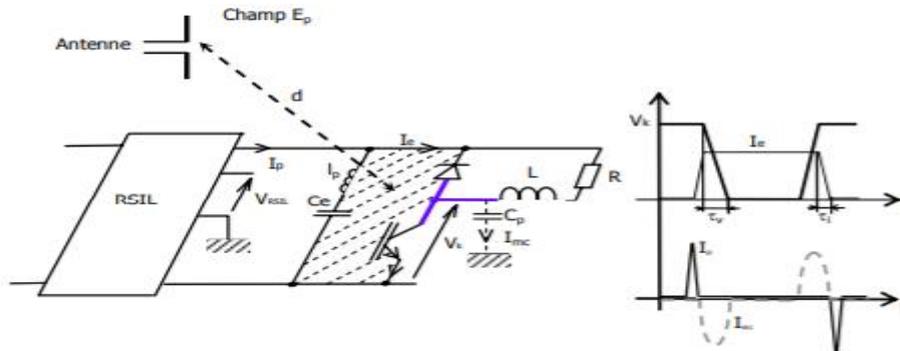


Figure I.19 : Origine et mode de couplage des perturbations électromagnétiques d'un convertisseur statique. [32]

Par ailleurs, les conducteurs représentés en bleu subissent les fortes variations de la tension  $V_k$ , ils constituent un dipôle rayonnant électrique et peuvent transmettre à la terre des courants impulsionnels  $I_{mc}$  via la capacité parasite symbolisée par  $C_p$  entre le dispositif et la terre. [32]

**I.9. Les normes de la CEM :**

Au niveau de la Communauté économique européenne (CEE), les réglementations sont élaborées par les comités techniques (TC) du Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC). La directive européenne n° 89/336/CEE stipule que, dans tous les États membres de la CEE, les équipements susceptibles de générer des interférences

électromagnétiques ou dont le fonctionnement peut être affecté par de telles interférences ne peuvent être vendus dans les pays de la CEE que s'ils sont conformes aux réglementations CEM. [33]

La directive est entrée en vigueur le 28 octobre 1992. Cependant, une période de transition de quatre ans est prévue pour que les fabricants s'adaptent et fassent rédiger tous les documents par le CENELEC. Nous donnons ci-dessous un échantillon de normes européennes. Au niveau international, la Commission électrotechnique internationale (CEI) a créé un comité spécial, le Comité spécial international sur les interférences radio (CISPR), pour élaborer des normes CEM. Les publications du CISPR sont souvent utilisées par différents pays comme documents de base pour établir leurs propres normes. [33]

	Standards Européens	Titre	Equivalent international
Emission	EN 55011	Exigences sur l'émission des équipements Industriels, Scientifiques et médicaux	CISPR 11
	EN 55013	Exigences sur les récepteurs de radiodiffusion	CISPR 13
	EN55014	Exigences sur l'émission des équipements électroménagers et des outils portatifs	CISPR 14
	EN55015	Exigences sur l'émission des lampes fluorescentes et les luminaires	CISPR 15
	EN55022	Exigences sur l'émission des équipements de traitement de l'information	CISPR 22
	EN60555-1	Définitions des harmoniques, sous-harmoniques et du scintillement	IEC 555-1
	EN60555-2	Perturbations harmoniques provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-2
	EN60555-3	Variations de tension provoquées par les équipements électroménagers et similaires.	IEC 555-3

Figure I.20 : principales normes européennes en matière de CEM [33]

Considérons la norme 55022, qui couvre une classe importante d'équipements électriques, à savoir les équipements de traitement de données. Cette norme est directement dérivée de La publication CISPR n° 22 distingue deux types de dispositifs :

- Équipement de classe A : pour une utilisation dans des environnements industriels, commerciaux ou commerciaux.
- Appareils de classe B : à usage résidentiel.

## I.10. Techniques de protection en CEM :

Le choix des protections passe par la compréhension de leurs performances respectives. Elles sont souvent utilisées conjointement pour profiter de qualités qui peuvent se compléter, aucune protection n'étant universelle vis-à-vis des agressions et environnements possibles. On distingue trois types de protection :

### I.10.1. Blindages :

Un blindage ou un écran électromagnétique est une enveloppe conductrice qui sépare l'espace en deux régions, l'une contenant des sources de champs électromagnétiques, l'autre non. Le but d'un blindage est double : (1) contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée, et (2) exclure les émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte. [34]



Figure I.21 : Blindage ou écran électromagnétique [36]

(a) Contenir les émissions rayonnées ; (b) exclure les émissions rayonnées.

### I.10.2. Filtrages :

Les filtres ont pour fonction de laisser passer les signaux utiles et de supprimer la partie indésirable du signal transmis. [35]

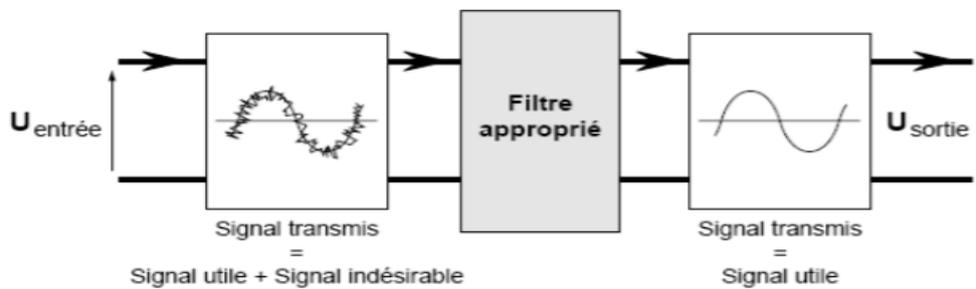


Figure I.22 : filtrages. [36]

### I.10.3. Torsadage :

Le torsadage consiste à remplacer une grande boucle formée de deux conducteurs parallèles par une multitude de petites boucles dont les flux d'induction coupés se compensent 2 à 2. Les différentes boucles n'étant pas identiques au micromètre près, il restera toujours un signal perturbateur, d'autant plus faible que les boucles sont plus petites. Ce moyen de protection n'est efficace qu'en basse fréquence (jusqu'à 100 kHz voir 1MHz). [36]

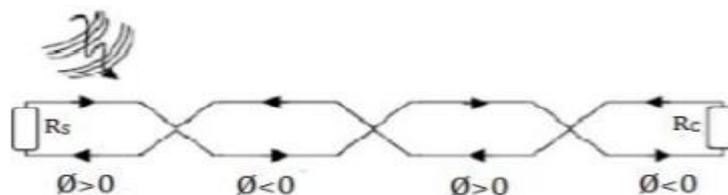


Figure I.23 : Diminution du champ magnétique par le principe de torsadage [36]

## I.11. Conclusion :

Les sources de perturbations électromagnétiques sont présentes dans tous les types d'environnement. Il est donc d'une nécessité légale, technique et commerciale de bien prendre en compte la CEM pour faire cohabiter sans heurts les systèmes électriques. La compréhension théorique et pratique des phénomènes CEM et des tests de certification adéquats ainsi que leur

bonne intégration dans la conception permettent d'amener sur le marché des produits fiables, sûrs, respectueux de leur environnement électromagnétique et donc à succès. [22]

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la compatibilité électromagnétique, Nous avons ainsi évoqué les différents types de couplages électromagnétiques que l'on peut rencontrer entre deux composants se trouvant dans un même environnement. Ces couplages sont causés soit par l'effet d'un champ électrique/magnétique rayonné par l'un de composant ou soit par l'effet du couplage d'un signal parasite qui va agresser un autre composant voisin. [26] [30]

Et nous avons expliqué quelques notions de base et des rappels physiques indispensables à la compréhension des différents problèmes rencontrés en compatibilité électromagnétique. Ce qui nous permettra d'entamer et de mieux comprendre dans le chapitre suivant les perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques et plus précisément dans le convertisseur AC/DC (onduleur).

# **Chapitre II**

*Généralité et modélisation des convertisseurs DC/AC*

## Chapitre II : Généralité et modélisation des convertisseurs DC/AC

### II.1. Introduction :

Entre l'électronique et l'électrotechnique s'est développée, au cours de la deuxième moitié du 20ème siècle, une nouvelle technique, l'électronique de puissance, parfois appelée à ses débuts l'électronique des courants forts. [37]

L'électronique de puissance a pour but d'échanger de l'énergie entre au moins deux systèmes électriques. A cet effet, il assure la fonction de modulation de l'énergie électrique d'une part en rendant compatibles les propriétés des deux systèmes (fonctions de tension, de courant et de fréquence), et d'autre part la fonction de contrôle (généralement) de cette énergie échangée. Il s'agit donc d'une discipline correspondant au traitement de l'énergie électrique (combinant les aspects de conversion et de contrôle). Les appareils électriques capables de remplir ces fonctions portent le nom commun de convertisseurs statiques (on devrait dire modulateurs d'énergie). [38]

Les fonctions de base de l'électronique de puissance trouvent des applications dans tous les domaines d'utilisation de l'électricité, c'est-à-dire dans toutes les industries, notamment dans l'évolution de la vitesse des moteurs électriques. Certains convertisseurs sont réversibles, c'est-à-dire qu'ils permettent de restituer l'énergie électrique de la charge à la source en inversant les rôles d'entrée et de sortie. Si la charge est réversible (par exemple, elle peut récupérer de l'énergie : un train descend) et que vous souhaitez récupérer cette énergie, il en va de même pour la source d'entrée et le convertisseur. [39]

Le développement des semi-conducteurs au silicium, des diodes, des thyristors et des transistors, qui permettaient le contrôle des courants et des tensions élevées, a donné à cette nouvelle technologie une impulsion considérable, à tel point qu'elle est aujourd'hui une discipline fondamentale du génie électrique. [40]

Le système chargé de manipuler l'énergie électrique est un convertisseur statique. Permettre de s'adapter de manière réversible ou non sous une forme alternative ou continue énergie entre le réseau et la charge. [41]

Notre centre d'intérêt dans ce chapitre se portera sur l'étude des différents types des convertisseurs statiques : [41]

- redresseur : conversion alternatif  $\rightarrow$  continu.
- hacheur : conversion continu  $\rightarrow$  continu.
- onduleur : conversion continu  $\rightarrow$  alternatif.
- gradateur : conversion alternatif  $\rightarrow$  alternatif.

Les fonctions de base peuvent être utilisées seules ou associées entre-elles pour adapter les modes de conversion aux besoins de l'utilisateur. [41]

Dans ce qui suit, nous allons faire une étude sur les convertisseurs statique est en détails sur l'onduleur DC/AC et leurs modélisations.

## II.2. Les convertisseurs statiques :

### II.2.1. Définitions :

Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique. Dans un d'autre sens les convertisseurs statiques sont Les systèmes chargés de manipuler l'énergie électrique. Qui permettent d'adapter de manière réversible ou non la forme alternative ou continue de l'énergie entre la source et le récepteur (monophasé ou triphasé). [42]

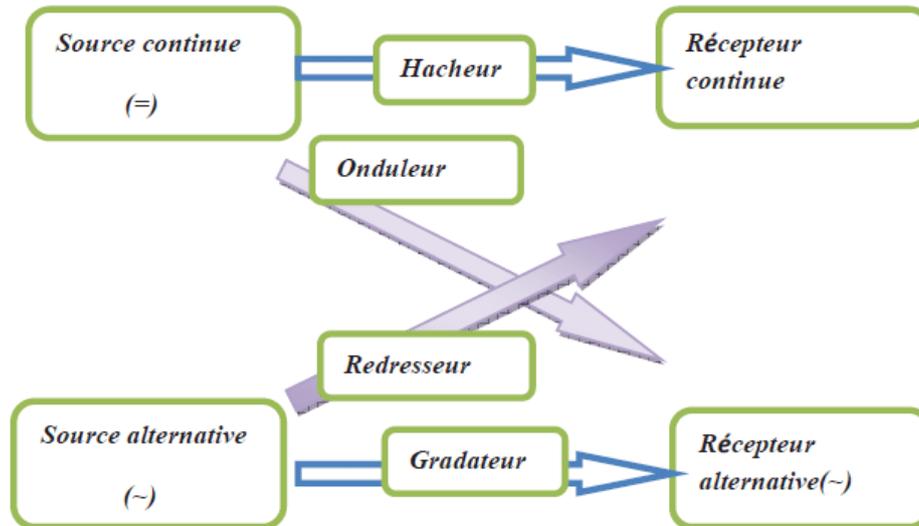


Figure II.1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance [61]

Un convertisseur statique est un système qui convertit l'énergie électrique en un récepteur donné. Les premiers convertisseurs de puissance ont été réalisés avec des moteurs couplés mécaniquement. Avec l'avènement des semi-conducteurs et de l'électronique de puissance, les systèmes de conversion tels que diodes, transistors, thyristors... deviennent de plus en plus complexes et les machines tournantes ne sont plus nécessaires, c'est l'ère des convertisseurs statiques. [43]

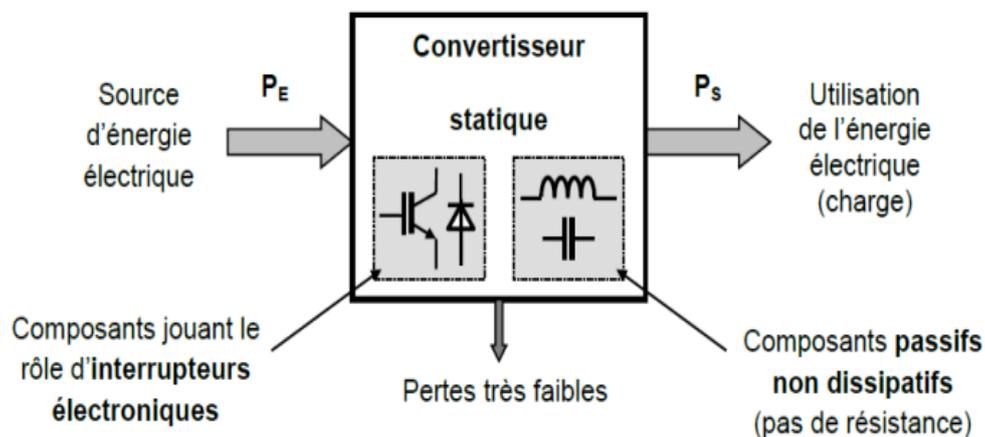


Figure II.2 : Architecture générique d'un convertisseur statique [42].

## II.2.2. Composant de l'électronique de puissance :

Comme nous avons vu précédemment les composants les plus utilisés c'est comme se suis :  
Diodes - Thyristors - Transistor Bipolaire : [44]

### II.2.2.1. Diodes :

La diode de puissance est un composant non commandable (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ( $V_{AK} < 0$ ) à l'état bloqué. Elle n'est pas réversible en courant et ne supporte qu'un courant dans le sens anode-cathode positif à l'état passant ( $I_{AK} > 0$ ) : [45]

Symbole :

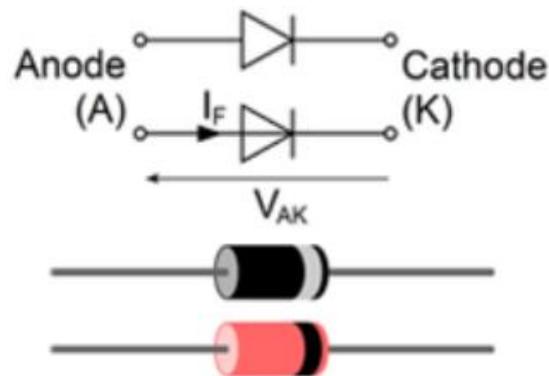


Figure II.3 : symbole de diode [44].

### II.2.2.2. Thyristor :

C'est un composant semi-conducteur utilisé pour redressement commandé, outre l'anode A et la cathode C, un thyristor possède une électrode de commande appelée gâchette G. [44]

Symbole :

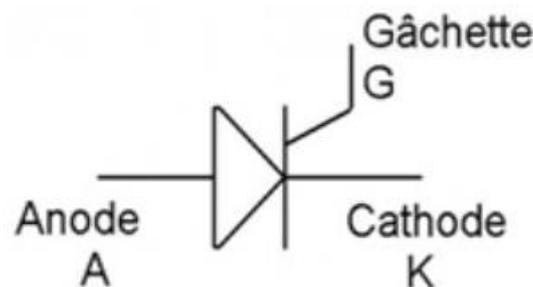


Figure II.4 : symbole de thyristor [44].

### II.2.2.3. Transistor (bipolaire-MOSFET) :

Le transistor bipolaire est un dispositif à semi-conducteur présentant trois couches à dopages alternés NPN ou PNP. [44]

Le transistor MOSFET est un interrupteur unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. [44]

Symbole :

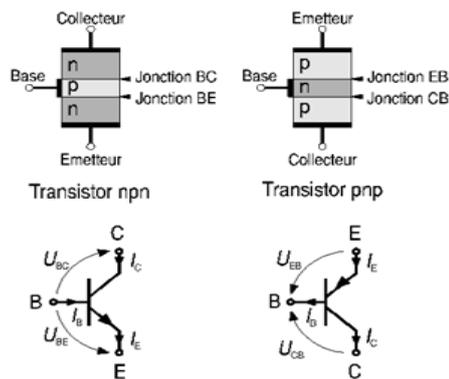


Figure II.5 : symbole de transistors bipolaires [44].

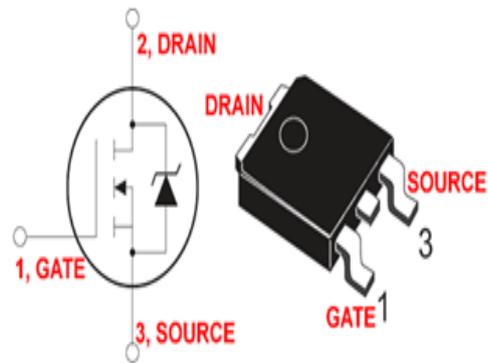


Figure II.6 : symbole de transistors MOSFET [44].

### II.3. Classification des convertisseurs statiques :

Il faut porter une attention particulière à l'utilisation de "l'énergie électrique" sous forme de Tension et courant alternatifs (le plus souvent des ondes sinusoïdales), soit sous la forme Tension et courant continu (état stable). Savoir "électronique "puissance" fait référence au fait qu'une source d'énergie est connectée à un récepteur donné [46], On différencie quatre types de convertisseurs dont les schémas de principe sont donnés, [41]

- Convertisseur alternatif-continu : redresseur.
- Convertisseur alternatif-alternatif : c'est un gradateur lorsque seule la valeur efficace de la tension alternative est modifiée, sinon c'est un cyclo convertisseur.
- Convertisseur continu-continu : hacheur.
- Convertisseur continu-alternatif : onduleur.

Type de convertisseur	Énergie en entrée	énergie en sortie	Modification de La nature	Réglage de la puissance
Hacheur	continu	continu	non	oui
Alimentation à découpage	continu	continu	non	non
Onduleur	continu	alternatif	oui	oui
Gradateur	alternatif	alternatif	non	oui
Redresseurs à diodes	alternatif	continu	oui	non
Redresseurs commandés	alternatif	continu	oui	oui
Cycloconvertisseur	alternatif	alternatif	non	oui

Tableaux II.1 : présentation les différents types des convertisseurs et Certains leurs caractéristiques [38]

Certains convertisseurs sont réversibles, c'est-à-dire qu'ils peuvent renvoyer l'énergie électrique de l'utilisateur vers la source d'alimentation en inversant les rôles d'entrée et de sortie.

Les redresseurs entièrement commandés par thyristor peuvent être utilisés comme redresseurs et onduleurs. [38]

### II.3.1. Le redresseur :

#### II.3.1.1. Définition :

Le convertisseur alternatif - continu également appelé redresseur est un convertisseur de l'électronique de puissance qui destiné à alimenter une charge de type continu (un récepteur branché à leur sortie), qu'elle soit inductive ou capacitive à partir d'une source alternative (monophasé ou polyphasé). La source est la plupart du temps du type tension. [47]

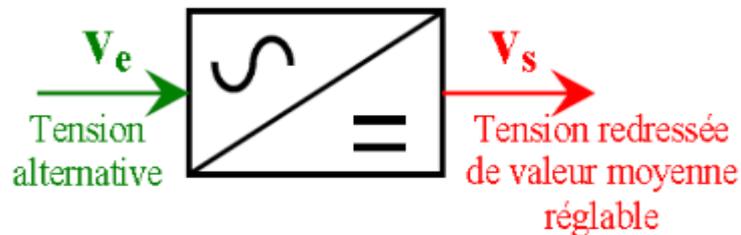


Figure II.7 : Schéma de principe de la conversion alternatif – Continu [48].

#### II.3.1.2. Les différents types :

Le redresseur non commandé est composé de diodes montées en pont. Ici en pont monophasé (appelé pont de GRAETZ). [48]

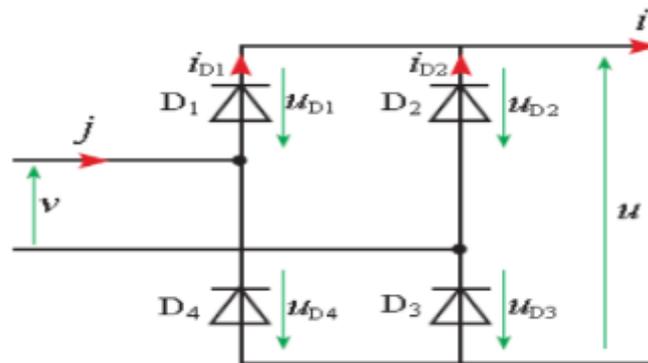


Figure II.8 : schéma de redresseur non commandé [48].

Le redresseur commandé est composé de thyristors montés en pont. Ici en pont triphasé. [48]

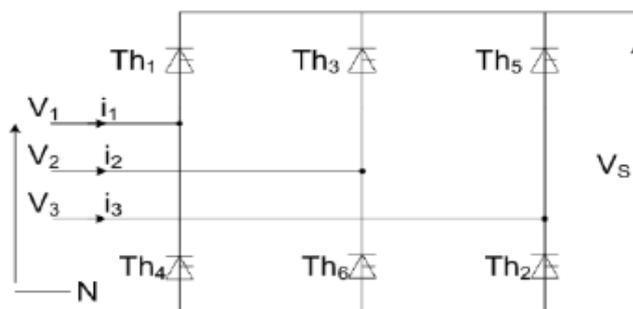


Figure II.9 : schéma de redresseur commandé [48].

### II.3.1.3. L'utilisation d'un redresseur :

Il est utilisé par exemple pour : [47]

- L'alimentation de moteur à courant continu.
- Chargeur de batteries d'accumulateur.
- Variateur de vitesse pour moteur à courant continu.

### II.3.2. Le gradateur :

#### II.3.2.1. Définition :

On désigne sous le nom de gradateurs tous les convertisseurs statiques qui, alimentés par un réseau alternatif, fournissent une ou plusieurs tensions à valeur moyenne nulle, de même fréquence que celle du réseau d'alimentation, mais de valeur efficace différente, celle-ci étant habituellement réglable. [49]

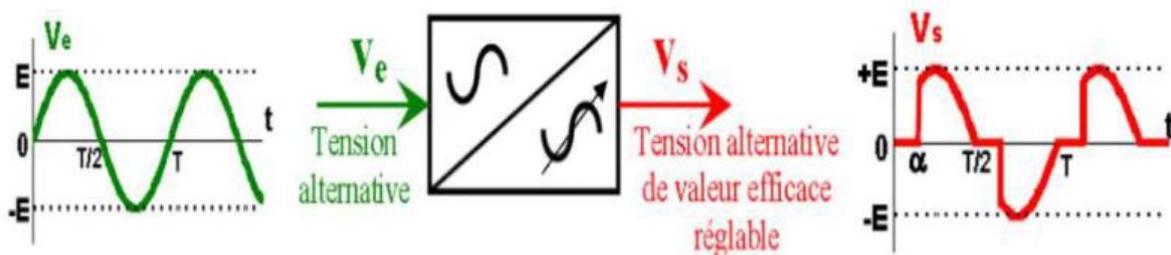


Figure II.10 : Schéma de principe de gradateur [48].

#### II.3.2.2. Les types de gradateur :

- Gradateur à angle de phase : il s'agit d'un appareil qui fournit une tension sinusoïdale de valeur efficace constante à une charge avec un courant alternatif non sinusoïdal de la même fréquence que la tension d'alimentation, mais Valeur efficace réglable. [50]
- Gradateur à train d'ondes : Il s'agit d'un dispositif qui fournit une tension sinusoïdale de valeur efficace constante pour fournir une rafale de tension à la charge, modifiant ainsi la valeur efficace de la tension aux bornes de la charge. [50]

#### II.3.2.3. L'utilisation d'un gradateur :

Il est utilisé pour : [49]

- Alimentation des machines asynchrones sous tension variable
- Variateurs d'éclairage ou de chauffage
- Utilisation en redressement commandé
- pouvoir régler de façon continue la puissance réactive échangée avec le réseau.

### II.3.3. Le hacheur :

#### II.3.3.1. Définition :

Ce sont des convertisseurs DC-DC qui permettent de modifier la tension DC en fonction des besoins ou de modifier la vitesse d'un moteur DC ou de régler la luminosité d'une lampe. Fait à haute fréquence. Pour une source de tension continue, il s'agit d'un analogue d'un gradateur pour le mode alternatif. [51]

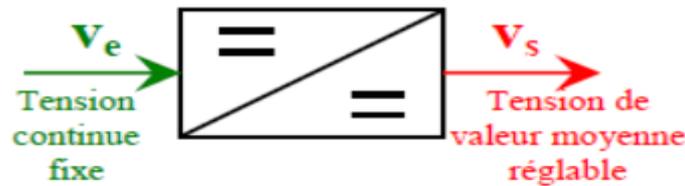


Figure II.11 : schéma de principe de hacheur [48].

#### II.3.3.2. Les types d'un hacheur :

L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Les différences structures de hacheurs dépendent du cahier des charges imposé au système pour choisir le type de hacheur prendre en compte la nature des réseaux d'entrée et de sortie. [51]

Les types de convertisseur DC-DC peuvent-être : [51]

- Hacheur abaisseur (ou Buck).
- Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost).
- Hacheur élevateur (ou Boost).
- Hacheur élevateur (ou Boost).

#### II.3.3.3. L'utilisation d'un hacheur :

Il est utilisé pour : [48]

- Alimentation et réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu.
- Alimentation à découpage des ordinateurs.

### II.3.4. L'onduleur :

#### II.3.4.1. Définitions :

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la régulation du transfert de puissance entre une source de courant continu ou de tension et une source de courant ou de tension choisie. Il connecte une tension continue ou une structure de courant à un récepteur monophasé ou tension ou courant alternatif polyphasé. [52]

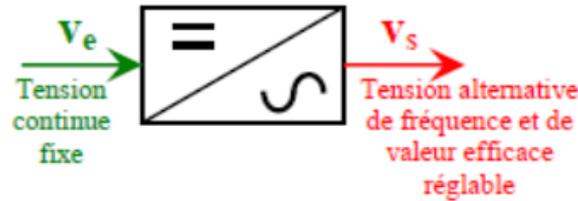


Figure II.12 : schéma de principe d'un onduleur [48].

### II.3.4.2. Les types d'onduleur :

Les montages onduleurs sont très nombreux en fonction de leurs applications, de leurs structures et de leurs commandes. Nous pouvons citer les onduleurs suivant :[53]

- L'onduleur monophasé :
  - push-pull.
  - demi-pont.
  - en pont.
- L'onduleur triphasé :
  - Onduleur à onde rectangulaire.
  - Onduleur à modulation de largeur d'impulsion.

### II.3.4.3. Les applications d'un onduleur :

Les principales applications des onduleurs sont : [54] [55]

- les alimentations de secours, permettant de suppléer la disparition de l'énergie sur un réseau alternatif.
- les variateurs de vitesse pour les machines synchrones ou asynchrones où la variation de fréquence de la tension d'alimentation constitue le meilleur moyen de faire varier cette vitesse.
- Pour les installations qui nécessitent la continuité de l'alimentation : hôpitaux, centraux téléphoniques, circuits de sécurité, ...).
- Pour les appareils (ordinateurs, ...) qui exigent non seulement la continuité de leur alimentation, mais encore la protection contre les perturbations du réseau de distribution (variations de tension, parasites, coupures, ...).

## II.4. L'étude d'un convertisseur DC/AC (Onduleur) :

Comme nous avons vu précédemment l'objectif d'un onduleur est de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. Il utilise la technologie des interrupteurs de la même manière qu'un hacheur 4 quadrants. C'est grâce à une loi de commande particulière qu'il permet d'obtenir un signal sinusoïdal. [42]

### II.4.1. Onduleur monophasé :

Le principe de base consiste à connecter, alternativement dans un sens puis dans l'autre, une source continue (de tension ou de courant) à une charge de manière à lui imposer une alimentation (en tension ou courant) alternative. [43]

Nous prendrons le cas d'une charge  $R, L$  qui est le cas d'un enroulement d'une phase d'un moteur asynchrone ou synchrone. [55]

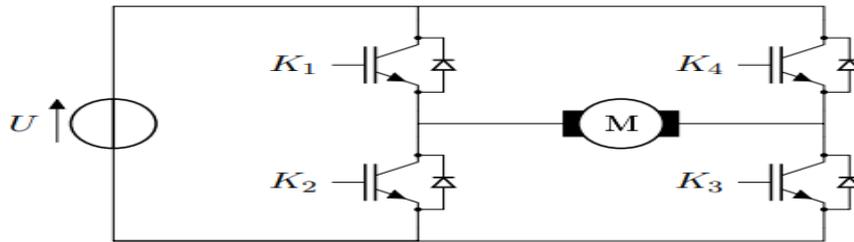


Figure II.13 : onduleur monophasé [55].

$K_1$  à  $K_4$  sont des interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistor bipolaire, transistor MOS, transistor IGBT, GTO, thyristor avec circuit d'extinction). [55]

Nous allons présenter trois structures élémentaires d'onduleurs de tension monophasée.

#### II.4.1.1. Pull push :

L'onduleur « push-pull » dont le schéma est donné à la figure suivante comporte un transformateur à point milieu. [38]

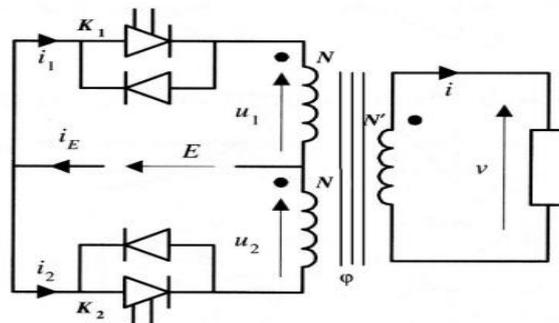


Figure II.14: Onduleur push-pull [38].

En raison du transformateur, les onduleurs push-pull sont principalement utilisés pour les appareils de faible puissance jusqu'à quelques centaines de watts. Fait intéressant, lors du réglage du niveau de tension Entrez et sortez. Tubes fluorescents 230 V alimentés par batterie Ou une batterie est un exemple classique de ce type d'application d'onduleur. [38]

#### II.4.1.2. En pont :

L'onduleur monophasé en pont est un montage constitué de 4 soupapes (IGBT, MOS, ...) schématisés par les 4 interrupteurs  $K_1, K_2, K_3, K_4$ , avec leurs diodes de roue libre. Le schéma de principe de ce montage est donné ci-dessous. [54]

Le montage suivant est constitué de deux bras d'onduleur : le bras A constitué de  $K_1$  et  $K_2$ , le bras B constitué de  $K_4$  et  $K_3$ . [54]

Si on considère A,  $K_1, K_2$ , B,  $K_4, K_3$  comme des variables logiques (fonctionnement en soupapes), on obtient les équations logiques suivantes : [54]

- Soupape  $K_i$                        $K_i=0 \Rightarrow$  Transistor bloqué                       $K_i=1 \Rightarrow$  Transistor saturé
- Bras A                               $A=0 \Rightarrow K_1 = 0, K_2 = 1$                        $A=1 \Rightarrow K_1 = 1, K_2 = 0$
- Bras B                               $B=0 \Rightarrow K_3 = 1, K_4 = 0$                        $B=1 \Rightarrow K_3 = 0, K_4 = 1$

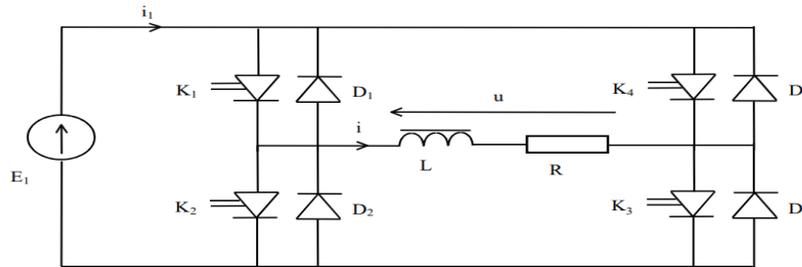


Figure II.15 : Schéma de principe de l'onduleur en Pont [44].

**II.4.1.3. Demi- pont :**

L'onduleur en demi-pont représenté figure (2.16) ne comporte que deux interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  mais nécessite deux générateurs de tension identiques  $E$ . [54]

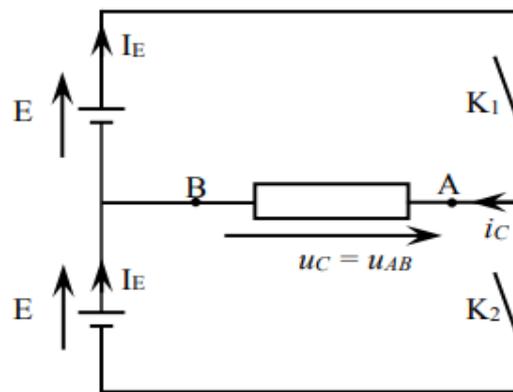


Figure II.16 : Principe d'un onduleur en demi-pont [43].

Pour bien comprendre le schéma précédent nous avons une petite explication :

- $E$  sont deux sources de tension continue idéales identiques. [53]
- $K_1$  et  $K_2$  sont deux interrupteurs électroniques commandable à l'ouverture et à la fermeture. [53]
- On appelle  $u_c$  tension aux bornes de la charge et  $i_c$  intensité du courant dans la charge. [43]

La commande est symétrique, cela signifie que pendant la moitié de la période de fonctionnement  $K_1$  est fermé et  $K_2$  est ouvert et pendant l'autre moitié de la période de fonctionnement  $K_1$  est ouvert et  $K_2$  est fermé. [53]

$K_2$	$K_1$	$K_2$	Interrupteur ouvert
$K_1$	$K_2$	$K_1$	Interrupteur fermé

Tableau II.2 : principe d'ouverture et fermeture des interrupteurs [43].

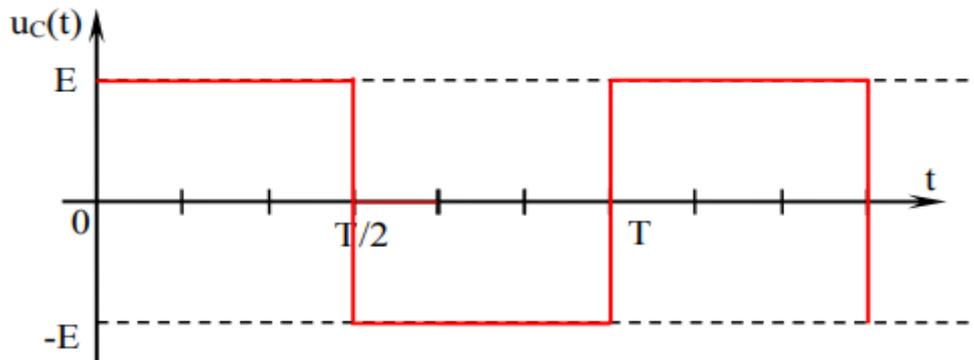


Figure II.17 : schéma démontre les différentes fluctuations de tensions par rapport au temps [43].

Sur la première demi-période ( $0 < t < T/2$ ), l'interrupteur K1 est fermé et K2 est ouvert. Seule la branche du haut est utilisée. La tension E se recopie aux bornes de la charge. [53]

Sur la deuxième demi-période ( $T/2 < t < T$ ), l'interrupteur K2 est fermé et K1 est ouvert. Seule la branche du bas est utilisée. La tension -E se recopie aux bornes de la charge. [53]

#### II.4.1.4. Fonctionnement on MLI :

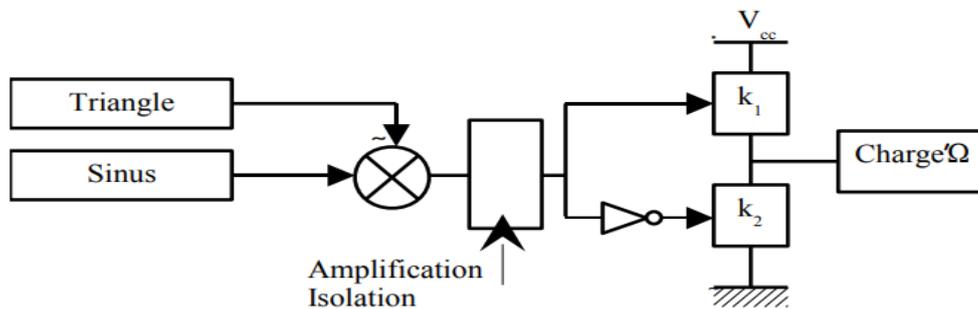


Figure II.18 : Principe du schéma de commande pour la MLI [56].

Ce mode de commande permet d'atteindre un double objectif : [56]

- Obtenir une valeur donnée pour le fondamental de la tension de sortie, toujours sans avoir à intervenir au niveau de la tension d'alimentation.
- Atténuer fortement les harmonique de rang faibles, ceux de rang élevé étant supposés sans influence sur le comportement de la charge. Les montages précédents sont les mêmes, seule la commande est modifiée

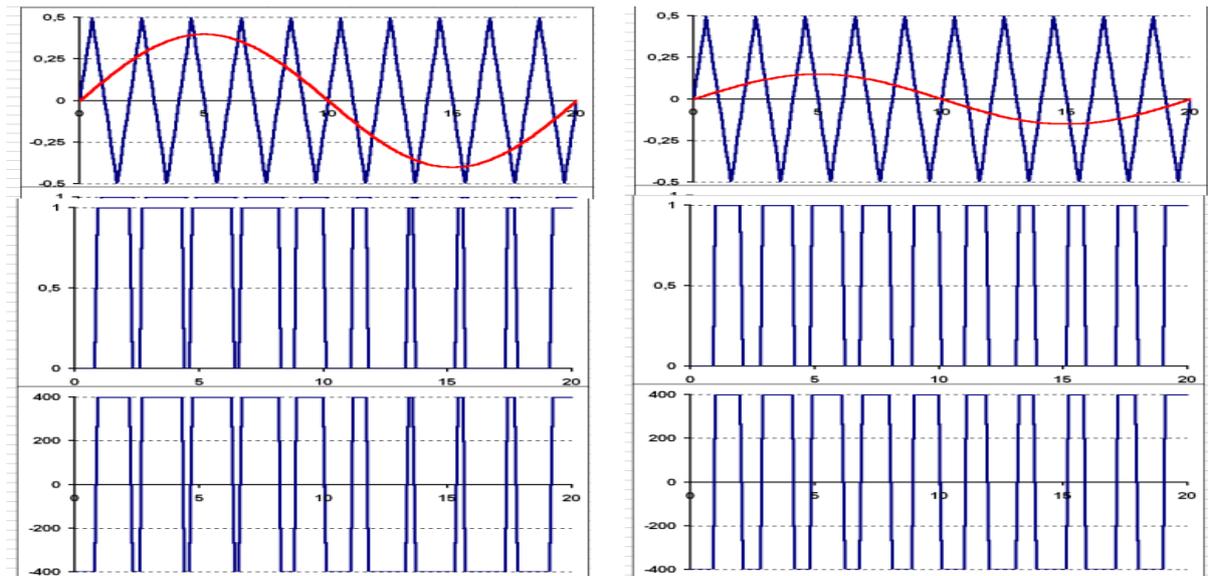


Figure II.19 : Forme d'onde pour un onduleur monophasé fonctionnant en MLI [56].

La différence avec les graphes de gauche et de droite, est l'amplitude du signal de référence. Cela a forcément une influence sur les ordres de commande mais aussi sur la forme de la tension de sortie. Nous nous apercevons que sur le graphe de gauche  $V_s(t)$  se rapproche le plus d'une sinusoïde, donc la valeur de son fondamental a augmenté. La modification de l'amplitude du signal de référence est donc le second paramètre de réglage. [56]

Les avantages de cette commande sont :[56]

- pousse les harmoniques de la tension de sortie vers les hautes fréquences, ce qui Faciliter le filtrage (plus facile à réaliser, moins cher). , montre la réponse spectrale de la tension de sortie. Nous voyons deux familles Les harmoniques à supprimer, l'une autour de l'ordre "m" et l'autre autour de l'ordre "2m". Pour obtenir cette réponse, m doit être supérieur à 15.
- Permet de régler l'amplitude de l'onde fondamentale de la tension de sortie. L'un des résultats est la possibilité d'alimenter un moteur à courant alternatif en Courant quasi-sinusoïdal (circuit LR = passe-bas).

#### II.4.2. Onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé en pont est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs monté en pont. La tension continue est généralement obtenue par un redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtre. Celui-ci est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables. [53]

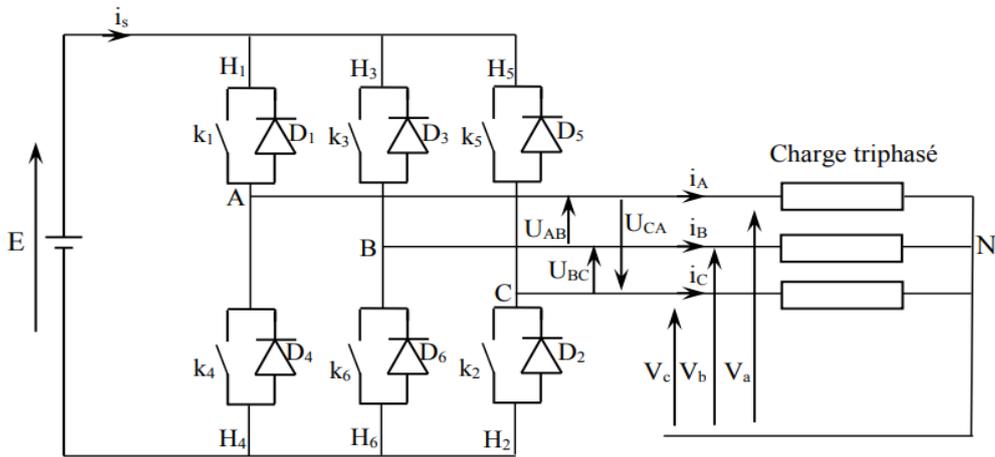


Figure II.20 : Structure d'un onduleur triphasé [43].

### II.4.2.1. Onduleur à onde rectangulaire :

Les différents intervalles de commande sont décalés d'un tiers de période comme indiqué ci-contre.

Les tensions par voies  $v_1$ ,  $v_2$  et  $v_3$  s'en déduisent immédiatement en remarquant que  $v_1$  vaut  $E$  lorsque l'interrupteur ( $H_1, D_1$ ) conduit et que  $v_1$  est nul lorsque l'interrupteur ( $H_4, D_4$ ) est passant.

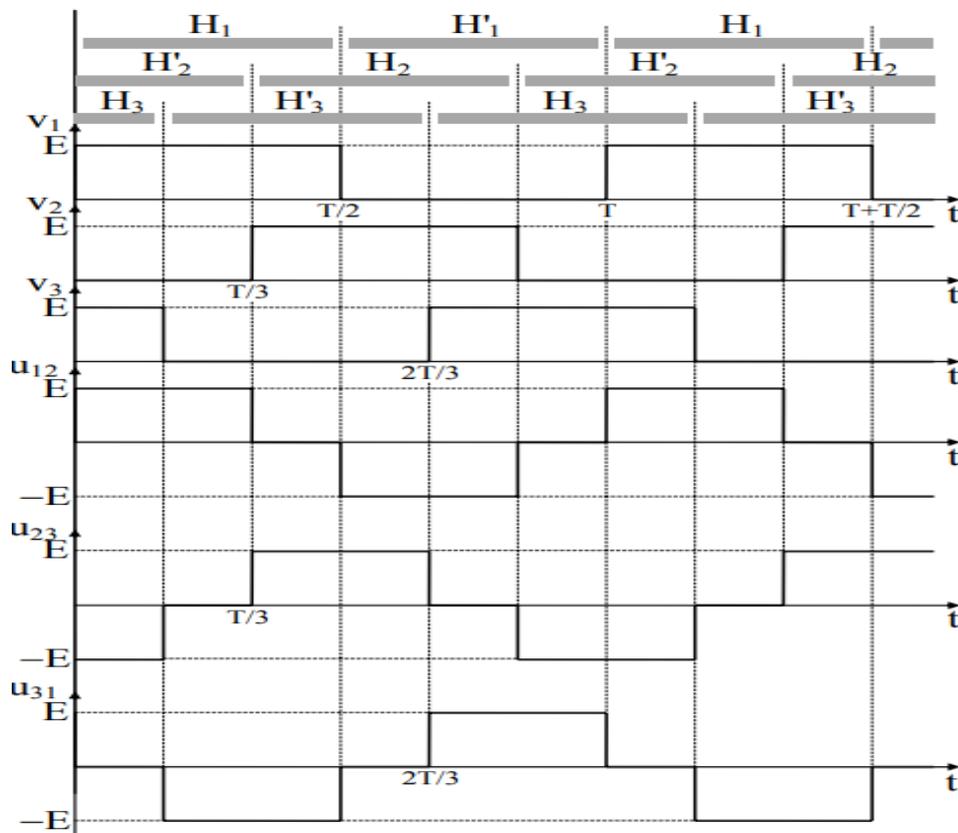


Figure 2.21 : Construction des chronogrammes des tensions composées [56].

Les tensions composées s'obtiennent ensuite en construisant graphiquement les différences  $v_1 - v_2$ ,  $v_2 - v_3$  et  $v_3 - v_1$ . L'examen de ces tensions montre en particulier que, du fait de l'empiétement des intervalles de commande, il apparaît un effet de roue libre analogue à celui observé dans le cas de l'onduleur monophasé à commande décalée. [56]

#### II.4.2.2. Onduleur à modulation de largeur d'impulsion :

Le principe et le processus sont les mêmes que pour les onduleurs monophasés, à l'exception des deux détails suivants : [56]

- Les différentes voies étant décalées d'un tiers de cycle les unes par rapport aux autres, trois commandes distinctes doivent être créées. En particulier, pour le PWM temps réel, trois modulateurs seront donc utilisés, et trois porteuses sont utilisées a priori (cependant, une porteuse commune peut être utilisée dans la plupart des cas). [56]

- Indique que les harmoniques de multiples de 3 présents dans chaque tension de canal ne sont pas transférés à la tension de sortie.

Donc, en MLI pré calculé, il est inutile de les éliminer, ce qui permet d'obtenir un certain niveau d'harmoniques pour une panne donnée. Une canette Cette propriété peut également être utilisée dans le cadre d'un MLI en temps réel en ajoutant module la troisième harmonique avec des caractéristiques suffisantes, ce qui permet d'obtenir une valeur Le fondamental effectif maximal est égal à 0,8E sans manquer un cran (au lieu de 0,71E pour MLI monophasé). [56]

#### II.4.2.3. Fonctionnement en commande MLI :

Le principe et le processus sont les mêmes que les onduleurs monophasés Pleine vague : [57]

- Les différentes voies étant décalées d'un tiers de cycle les unes par rapport aux autres, il faut créer trois commandes différentes. En particulier, pour le contrôle MLI en temps réel, trois modulateurs et trois porteuses seront donc utilisés (cependant, une porteuse commune peut être utilisée dans la plupart des cas). [57]

- Indique que les harmoniques multiples de 3 présents dans la tension ne sont pas transfert vers la tension de sortie. Les formes d'onde de sortie de la tension et du courant à quatre niveaux convergent en un signal sinusoïdal, comme illustré à la Figure (2.22), la fréquence du signal MLI = 1 KHz. [57]

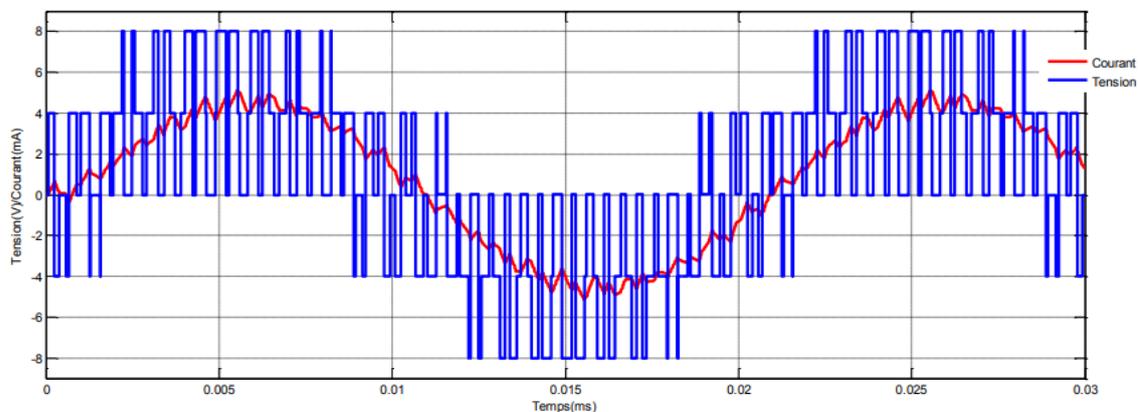


Figure II.22 : Forme d'onde pour un onduleur triphasé fonctionnant en MLI [57].

## II.5. Modélisations des onduleurs :

### II.5.1. Modélisation de MLI :

Afin d'obtenir la fonction de connexion pour les semi-conducteurs, une technique de modulation appelée MLI est employée. Les bases de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la variation du cycle de service d'un signal périodique. Le cycle de service ( $D$ ) est défini comme la variation de la partie positive du signal ( $T_{on}$ ) liée à la période ( $T$ ). [59]

$$D = \frac{T_{on}}{T} \quad (\text{II.1})$$

Dans les circuits analogiques, un MLI est obtenu en comparant une commande de signal ( $V_{con}$ ) avec une onde triangulaire. [59]

À cet effet, normalement un comparateur est utilisé. Ainsi, la production sera de 1 si la branche positive du comparateur est supérieure à la branche négative et de 0 si elle est inférieure. La figure (2.23) reflète les schémas et les formes d'onde obtenus dans un circuit MLI analogique. [60]

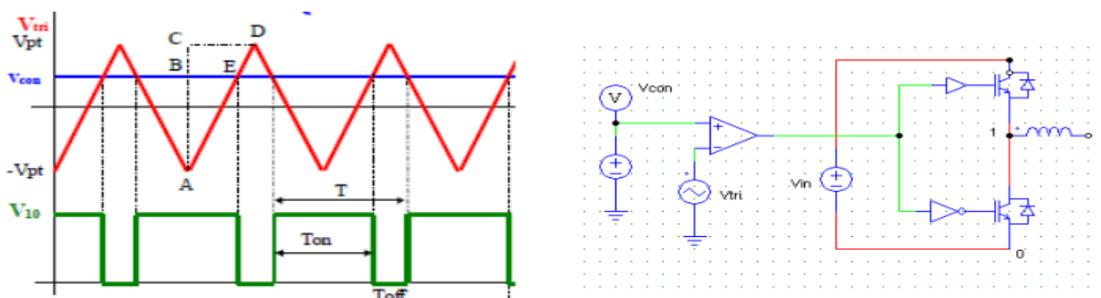


Figure II.23 : Courbes et schémas MLI [59].

Il faut souligner qu'avec un  $V_{con}$  constant, seul un cycle de service fixe peut être obtenu. Dans le but d'avoir un cycle de service variable, le contrôle du signal doit être sinusoïdal. De cette façon, comme  $V_{con}$  n'est pas constant, la partie positive relative à la période change. Par conséquent, deux fréquences doivent être considérées.  $V_{con}$  oscille normalement à la fréquence de sortie désirée, qui est généralement une valeur basse, 50 ou 60 Hz.

En outre, il est nécessaire de déterminer la fréquence de l'onde triangulaire. Cette fréquence est directement liée à la fréquence de commutation des semi-conducteurs et doit être soigneusement choisie. Normalement, la valeur sélectionnée est supérieure à 20 kHz, afin de dépasser le seuil auditif humain. [59]

Fondamentalement, il existe deux techniques principales pour obtenir un PWM : la modulation bipolaire et unipolaire. Les deux peuvent être appliqués à un pont en H complet, et seront étudiés dans la section suivante. Les interrupteurs latéraux supérieurs sont nommés K1 et K3 et les interrupteurs latéraux inférieurs sont K2 et K4. [59]

#### II.5.1.1. Modélisation bipolaire :

En modulation bipolaire, la tension de sortie oscille entre deux valeurs ( $V_{dc}$  et  $-V_{dc}$ ) dans la figure (2.23), d'où son nom. [59]

La figure (2.23) présente un schéma de base d'un pont en H complet avec modulation bipolaire. On peut voir que dans cette modulation, la fonction de connexion est la même pour K1 et K4 et pour K2 et K3. Cela signifie qu'une seule commande de signal est nécessaire. Comme les commutateurs sont complémentaires dans les performances sur chaque branche, la fonction de connexion doit être inversée pour y parvenir. [59]

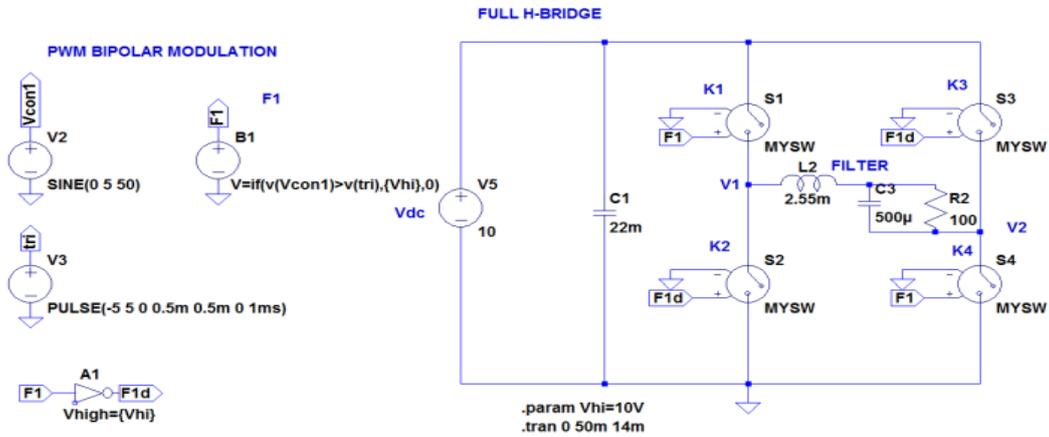


Figure II.24 : Circuits analogiques pour modulation bipolaire dans le logiciel LTSpice [59].

La fonction de connexion, et donc la commutation des MOSFETs dépendent de la différence entre la tension de commande ( $V_{con}$ ) et l'onde triangulaire ( $V_{tr}$ ). Le schéma suivant reprend l'exécution de la modulation bipolaire. [59]

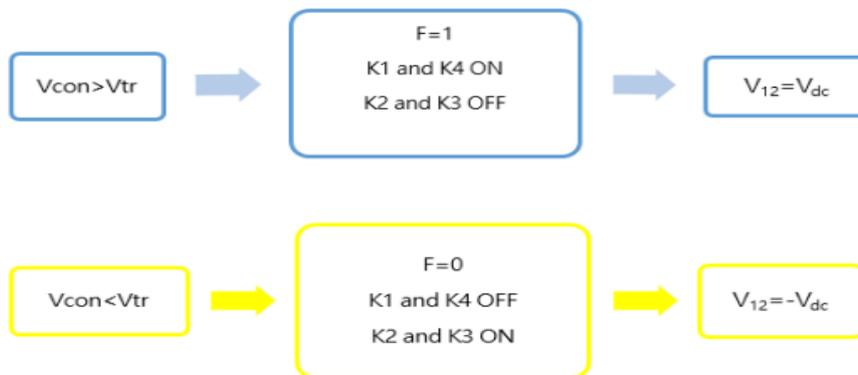


Figure II.25 : Reprise de la modulation bipolaire [59].

En outre, les formes d'onde principales sont collectées dans la Figure (2.26) :  $V_{con}$  (tension de commande sinusoïdale),  $V_{pt}$  (tension triangulaire)  $V_{10}$  et  $V_{20}$  (tension sur les commutateurs de bas-côté de chaque branche),  $V_{12}$  (tension de sortie sans filtrage) et  $iL$  (courant sur l'inductance). [59]

La tension de sortie ( $V_{12}$ ) résulte de la différence entre les tensions dans les deux jambes. Elle oscille entre deux niveaux,  $V_{dc}$  et  $-V_{dc}$ . Sa période est la même que celle de la commutation, comme on peut le voir à la figure (2.26). [59]

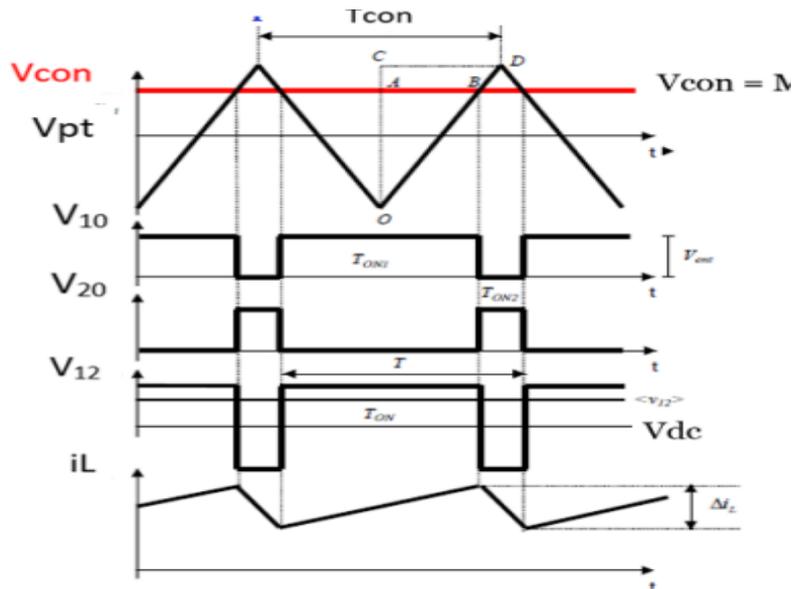


Figure II.26 : Formes d'ondes principales de modulation bipolaire [60].

En modulation bipolaire, l'harmonique de commutation de la tension de sortie est la somme des harmoniques de commutation des deux branches. Pour les réduire, on peut choisir d'augmenter la fréquence de commutation, car cela aide au filtrage. [60]

Cependant, les pertes de commutation peuvent devenir trop importantes. Un avantage important de cette modulation est la tension constante à la terre (tension de mode commun), qui fait de la modulation bipolaire le choix préféré dans des applications telles que les systèmes photovoltaïques sans transformateur. [59]

### II.5.1.2. Modélisation unipolaire :

Contrairement à la modulation bipolaire, dans le cas d'une modulation unipolaire mise en œuvre dans un circuit, la fonction de connexion est différente dans les deux branches. Étant donné que les commutateurs doivent être complémentaires dans les performances, les deux branches du pont sont liées par la tension triangulaire. En outre, la tension de commande sinusoïdale est opposée dans le signe dans les deux jambes. [59]

La figure (2.27) montre un schéma simple de la mise en œuvre de la modulation unipolaire avec le logiciel LTSpice. [59]

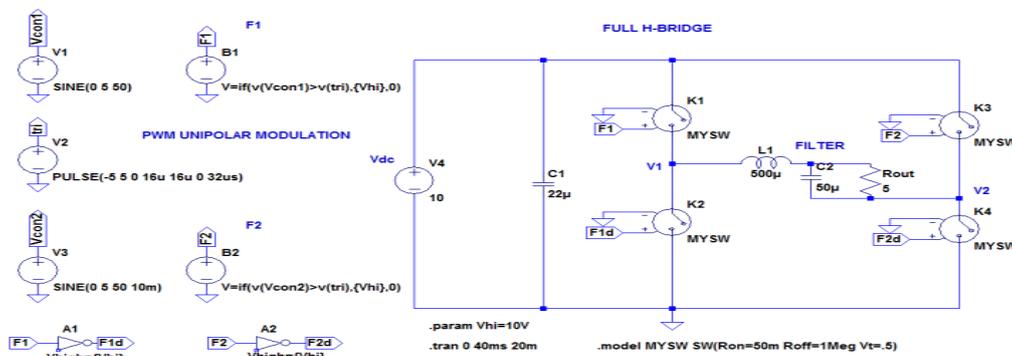


Figure II.27 : Circuits analogiques pour modulation unipolaire dans le logiciel LTSpice [59].

Le fonctionnement des fonctions de connexion est le même qu'en mode bipolaire, mais au lieu d'avoir deux niveaux de tension en sortie, il y en a trois :  $V_{dc}$ , 0 et  $-V_{dc}$ . De cette façon, la sortie est plus précise qu'en modulation bipolaire. Un résumé de la performance de la modulation unipolaire est recueilli ci-dessous Figure (2.27). En outre, les principales formes d'onde peuvent être observées dans la figure (2.28). [59]



**Figure II.28 :** Résumé de la modulation unipolaire [59].

La période de la tension de sortie est la moitié de celle de commutation et donc la fréquence de sortie double celle de commutation. Comme les harmoniques sont dans une fréquence plus élevée, pour la même fréquence de commutation l'inductance de sortie peut être plus petite que dans la modulation bipolaire.

En ce qui concerne les harmoniques, comme la tension de sortie résulte de la différence entre les branches, les familles paires d'harmoniques ont une double amplitude, étant donné qu'elles sont hors phase de  $180^\circ$  sur chaque branche. D'autre part, les familles impaires sont en phase et n'apparaissent pas dans la sortie. [59]

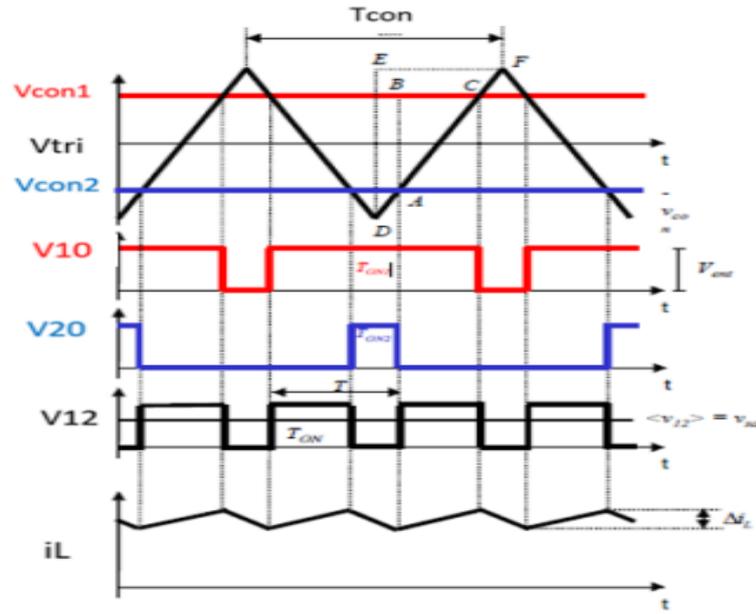


Figure II.29 : Principales formes d'onde de modulation unipolaire [59].

Contrairement à la modulation bipolaire, la modulation unipolaire n'a qu'un signe sur chaque demi-période, d'où son nom. La comparaison entre les deux modulations et leurs extrants est reflétée à la figure (2.30). On peut apprécier comment la forme d'onde filtrée (sinusoïdale) est plus claire avec la modulation unipolaire. On peut aussi voir la différence entre les niveaux de sortie (deux en unipolaire et trois en bipolaire). [60]

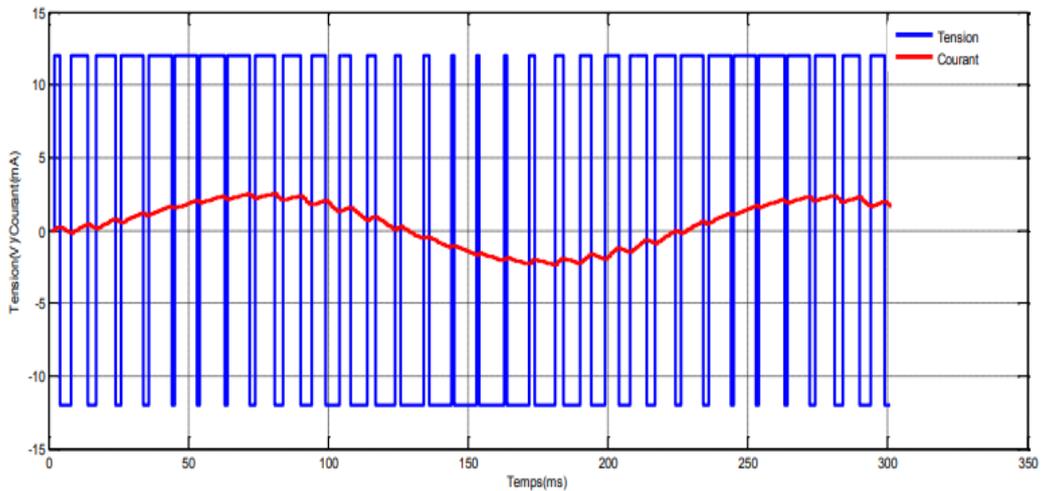


Figure II.30 : Forme d'onde de sortie avec modulation bipolaire (haut) et modulation unipolaire [59].

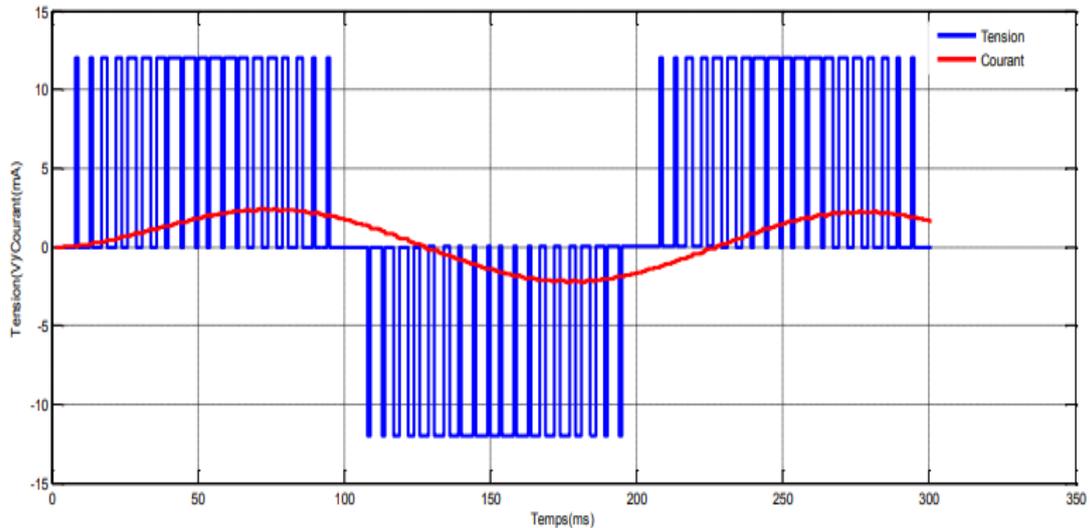


Figure II.30 : Forme d'onde de sortie avec modulation bipolaire (haut) et modulation unipolaire [59].

## II.6. Conclusion :

Notre centre d'intérêt au cours de ce chapitre se porte sur l'étude de l'onduleur, un des types des convertisseurs statiques suscités à savoir (gradateur, redresseur, hacheur). Une définition, une classification et quelques applications ont été attribuées à chaque type ainsi que leur mode d'utilisation.

L'étude des onduleurs a été détaillée par la suite puisque c'est l'objet sur lequel est basée notre recherche tout en décrivant les différents types...etc. et puis nous avons traité la modélisation d'un onduleur en expliquant la modélisation MLI plus précisément. Le chapitre prochain sera lié à l'étude de la synthèse de perturbation électromagnétique d'un onduleur dans un environnement électrique.

# **Chapitre III**

*Simulation des perturbations électromagnétiques d'un convertisseur  
statique DC/AC*

## Chapitre III : Simulation des perturbations électromagnétiques d'un convertisseur statique DC/AC

### III.1. Introduction :

Dans le meilleur des cas, le contrôle de la compatibilité électromagnétique suit de près le calendrier de sortie du produit. Cependant, cela est rare car les problèmes de compatibilité électromagnétique et les tests en laboratoire peuvent retarder la sortie commerciale de plusieurs mois. L'analyse CEM en électronique de puissance consiste à simuler le fonctionnement des convertisseurs à l'aide d'un logiciel de simulation basé sur des circuits tel que SPICE. Cette méthode permet de visualiser la forme d'onde du convertisseur dans le domaine temporel. [62]

Le logiciel Spice (Simulated program with Integrated Circuit Emphasis) fût conçu dans les années 70 à l'université de Californie (Berkeley) puis il a été amélioré au fil des années. Pour effectuer des simulations de circuits électroniques, à partir de modèle plus ou moins complexe de composants, il existe plusieurs types de SPICE (Ngspice, LTSpice, Tcspice, Pspice...). Parmi ces différents types nous avons utilisé dans notre travail le logiciel LTSpice. [63]

Nous allons essayer dans ce troisième chapitre de pousser la simulation de notre onduleur monophasé en pont complet.

Notre circuit va avoir une sortie conventionnelle de 220V sou une fréquence de 50Hz et démarrant d'une tension de 6V. En sort les résultats de simulation avec et sans le réseau stabilisateur d'impédance de ligne (RSIL) Nous allons simuler tout le processus de réalisation sous LTSPICE dans chaque étapes et partie du circuit.

Pour valider notre travail, plusieurs résultats de simulation seront présentés et expliqués afin de valider tous les étages constituant ce système invertir pour appliquer aux plusieurs domaine.

### III.2. Définitions :

Le logiciel LTSpice est un simulateur hautes performances gratuit basé sur SPICE III avec des modules Schematic pour l'édition de schémas électroniques ainsi que des modules de visualisation des résultats Il contient plus de 100 modèles d'amplis op, de modèles de transistors, de portes logiques, etc. [64]

Le logiciel LTSpice peut [64] :

- Simulez des circuits électroniques contenant : des résistances, des condensateurs, des bobines d'arrêt, des transformateurs, des lignes de transmission, des sources de tension et de courant indépendantes ou contrôlées, des diodes, des transistors bipolaires, des FET et des transistors MOS.
- Simulez des composants électroniques plus complexes : amplis op, comparateurs, multiplicateurs, etc...
- Visualiser les résultats de l'étude des circuits.

### III.3. Présentation :

Au lancement de l'application, le logiciel se présente sous la forme d'un éditeur graphique de schémas électriques. Le logiciel dispose également d'outils de visualisation des résultats de simulation, ainsi que de bibliothèques de composants multiples pour les composants passifs traditionnels (résistances, condensateurs, inductances, diodes, etc.), pour certains composants actifs (principalement des produits BT, mais comprenant également différents types de transistors) et pour les fonctions mathématiques de base que nous décrirons plus loin (sources idéales contrôlées, lignes de transmission, etc. [65]

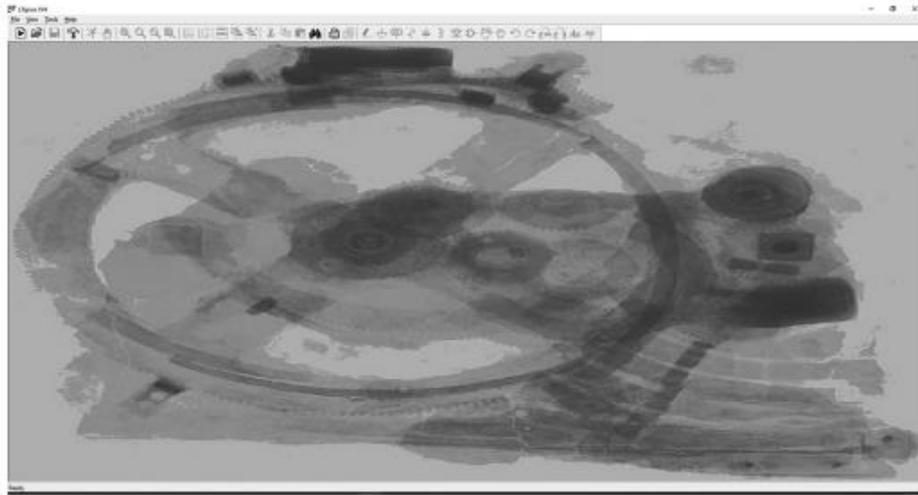


Figure III.1: LTspice une fois lancé [66].

On va exposer chaque menu avec les commandes correspondantes. Après avoir cliqué sur l'exécutable une première interface apparaît les commandes disponibles sur cette interface sont détaillés comme suit :



Figure III.2 : les commandes disponibles sur Ltspice [66].

a) Menu File : dans ce menu on trouve les commandes suivantes : [67]

New schematic (nouveau schéma)		cette commande nous permet de commencer un nouveau projet, en cliquant dessus, on aura la deuxième interface avec un nouveau document.
New symbol (nouveau symbole)		pour choisir le symbole de l'élément désiré.
Open (ouvrir)		en cliquant sur cette commande, on a une boîte de dialogue qui apparaît avec une liste de fichiers afin d'en sélectionner un pour l'ouvrir.
Print Setup (Configuration de l'impression)		cette commande permet de configurer et d'imprimer une figure disponible sur LTspice.

## b) Le menu tools : [67]

Control panale (panneau de contrôle)		pour configurer un certain nombre d'options.
Color préférence (préférence de couleur)		pour changer la couleur du graphe.

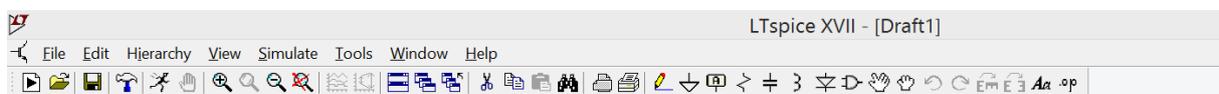
## c) Le menu View : [67]

C'est le menu avec lequel on peut activer ou désactiver les barres de LTspice.

## d) Le menu help : [67]

Aider l'utilisateur à manipuler le logiciel d'une façon plus aisée.

Maintenant en activant la commande New ou Open la deuxième interface apparait :



## a) Menu File :

Close		le LTspice ne nous donne pas la possibilité d'ouvrir deux projets en même temps, c'est pour ça qu'il faut d'abord fermer l'ancien projet pour avoir un autre.
Save		Pour enregistrer les modifications apportées au projet.
Save as		pour enregistrer nos nouveaux projets dans un fichier sous un répertoire.
Print		cette commande permet d'imprimer nos figures.
Print preview		permet un aperçu avant impression de nos projets.

## b) Menu Edit : [67]

Ce menu comporte des commandes permettant de modifier les schémas : [67]

Undo (annuler)		Pour annuler l'action précédente.
Texte		Pour ajouter du texte sur le schéma comme des commentaires.
Spice directive		Pour ajouter une directive spice sur le schéma.

On trouve aussi les compassant pour dessiner les schémas : les résistances, les inductances, capacité, diodes, et des autre compassant pour faciliter le dessin de schéma.

## c) Menu view : [67]

On trouve les boutons pour le zoom, zoom avant, zoom arrière, et une bouton pour annulé le zoom.

d) Menu hierarchy :[67]

On trouve des boutons pour créer un nouvelle symbole et une nouvelle feuille.

e) Menu Simulate :[67]

On trouve le boutons pour lancer la simulation de notre schéma (RUN).

### III.3.1. Dessin de circuit : [65]

Clique gauche sur le symbole désiré de la barre d'édition Schematic :

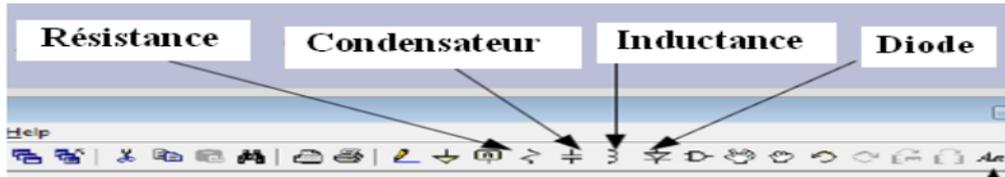


Figure III.3 : les symboles de la barre d'édition [65].

Lorsque on clique sur le symbole par exemple (résistance) voilà ce que en trouve :

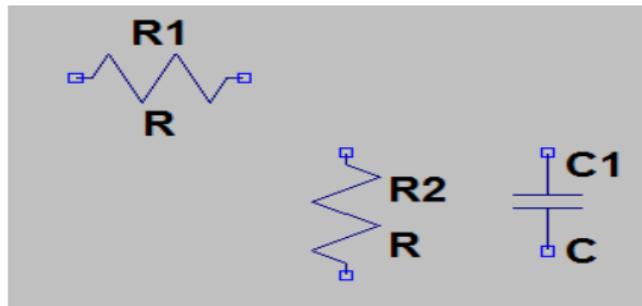


Figure III.4 : symbole de résistance [67].

Pour modifier les valeurs des composants en clique de droite :[67]

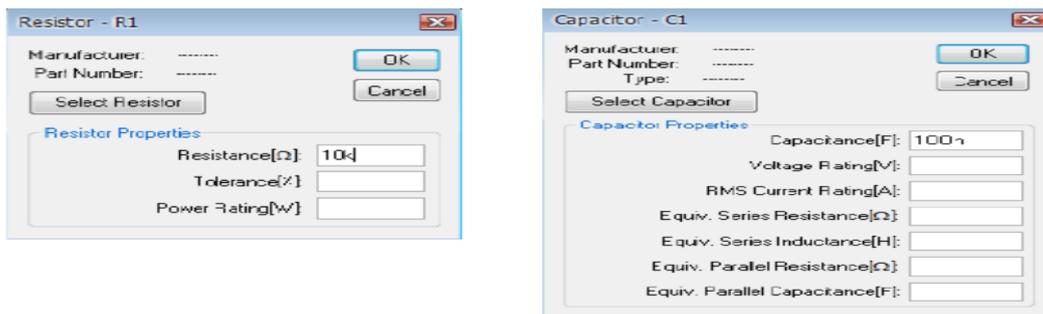


Figure III.5 : modifier les valeurs de composants [67].

Après avoir saisi les valeurs et les unités, maintenant en va les attacher avec des filtres :

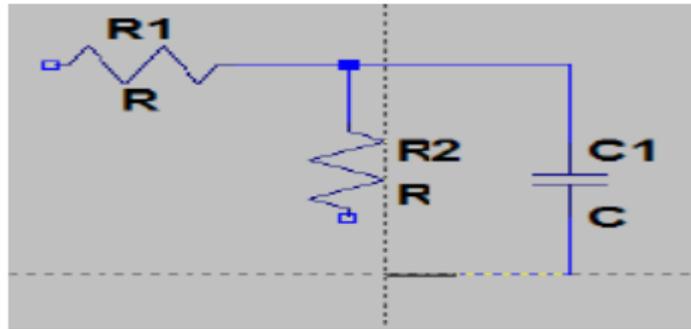


Figure III.6 : attachement des résistances [67].

Après en va placer le compassant de la tension et de la masse pour compléter le schéma :

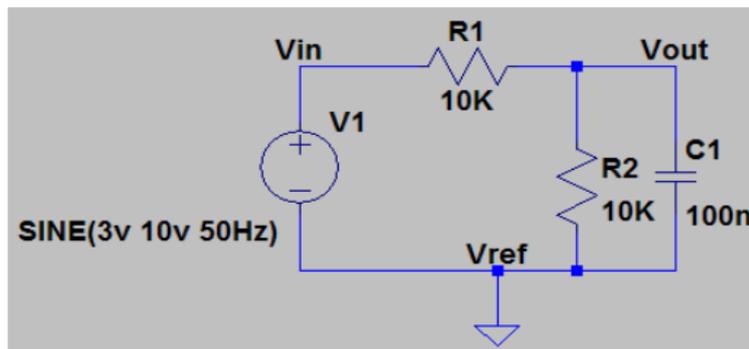


Figure III.7 : schéma coumplet après le placement des composants [67].

### III.3.2. Effectuer une simulation :

Lorsqu'on dessine le schéma, la première chose à faire est évidemment de savoir quoi simuler en plaçant la bonne source dans le schéma électrique. Ne pas oublier à mettre une masse quelque part dans le circuit comme nous avons fait dans le schéma précédant, Si ce n'est pas fait, le simulateur renverra un message d'erreur en guise de résultat de simulation. [67]

Après en passe au type de la simulation que nous voulons le faire, Si aucune simulation n'est définie, une action sur le bouton de lancement de la simulation (le bonhomme qui galope) ouvre une boîte de dialogue qui propose alors de choisir parmi les différents types de simulation accessibles.

En renseignant les différents champs, la directive SPICE associée et visible en bas de la boîte de dialogue se remplit. Une fois la simulation configurée, cette directive est à coller sur la feuille de travail. La simulation peut être lancée. À tout moment, cette directive, présente sur le schéma peut être éditée par un clic droit de la souris. [67]

### III.4. Onduleur monophasé en pont H :

Comme nous avons vu dans le chapitre précédant, la configuration la plus générale de l'onduleur de tension monophasé est celle dont la structure est en pont complet.

Fonctionnement à deux séquences :

Ce fonctionnement correspond à la fermeture et l'ouverture simultanées des deux couples d'interrupteurs (T1, T 3) et (T 2, T 4), ces deux couples d'interrupteurs sont complémentaires. [62]

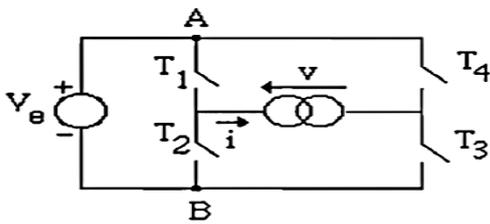


Figure III.8 : Onduleur en pont H [62]

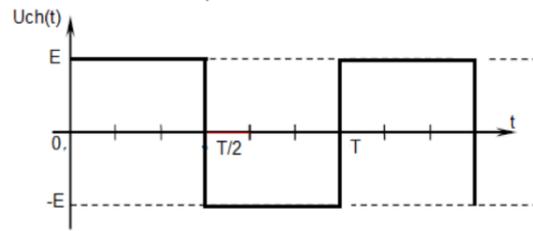


Figure III.9 : L'allure de la tension au borne de la charge [62]

Dans ce cas la tension de modulation prend deux valeurs : [62].

$$V_s = V_e, V_s = -V_e \tag{III.1}$$

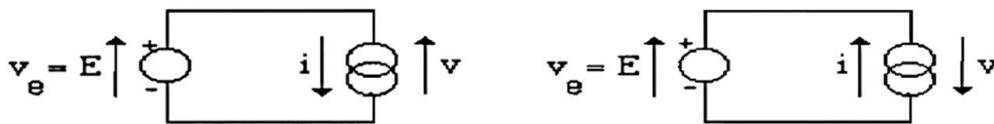


Figure III.10 : la tension d'un onduleur [62].

### III.5. Simulations :

#### III.5.1. Sans RSIL :

##### III.5.1.1. Sans filtre :

On a réalisé un schéma d'onduleur monophasé en pont H avec des transistors de types MOSFET (IRF2805) seulement avec une charge :

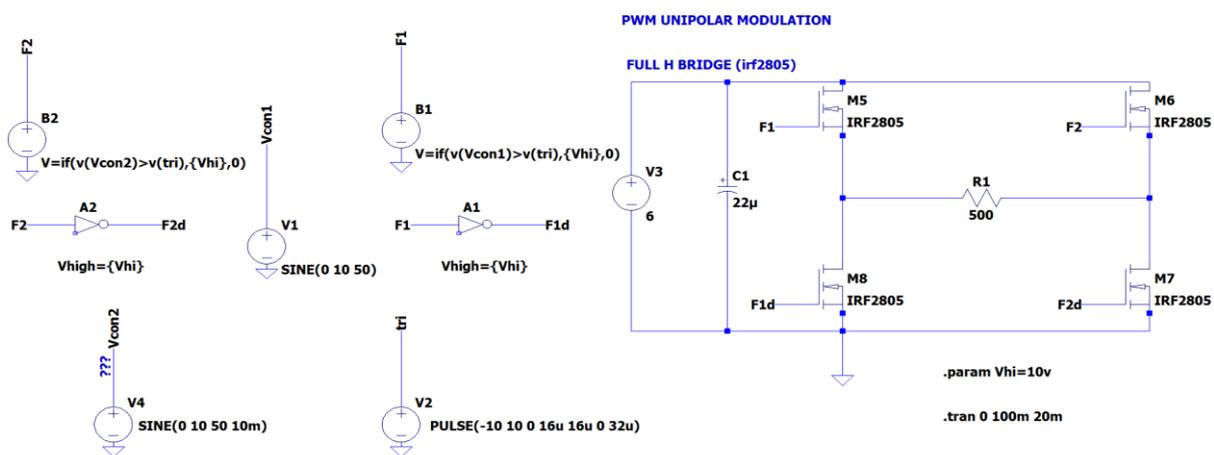


Figure III.11 : schéma d'onduleur sans filtre sous LTSPICE.

##### III.5.1.1.1. Principe de fonctionnement :

Les états des MOSFET permettent de déterminer la valeur aux bornes de la charge :

- Pour  $0 < t < T/2$  : Les MOSFET M5, M8 sont fermés et M7, M6 sont ouverts.
- Pour  $T/2 < t < T$  : Les MOSFET M7, M6 sont fermés et M5, M8 sont ouverts.

### A. La réponse temporelle de tension et courant de charge :

#### ❖ La tension :

La simulation de la tension au borne de la charge sous LTSPICE.

La figure (III.12) représente la réponse temporelle de la tension de charge du circuit sans filtre.

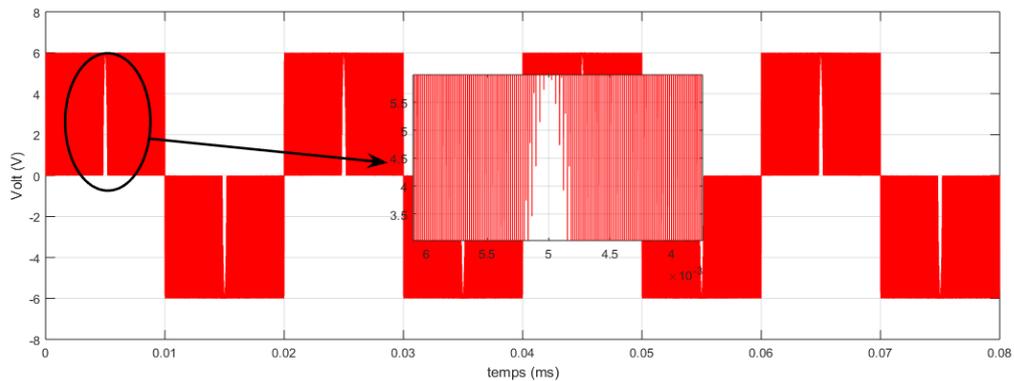


Figure III.12 : la tension à la borne de la charge sans filtre.

Dans le spectre de la figure (III.12), on constate un signal en forme carré de tensions en fonction du temps ou borne d'une charge résistive de  $500\Omega$ . Ce signal se décompose en deux phases, la première (MOSFET M5 et M7) sont commandés à la fermeture de l'instant 0 à 0,01ms pendant cette durée (MOSFET M6 et M8) sont ouverts. La deuxième (MOSFET M6 et M8) est à leur tour commandés à la fermeture de l'instant 0,01ms à 0,02ms.

Cette commande génère beaucoup de perturbations qui sont des tensions à haute fréquence, ces parasites dues à la grande vitesse de la variation rapide des composants électriques, et permet de provoquer des erreurs dans le traitement des données et le blocage de notre système. Pour avoir un transfert d'énergie correct, il faut diminuer les harmoniques de tension de façon à les rendre sinusoïdale.

#### ❖ Le courant :

La figure (III.13) représente la réponse temporelle du courant de charge.

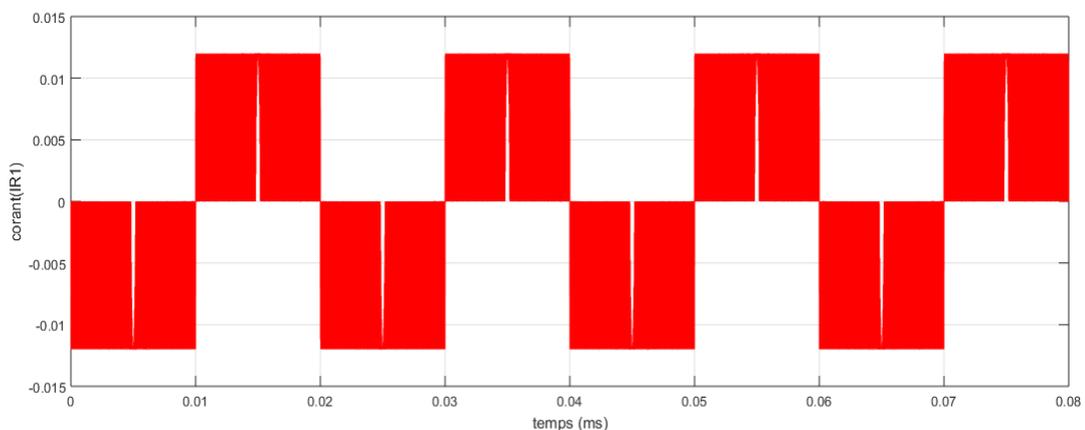


Figure III.13 : le courant au borne de la charge sans filtre

Le spectre nous montre un signal carré avec une forme sinusoïdale non parfaits. De 0 à -0,013 A, le signal est négatif et de 0 à 0,013 A le signal est positive et ainsi de suite. Le signale contient également des harmoniques qui représentent les comme perturbations électromagnétiques qui sont dues à la grande vitesse et la variation rapide des composantes électriques c'est la même chose que la tension sauf que si la tension est positive le courant il est négative et le contraire,

## B. La Réponse fréquentielle de tension et courant de charge :

### ❖ Tension de charge

La figure (III.14) représente la réponse fréquentielle de la tension de charge.

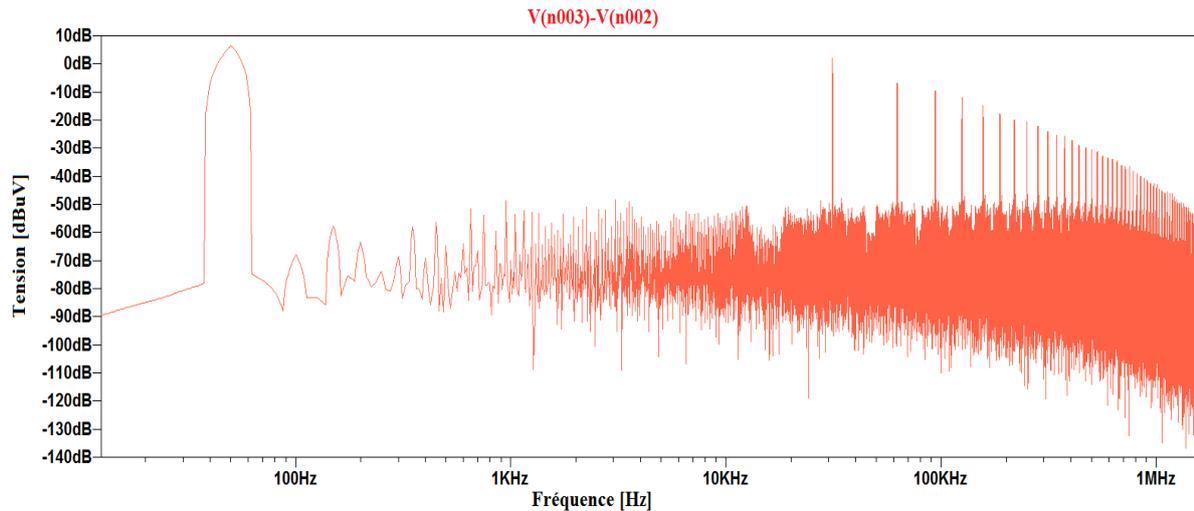


Figure III.14 : représentation fréquentiel de la tension aux bornes de la charge sans filtre

Nous constatons dans le spectre figure (III.14) de la réponse fréquentielle de la tension à la charge qu'il y a des légères perturbations électromagnétiques d'amplitude -90 dB aux environs de 1KHz. Mais à partir de 40KHz, on voit des pic de résonance d'amplitude 0 dB à -130dB qui sont dus à la commutation rapide des MOSFET.

L'énergie libérée lors de la mise sous tension produit un bruit à haute fréquence. La principale source d'interférence électromagnétique continue à haute fréquence c'est la Commutation extraordinaire produite par le variateur électronique de vitesse est la commutations très rapide des composants électroniques tels que MOSFET.

### ❖ Courant de charge

La figure (III.15) représente la réponse fréquentielle de courant de charge du circuit sans filtre.

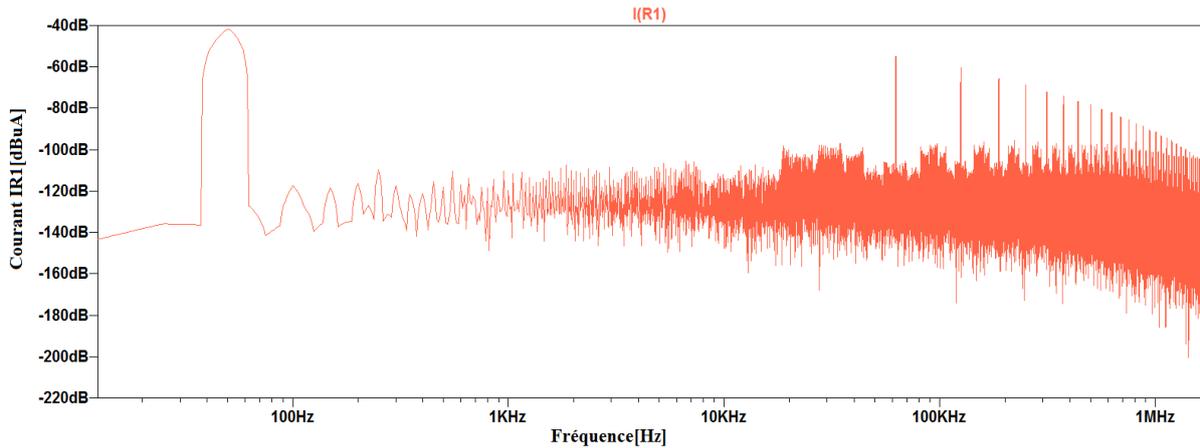


Figure III.15 : représentation fréquentiel de courant au borne de la charge son filtre.

La figure (III.15) présente le spectre dans le domaine fréquentiel de courant de charge dont on voit un pic de résonance d'amplitude -40dB aux environs de 100Hz, et après il y a des niveaux des perturbations légers jusqu'au 100KHz. A partir de cette dernière fréquence jusqu'au 1MHz et plus on voit que le spectre présente des perturbations conduites importantes d'amplitude de -60 dB à -200 dB qui sont dus à la rapidité des commutations des composants semi-conducteurs (MOSFET).

III.5.1.2. Avec le filtre :

Pour améliorer les signaux de sortis de notre circuit, on a ajouté un filtre CEM de type LC dont il est composé d'une inductance et une capacité en série Figure (III.16).

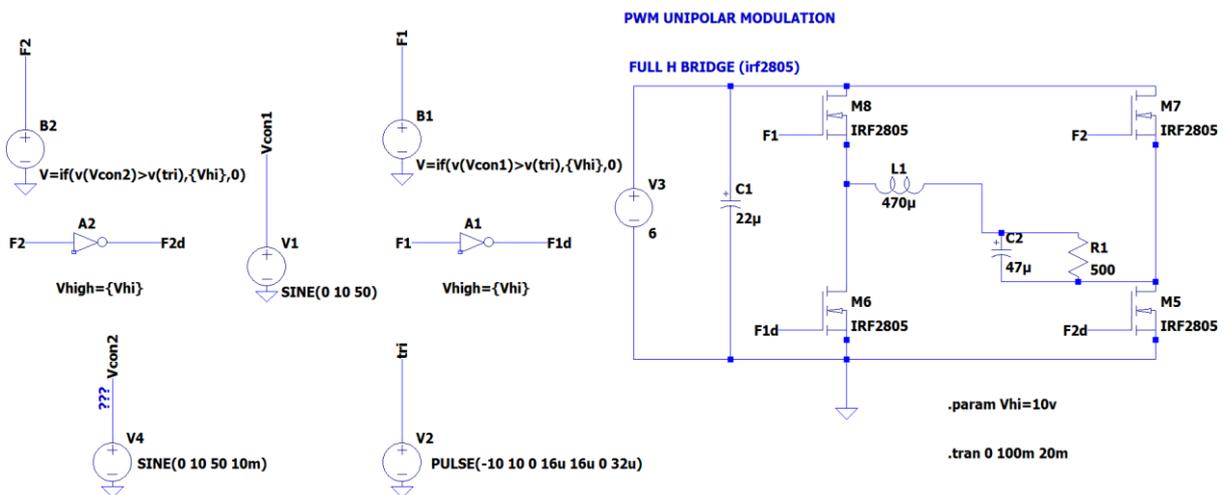


Figure III.16 : schéma de l'onduleur avec filtre LC sur LTSPICE.

A. La réponse temporelle de tension et courant de charge :

❖ La tension :

La figure (III.17) représente la réponse temporelle de la tension de charge avec le filtre LC.

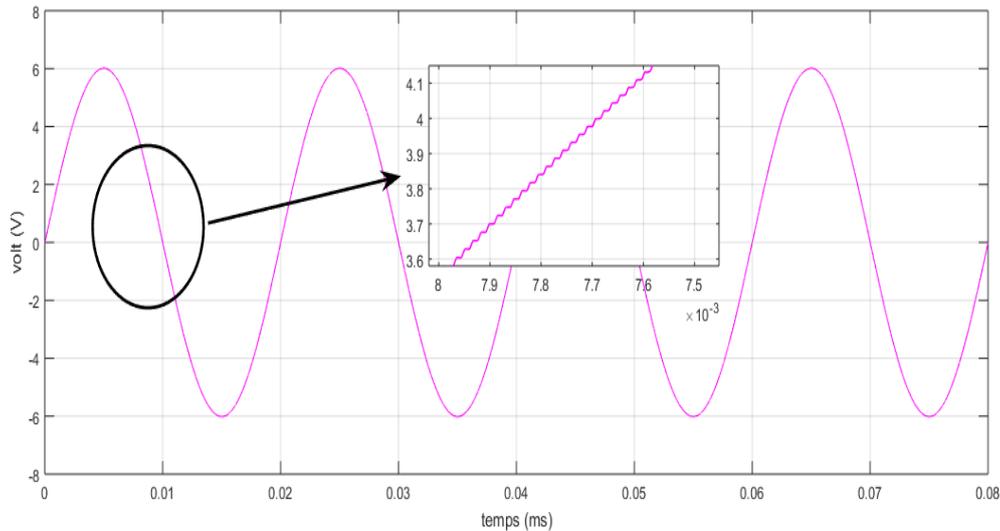


Figure III.17 : tensions au borne de la charge avec le filtre LC

D'après la figure (III.17), on remarque que le signal n'est pas parfait mais par contre il existe du bruit dans le signal. Le bruit électromagnétique est généralement plus important pendant les pics positifs et négatifs de l'onde sinusoïdale lorsque la tension sur la ligne est à sa valeur maximale. Une fois le signal filtré avec un filtrage LC, il en résulte une forme d'onde quasi sinusoïdale.

#### ❖ Courant :

La figure (III.18) représente la réponse temporelle du courant au borne de la charge en présence du filtre LC.

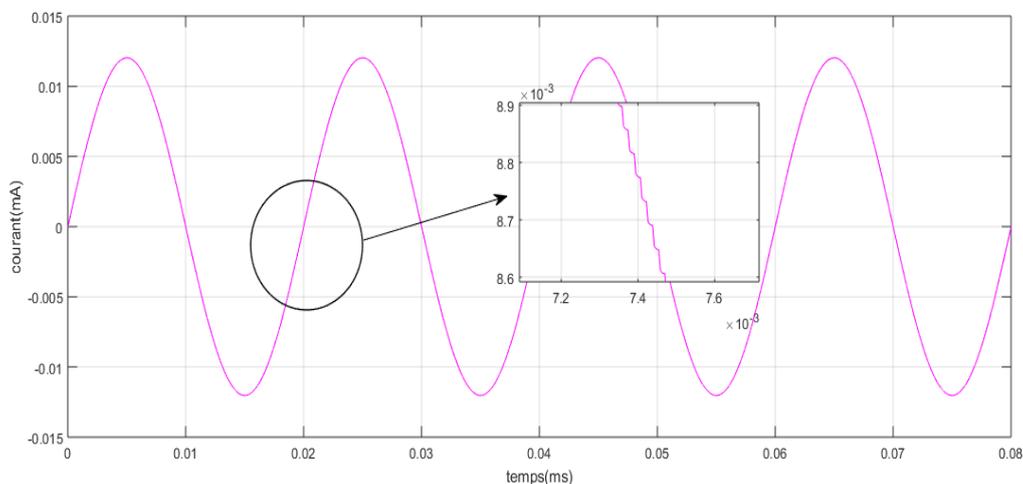


Figure III.18 : courant au borne de la charge avec le filtre LC

Nous remarquons que le signal du courant présente quelques perturbations électromagnétiques à cause des pics positifs et négatifs de l'onde sinusoïdale lorsque le courant sur la ligne prend sa valeur maximale.

D'après ces interprétations concernant la tension et le courant avec le filtre LC, on peut dire que le filtre LC est un procédé qui empêche les courants harmoniques de se propager dans le réseau.

## B. La Réponse fréquentielle de tension et courant de charge :

### ❖ La tension :

La figure (III.19) représente la réponse fréquentielle de la tension de charge du circuit avec filtre LC.

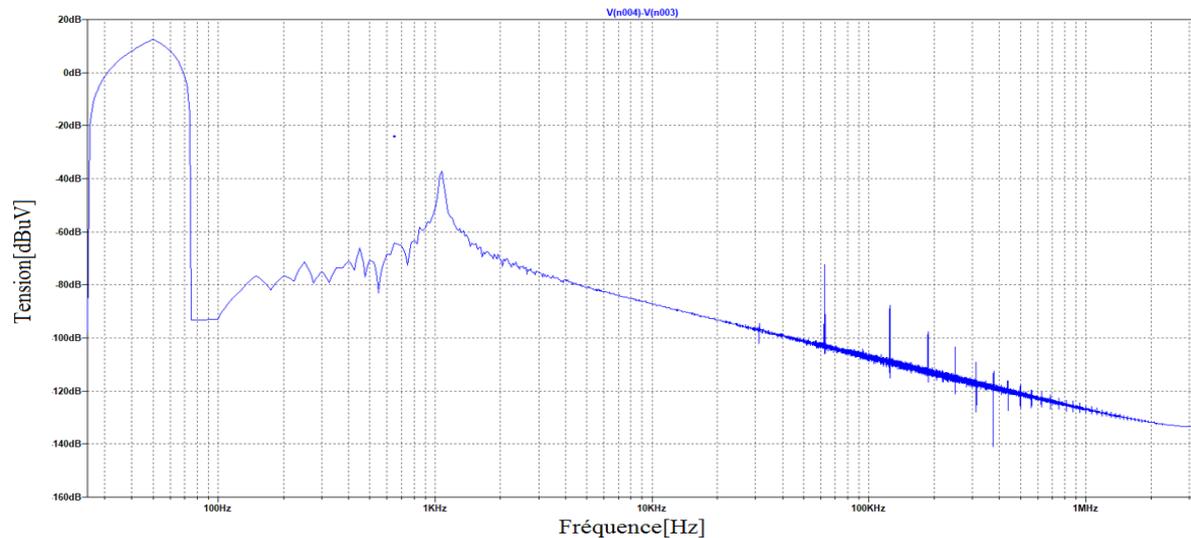


Figure III.19 : représentation fréquentiel de la tension au borne de la charge avec le filtre LC

Le spectre de la figure (III.19) montre très bien que le signal présente de légères perturbations électromagnétiques, c'est l'effet du filtre LC. On remarque qu'il y a présence d'un pic d'amplitude -40dB aux environs de 10KHz à cause des commutations des MOSFET et au-delà vers les hautes fréquences, on voit que le spectre est réduit d'amplitude du -80dB à -120dB aux environs de 1MHz, cette diminution de perturbations électromagnétiques est due à l'effet du filtre LC.

### ❖ Courant :

La figure (III.20) représente le courant fréquentiel de la charge avec le filtre LC.

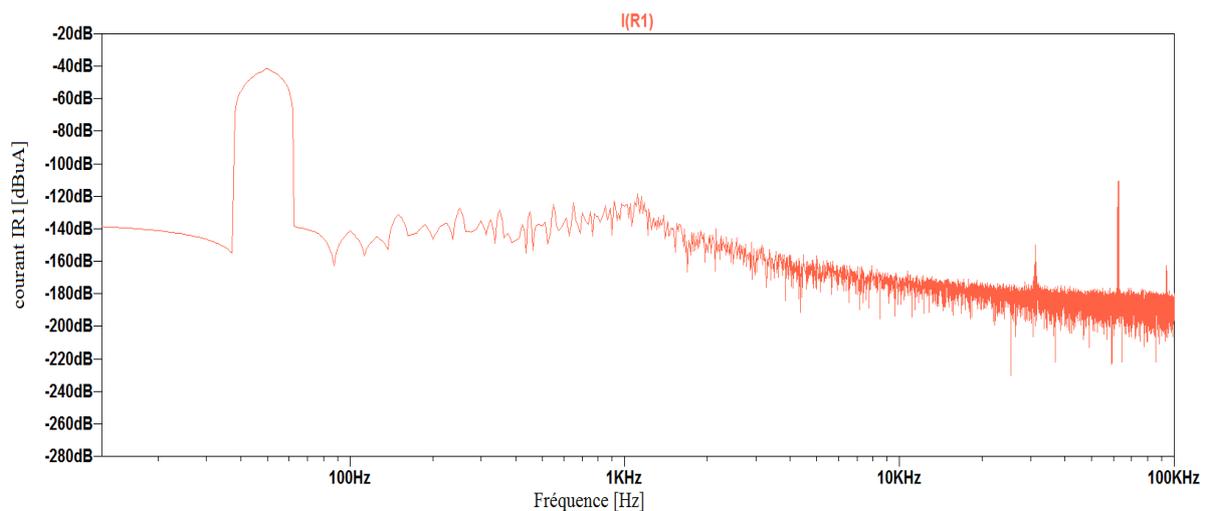


Figure III.20 : représentations fréquentiel de courant de la charge avec le filtre LC

Le spectre du signal présente de légères perturbations en basse et haute fréquence c'est l'effet de filtre LC.

Malgré qu'il y a un pic d'amplitude -40dB aux environs de 100Hz à cause des commutations très élevé des MOSFET et au-delà vers les hautes fréquences, on voit que le spectre est réduit d'amplitude du -140dB à -200dB aux environs de 100kHz et plus, ça n'empêche pas de dire que l'effet du filtre LC est bien présent vis-à-vis les perturbations électromagnétiques pour les minimiser.

### III.5.2. Simulation MLI (sinus-triangulaire) :

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire, cette technique est caractérisée par deux paramètres :

Le premier paramètre :

$$r = \frac{V_m}{V_{pm}} \quad (\text{III.2})$$

r : c'est le rapport d'amplitude.

$V_m$  : C'est la valeur maximale de la tension de référence

$V_{pm}$  : C'est la valeur maximale de la modulation ou dite porteuse

Cette valeur de 'r' il doit être inférieure à 0 et supérieure ou égale à 1 :

$$0 < r \leq 1 \quad (\text{III.3})$$

Le deuxième paramètre :

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (\text{III.4})$$

m : indice de modulation

$f_p$  : Rapport de fréquence

$f_{ref}$  : La fréquence de la tension de référence

Cette valeur de 'm' doit être supérieure à 1 :

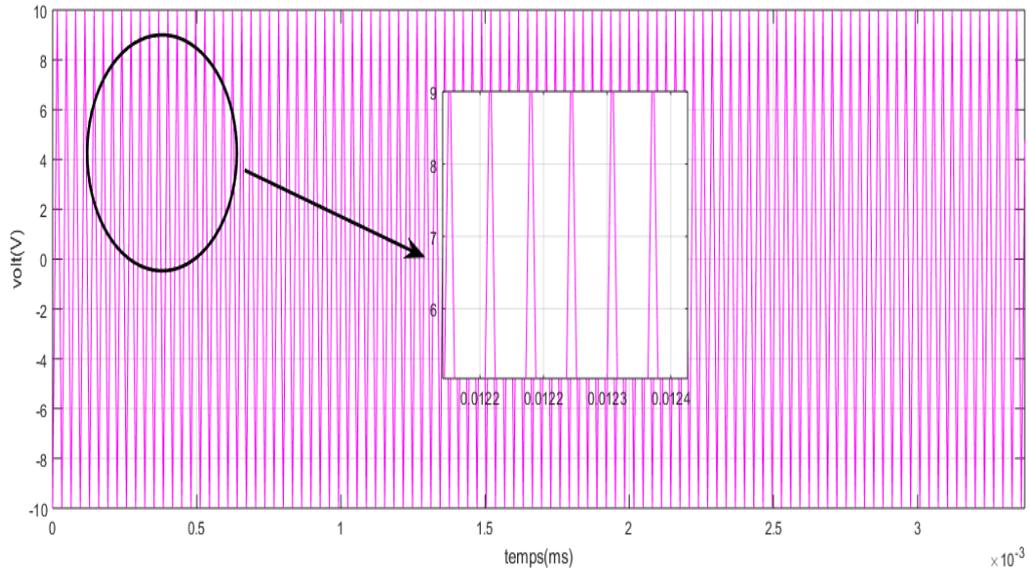
$$m > 1 \quad (\text{III.5})$$

#### III.5.2.1.Principe de fonctionnement :

Lorsque la tension de référence est supérieure à la porteuse, on va envoyer l'impulsion aux MOSFET M8 et M5, et inversement lorsque la tension de référence est inférieure à la porteuse, on va envoyer l'impulsion aux MOSFET M6 et M7.

##### A. La simulation : (triangulaire)

La figure (III.21) présente la fonction MLI sous LTSPICE

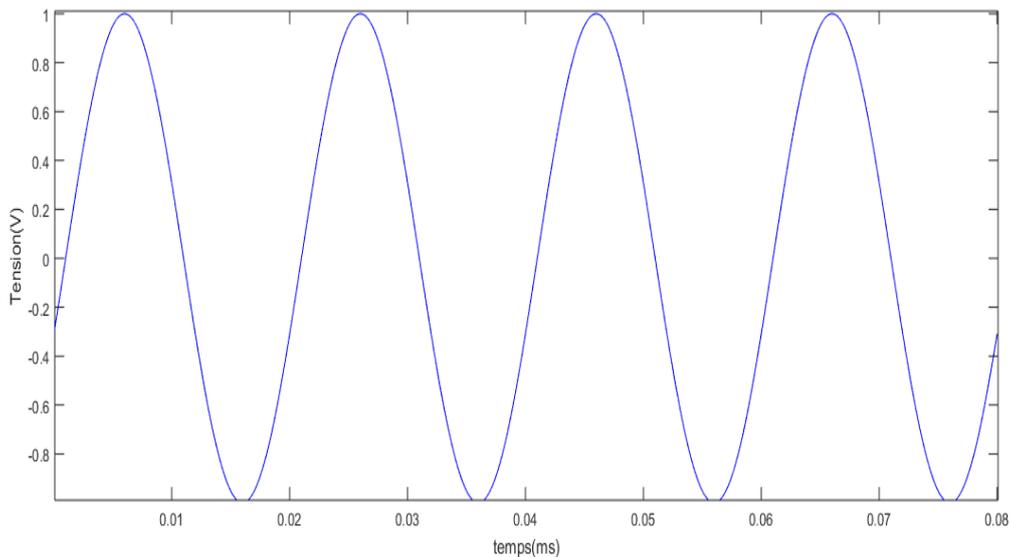


**Figure III.21** : schéma de la fonction triangulaire sous LTSPICE

La figure (III.21) montre le fonctionnement de la modulation de largeur d'impulsion (MLI). Une porteuse triangulaire à haute fréquence est comparée à un signal de consigne sinusoïdale. Le signal sinusoïdal doit avoir une fréquence bien plus petite que la porteuse. On considère le cas d'un signal sinusoïdal à valeurs positives.

Pour traiter un signal alternatif, il suffira de lui appliquer un décalage. Lorsque la sinusoïdal est lentement variable par rapport à la porteuse, il faudra appliquer un filtrage passe-haut pour restituer les variations de basses fréquences de la sinusoïdal. Voir la figure (III.22).

### B. La simulation : (sinusoïdale)



**Figure III.22** : le schéma de la fonction sinusoïdale sur ltspace

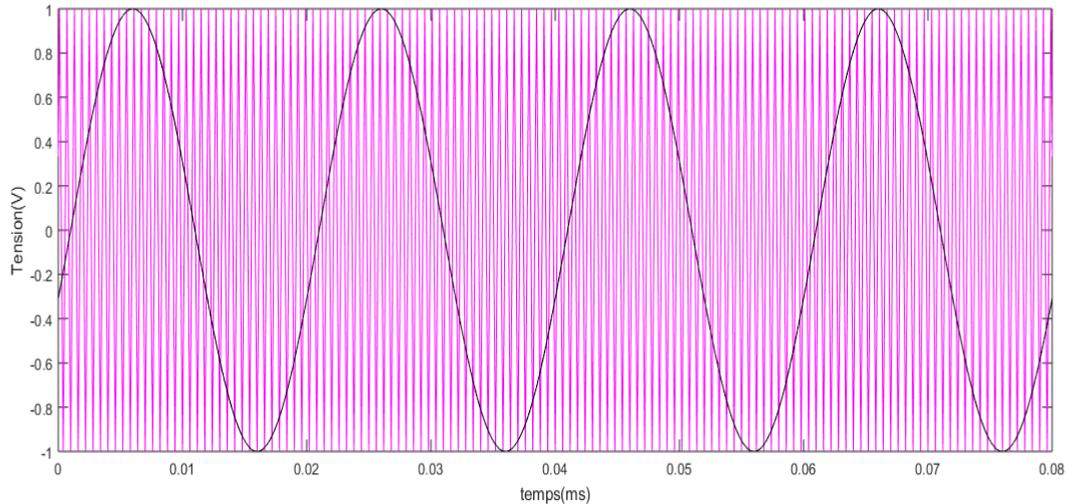


Figure III.23 : schéma de deux tensions sinusoïdales et triangulaires sous LTSPICE

**III.5.3. Avec RSIL et avec filtre :**

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, le RSIL est un filtre qui est inséré entre le réseau électrique et l'entrée du l'équipement sous test (EST). Son rôle est multiple [57] :

- Il isole l'appareil sous test du réseau.
- Il fixe une impédance définie au point de mesure.
- Il guide les perturbations conduites vers le récepteur de mesure.

Avec ces différentes tâches, le RSIL assure la répétabilité des mesures. Les RSIL se présentent sous diverses structures, chacune étant déterminée par des normes pertinentes pour le domaine d'application. Le point commun à toutes les structures est une impédance équivalente de 50 Ω, allant de 150 KHz à 30 Mhz. [57]

La figure (III.24) présente notre circuit d'étude an insérant un RSIL entre la source et l'onduleur.

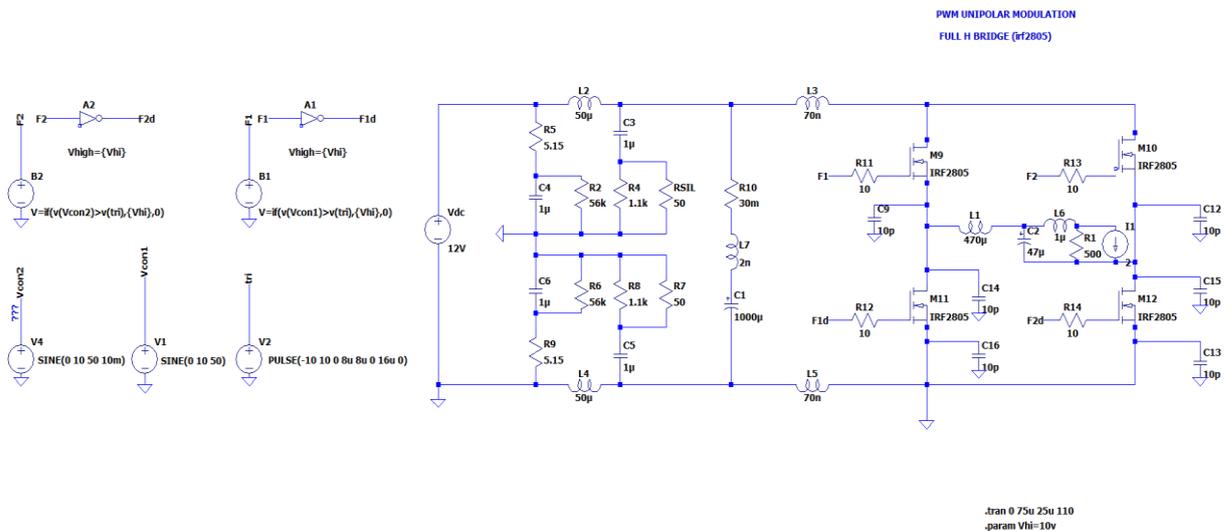


Figure III.24 : schéma d'onduleur avec RSIL et avec filtre.

### III.5.3.1. la réponse temporelle de tension et courant de charge :

#### A. la tension :

Le spectre de la figure (III.25) montre la réponse temporelle de la tension au borne de la charge de notre circuit d'étude avec RSIL.

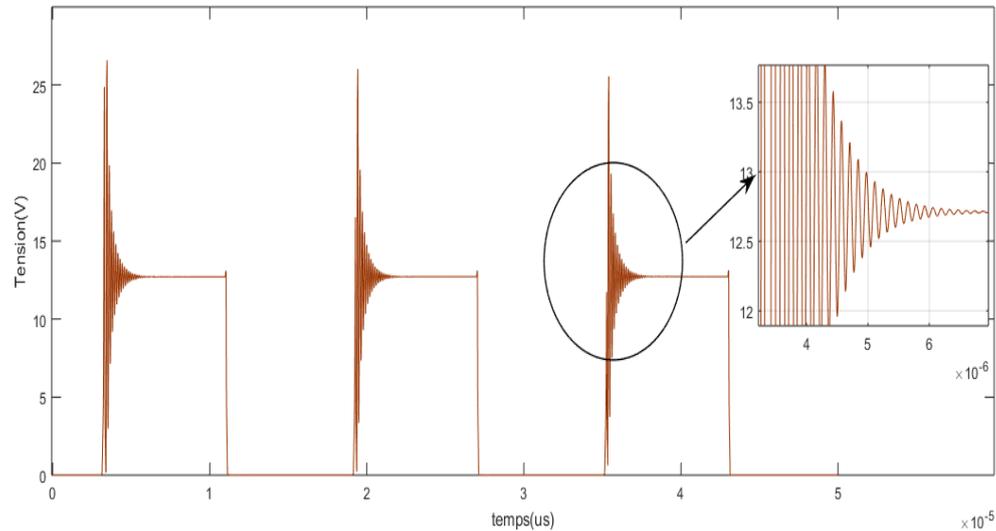


Figure III.25 : la tension au borne de la charge avec RSIL.

Le signal à un signal carré présente des perturbations électromagnétiques, qui sont dues à la variation rapide des capacités et des impédances parasites des autres composants électriques et aux commutations des MOSFET au niveau de signal.

#### B. Courant :

La figure (III.26) montre la réponse temporelle de courant au borne de la charge de notre circuit d'étude avec RSIL

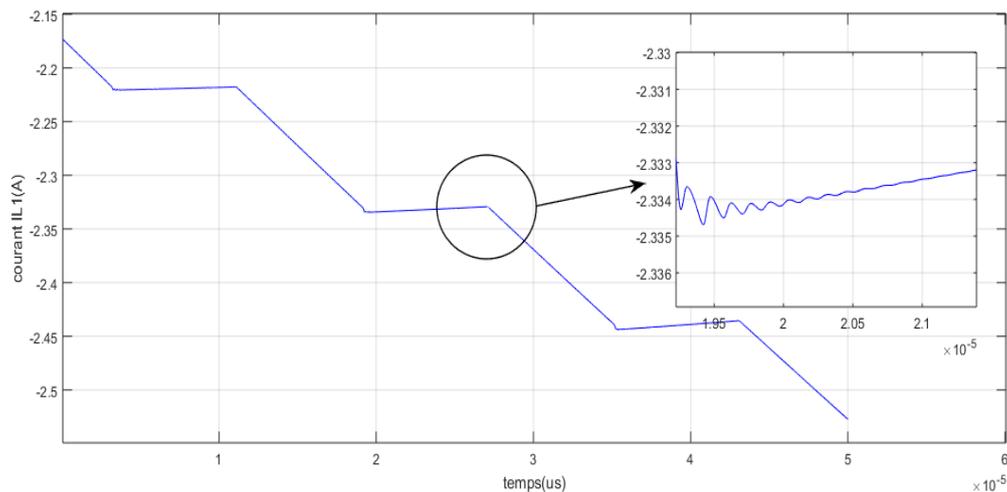


Figure III.26 : le courant au borne de la charge avec RSIL

Le signal présent de légères perturbations électromagnétiques, cela indique que le courant à la sortie est moins perturbé par rapport dans le cas de signal sans RSIL.

### III.5.3.2. La réponse fréquentielle de tension et courant de charge :

#### ❖ Tension :

La figure (III.27) présente le spectre de la réponse fréquentielle de la tension au borne de la charge du circuit d'étude avec RSIL.

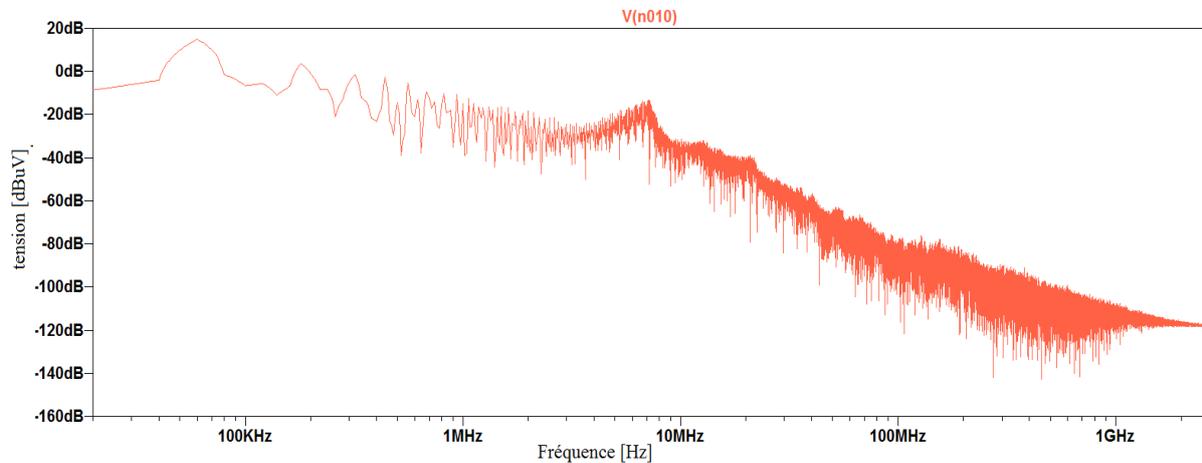


Figure III.27 : représentation fréquentiel de tension au borne de la charge avec RSIL.

On constate dans le spectre qu'il y a une meilleure réponse dont les perturbations électromagnétiques sont négligeables d'amplitude -20dB à -140dB aux environs de 1MHz et au plus, c'est les effets indésirables qui résonnent les uns avec les autres qui créent des oscillations à des fréquences élevées.

Il est bien connu que les commutations des interrupteurs de puissance sont les principales sources des perturbations conduites. Il est donc important d'appréhender les éléments parasites du transistor MOSFT susceptibles de jouer un rôle lors des commutations. La vitesse de commutation et qu'il convient de pouvoir contrôler les  $dV/dt$  et  $dI/dt$ .

#### ❖ Courant :

La figure (III.28) présente le spectre dans le domaine fréquentiel du courant de la charge du circuit avec RSIL.

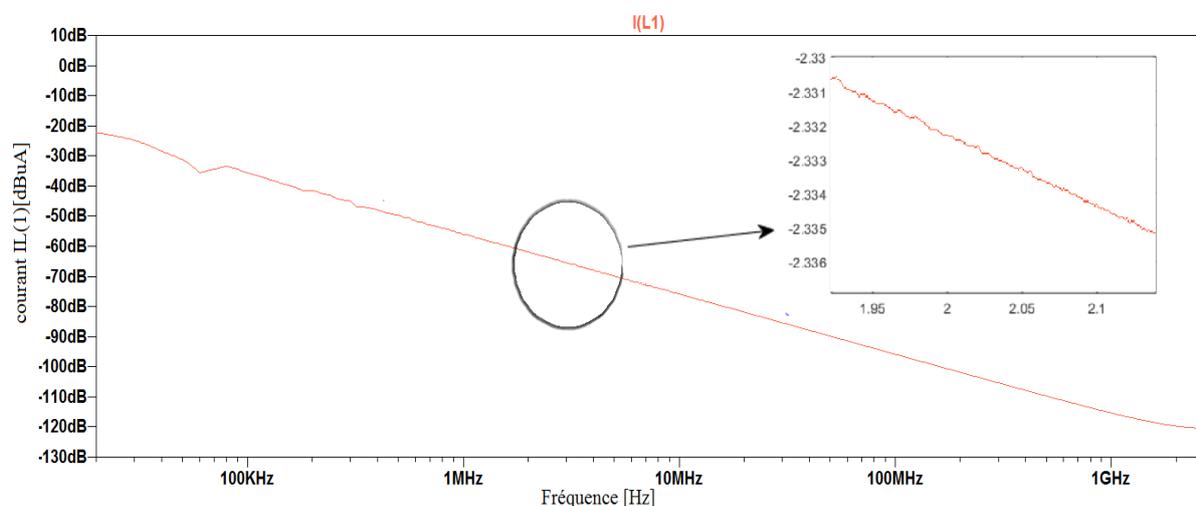


Figure III.28 : représentation fréquentiel de courant au borne de la charge avec RSIL.

Le spectre fréquentiel de la figure (III.28) présente des niveaux des perturbations légères. On voit clairement que pendant toute la gamme de fréquence, le signal présente est presque sans perturbations d'amplitude de -20dB à -110dB.

**III.5.4. Avec RSIL sans filtre :**

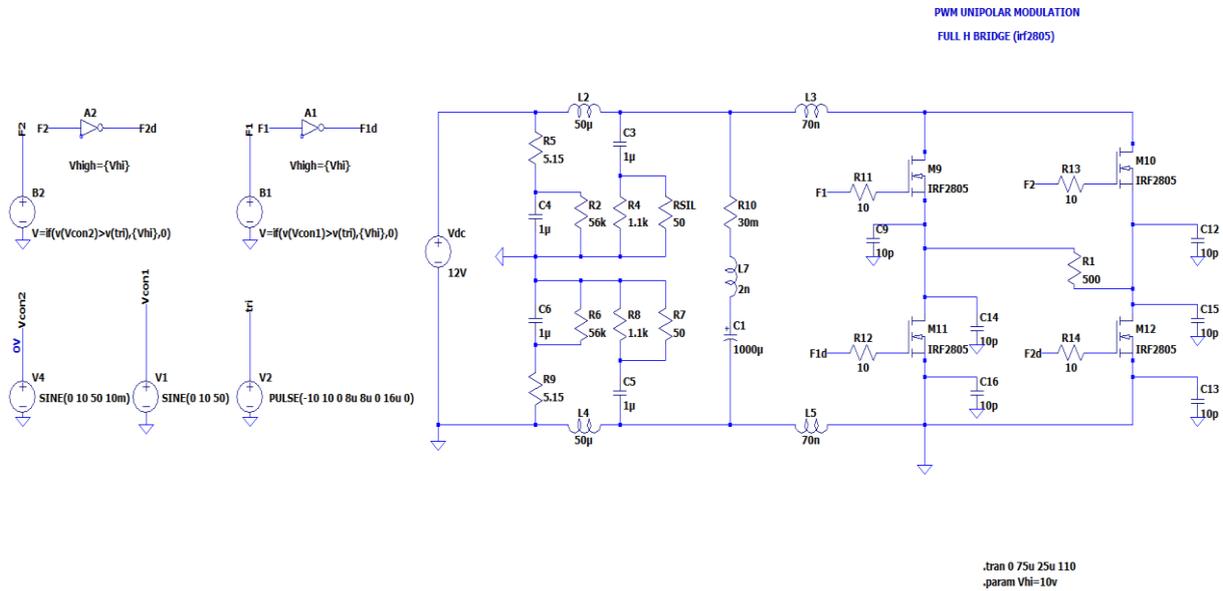


Figure III.29 : schéma d'onduleur avec RSIL et sans filtre

**III.5.4.1. La réponse temporelle de tension et courant de charge :**

**A. La tension :**

La figure (III.30) présente la mesure temporelle de tension de charge :

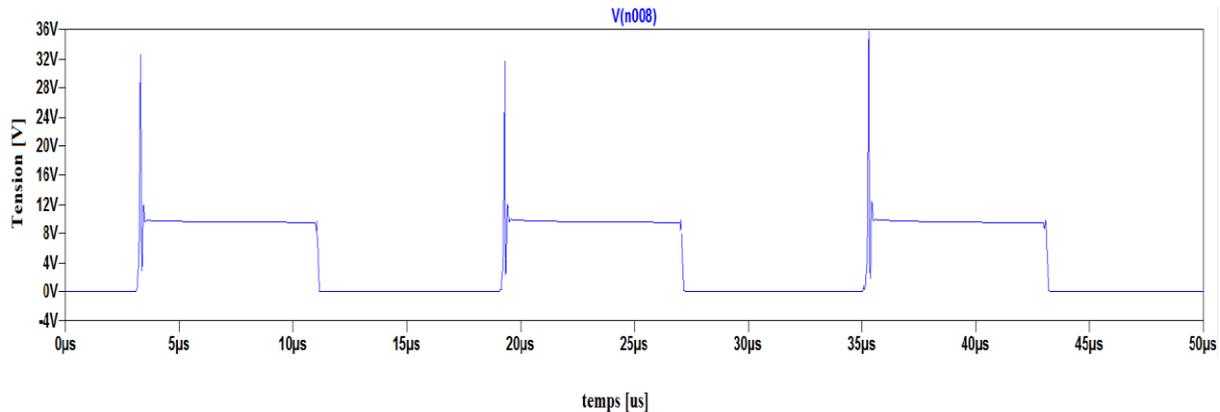


Figure III.30 : la réponse temporelle de tension de charge

Le signal qui représente c'est un signal carré présente des perturbations électromagnétiques, qui sont dues à la variation rapide des composants électriques et aux commutations des MOSFET au niveau de signal.

**B. Le courant :**

La figure (III.31) représente le courant qui traverse la charge avec le RSIL et sans filtre LC :

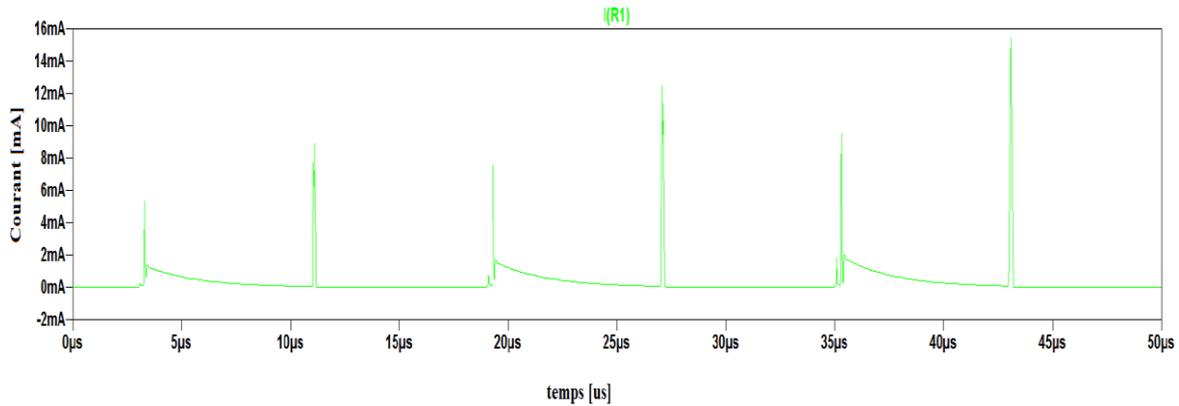


Figure III.31 : la réponse temporelle de courant de charge

Le signal présent des perturbations électromagnétiques, cela indique que le courant est plus perturbé par rapport dans le cas de signal avec RSIL et avec filtre.

### III.5.4.2. La réponse fréquentiel de tension et courant de charge :

#### A. La tension :

La figure (III.32) présente le spectre de la réponse fréquentielle de la tension au borne de la charge avec RSIL et sans filtre.

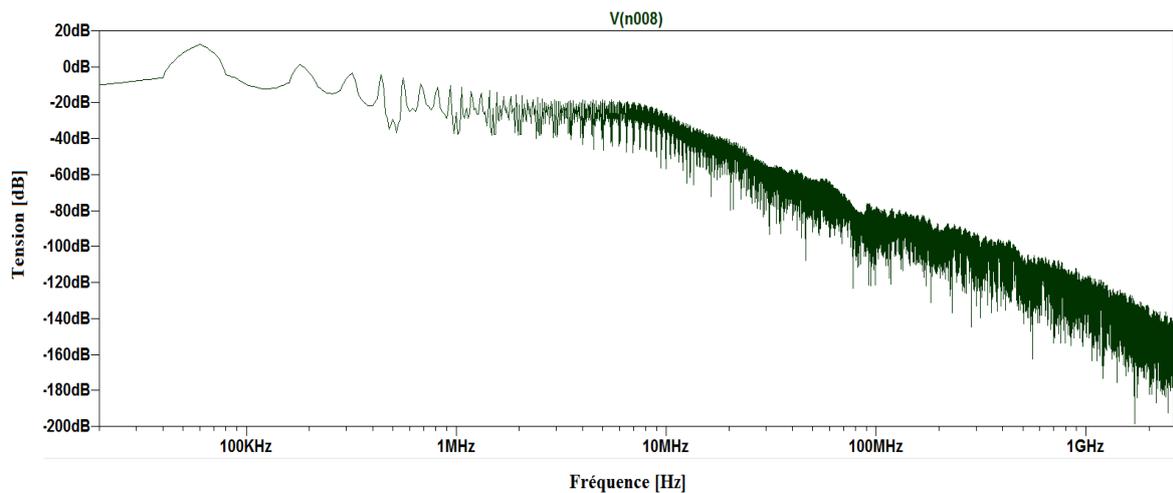


Figure III.32 : la tension fréquentiel de la charge

On constate dans le spectre qu'il y a une meilleure réponse dont les perturbations électromagnétiques sont négligeables d'amplitude -10dB à -40dB aux environs de 1MHz et au plus, c'est les effets indésirables qui résonnent les uns avec les autres qui créent des oscillations à des fréquences élevées.

#### B. Le courant :

La figure (III.33) présente le spectre dans le domaine fréquentiel du courant de la charge avec RSIL et sans filtre.

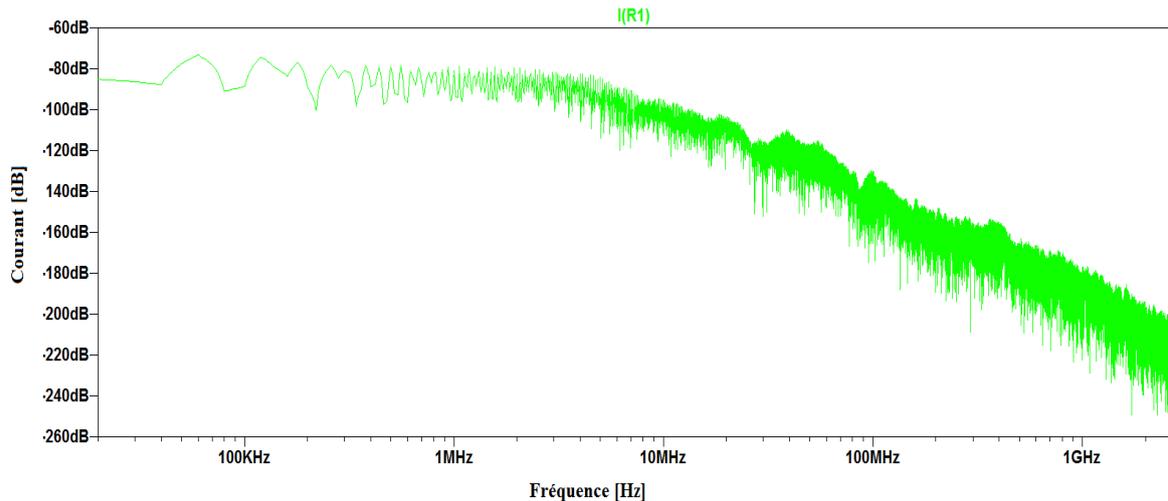


Figure III.33 : le courant fréquentiel de la charge

Le spectre fréquentiel de la figure (III.33) présente des niveaux des perturbations très élevés. On voit clairement que à partir de -80dB aux environs de 1MHz il y a une légère perturbation par contre à partir de 2MHz en voit très bien une augmentation des perturbations. Cela signifie le rôle de filtre LC pour minimiser les perturbations.

### III.5.4.3. La réponse temporelle de tension et courant de RSIL :

#### A. La tension :

La figure (III.29) présente la mesure temporelle de la tension au borne de RSIL.

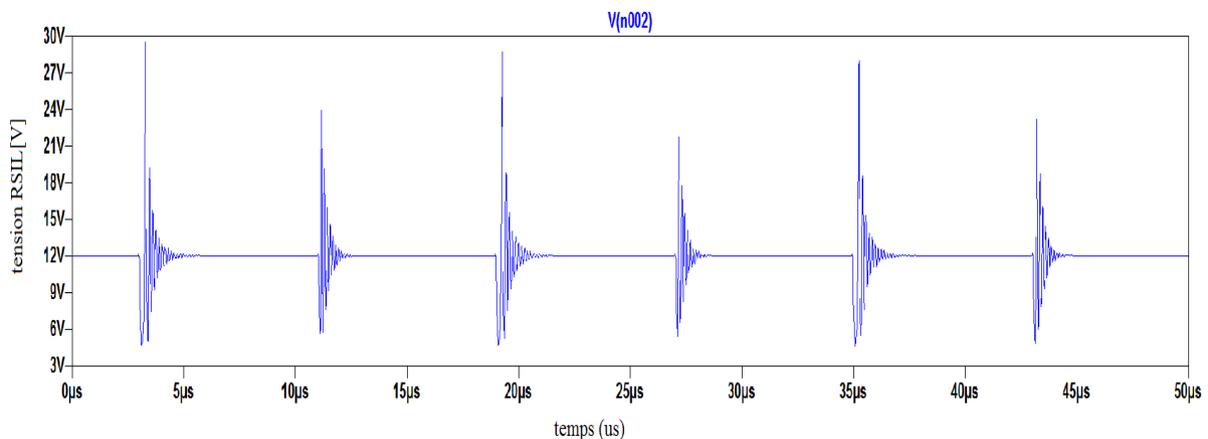


Figure III.29 : la réponse temporelle de tension RSIL.

Le résultat des perturbations montre une tension variable d'amplitude où on remarque des pics de 30V d'amplitude au début de commutation puis il diminue jusqu'à ce qu'il atteigne 20V d'amplitude à 10us. Cette réponse oscillante amortie, montre clairement la déformation des formes d'ondes de tension au niveau du RSIL qui s'éloignent de la forme continue parfaite. Cette oscillation est due aux commutations des interrupteurs de puissance qui sont les principales sources des perturbations conduites.

#### B. Le courant :

La figure (III.30) montre la réponse temporelle du courant RSIL.

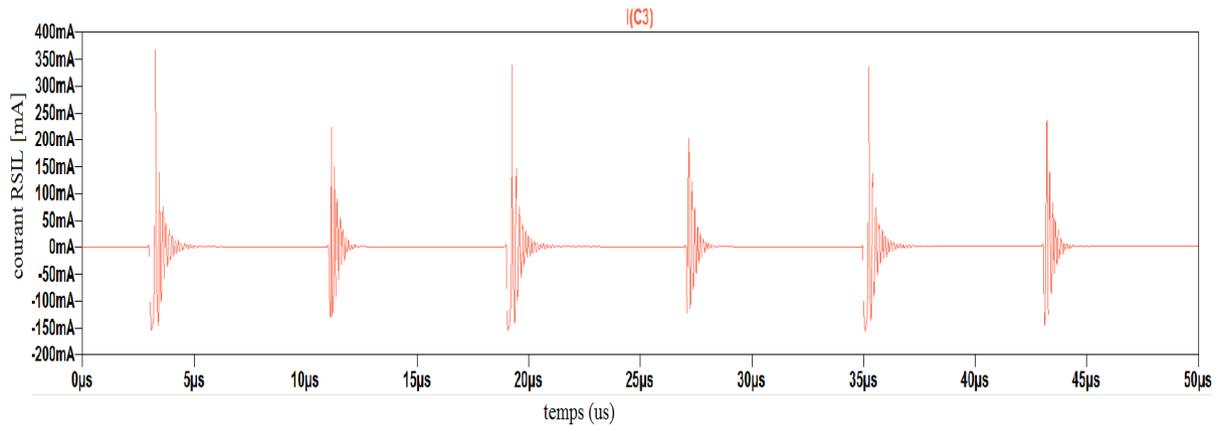


Figure III.30 : La réponse temporelle du courant RSIL.

Le résultat des perturbations dans le domaine temporel du courant RSIL de la figure (III.30) montre clairement que le courant RSIL est bien perturbé d'amplitude environ de 420mA à 200 mA de 4us à 13us qui sont dues à l'effet de la commutation des MOSFET.

#### III.5.4.4. La réponse fréquentielle de tension et courant RSIL :

##### A. La tension :

La figure (III.31) présente le spectre dans le domaine fréquentielle de la tension RSIL.

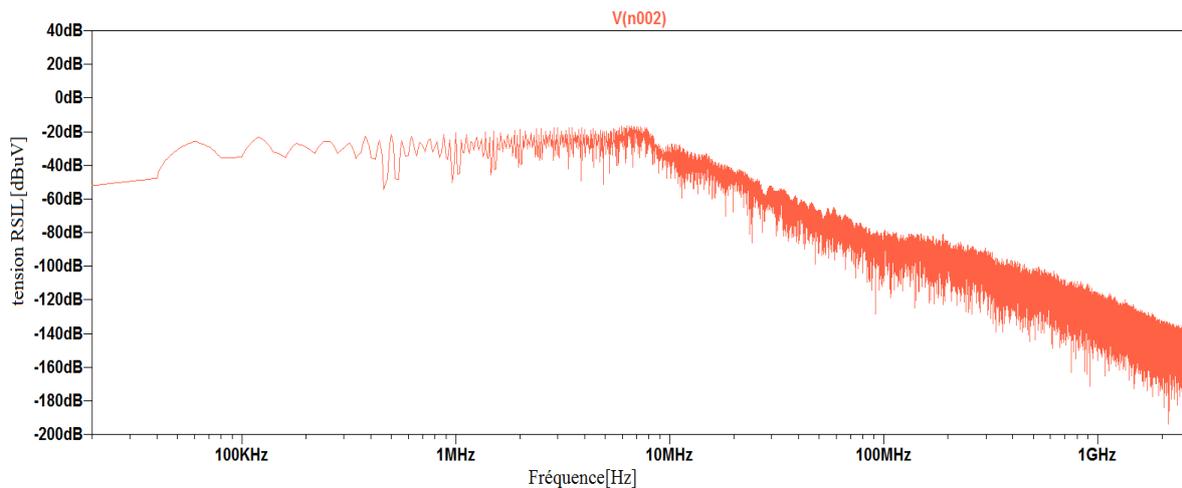


Figure III.31 : la tension fréquentielle de RSIL.

On constate que le spectre dans le domaine fréquentielle présente des niveaux des perturbations légères d'amplitude de -50 dB à -20 dB aux environs de 1 MHz. À partir de cette dernière et jusqu'à 100MHz, le spectre d'amplitude entre -50 dB à -100 dB présente des perturbations moins élevées.

L'analyse de cette réponse fréquentielle montre l'absence des perturbations en basses fréquences, par ailleurs dans les hautes fréquences (à partir de 1MHz) nous remarquons une variation rapide de l'amplitude des oscillations due à la rapidité des commutations des composants semi-conducteurs et les impédances parasites HF.

##### B. Le courant :

La figure (III.32) présente le spectre dans le domaine fréquentielle du courant RSIL.

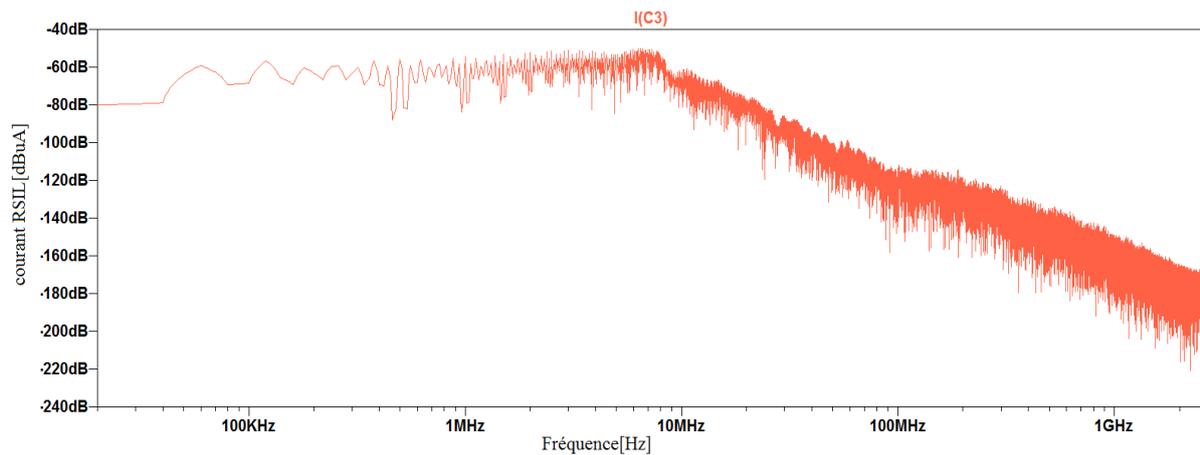


Figure III.32 : le courant fréquentielle de RSIL.

On voit clairement que le spectre dans le domaine fréquentielle présente des niveaux des perturbations légères d'amplitude de -80 dB à -60 dB aux environs de 1 MHz. A partir de cette fréquence et jusqu'à 1 GHz, le spectre d'amplitude entre -60 dB à -200dB présente des perturbations moins élevée, l'analyse de la réponse fréquentielle montre ou jours la présence des perturbations conduites dans les hautes fréquences dus à la rapidité des commutations des composants semi-conducteurs et les impédances parasites HF.

Donc après toutes les interprétations que nous avons faites, on peut dire que les interférences électromagnétiques sont évidentes dans la structure RSIL. Comme nous le savons tous, la commutation de l'interrupteur d'alimentation est la principale source d'interférences conduites. Ainsi, tous les effets inductifs et capacitifs de la structure du convertisseur et des connexions inductives et capacitives en tant qu'éléments parasites assurent à leur tour la propagation des perturbations électromagnétiques conduites dans RSIL.

### III.6. Conclusion :

L'utilisation variée, dans la vie quotidienne, de dispositifs d'électronique de puissance notamment les convertisseurs statiques est devenue de plus en plus courante. Les applications technologiques actuelles de ces derniers requièrent simultanément un niveau de précision et de performance élevé, de sorte qu'ils puissent jouer un rôle très important dans les systèmes de conversion d'énergie. [68]

Le but de cette étude est de visualiser les perturbations électromagnétiques émises par des convertisseurs DC/AC positionnés par des connectiques entre un RSIL et la charge. Nous avons effectué des simulations des perturbations électromagnétiques d'onduleur en utilisant deux parties, la première avec un onduleur dans un circuit sans filtre LC et sans RSIL, et la deuxième on a ajouté un RSIL et un filtre LC au circuit d'étude.

Pour cela on peut dire que pour avoir un transfert d'énergie correct et diminuer les perturbations électromagnétiques, il faut diminuer les harmoniques de tensions et courant de façon à les rendre sinusoïdaux.

Le logiciel LTspice utilisé n'a aucune restriction sur l'utilisation de notre étude. Ce logiciel nous a permis de simuler des convertisseurs statiques et de voir différents signaux à différents

points stratégiques. Par conséquent, le but de ce chapitre est de comprendre le comportement des convertisseurs statiques DC/AC à hautes et basses fréquences, d'autre part les composants semi-conducteurs de puissance à découpage sont une source majeure d'EMI conduites.

# **Chapitre IV**

*Etude expérimentale sur PEM d'un onduleur en pont H*

### IV.1. Introduction :

D'après les trois chapitres précédents on a pu avoir une idée sur le principe de fonctionnement de l'onduleur monophasé en pont complet. Dans ce chapitre on va faire l'étude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé en pont complet (H) en utilisant un ARDUINO-UNO et des composants actifs et passifs.

### IV.2. Définition d'un ARDUINO-UNO :

Pour contrôler l'onduleur, nous avons choisi la carte Arduino qui est constituée de deux parties principales, la partie matérielle représente la carte électronique est basée sur un simple composant microcontrôleur (micro-ordinateur), et la partie logicielle représente l'environnement de la programmation d'Arduino. Les environnements logiciels et matériels permettent aux utilisateurs de développer leurs projets par expérimentation directe à l'aide d'un certain nombre de ressources en ligne. Arduino est donc un projet open source qui utilise les ressources disponibles pour trouver des réponses aux questions. [69]

La carte Arduino est alimentée par une tension de 9V à 12V, soit à l'aide d'une alimentation externe ou bien utilisant la connexion USB (qui fournit 5V jusqu'à 500mA) avec un PC : [69]



Figure IV.1 : Photo de la carte Arduino-Uno [69]

### IV.3. Réalisation :

Notre Convertisseur statique AC/DC est un onduleur monophasé de type complet, il est constitué de deux parties, la partie commande à basse d'un ARDUINO et la partie de puissance constitué par 4 transistors de types MOSFETR (IRF3205) :



Figure IV.2 : Image du banc de test de l'onduleur

Les résultats temporels du test expérimental sont visualisés par un Oscilloscope électronique de notre laboratoire d'électrotechnique

#### A. Circuit de commande :

##### ➤ ARDUINO+INVERSEUR :

L'arduino UNO (microcontrôleur) est programmé pour avoir un signal en MLI sur les deux sorties 9 et 10 qui vont être utilisées dans la commande des interrupteurs de l'onduleur. Les deux sorties 9 et 10 d'ARDUINO sont reliés avec les portes logiques 1A et 2A de 74LS04 :

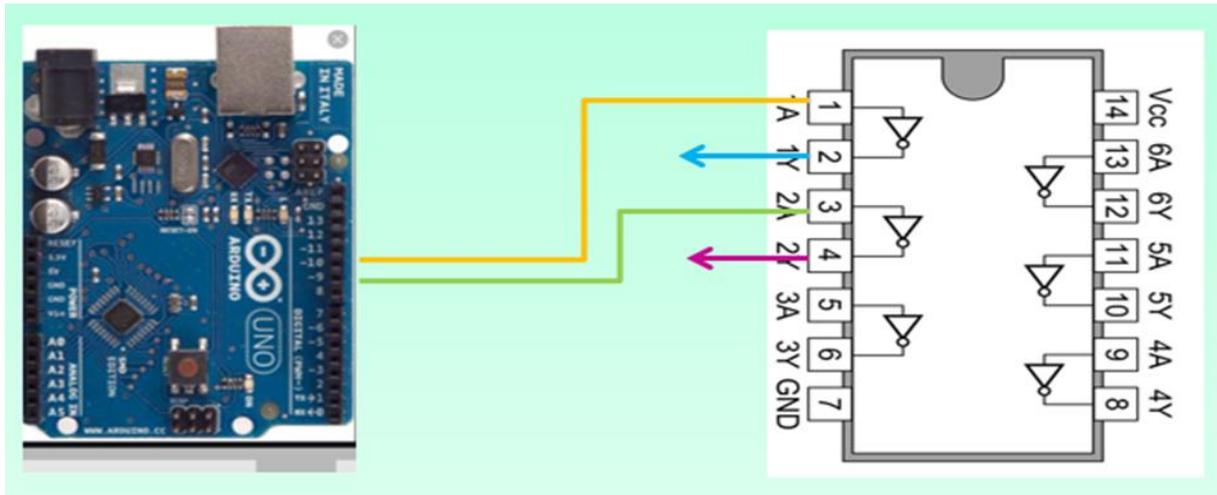


Figure IV.3 : ARDUINO + Inverseur

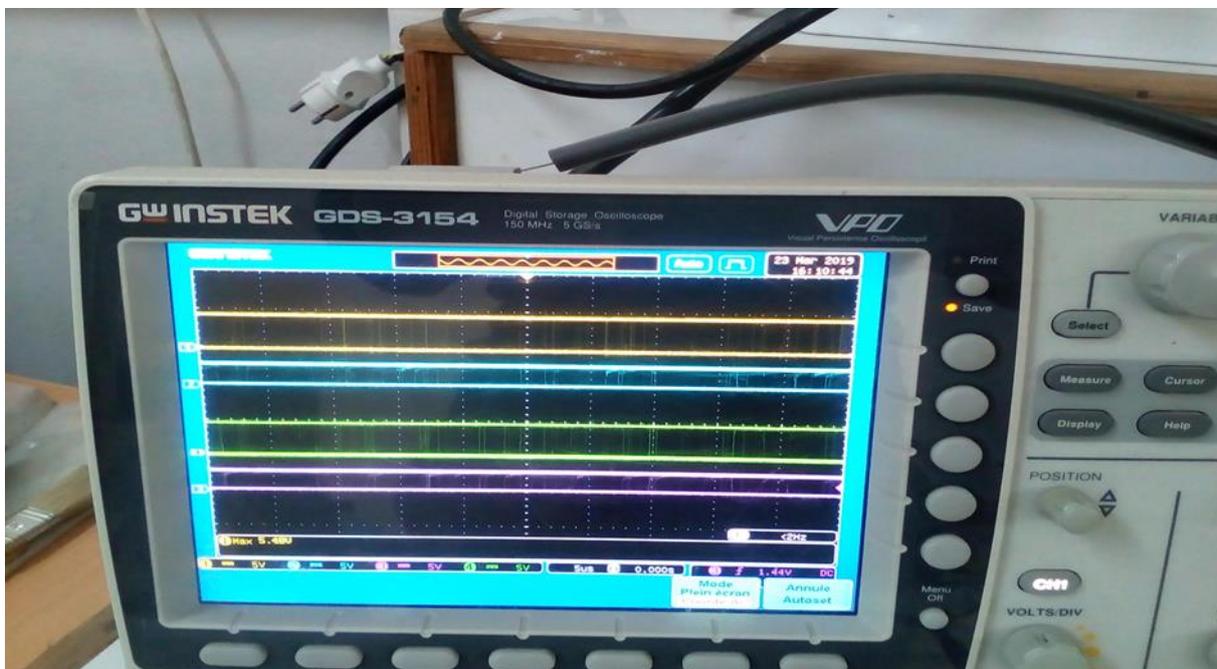


Figure IV.4 : les signaux de l'arduino

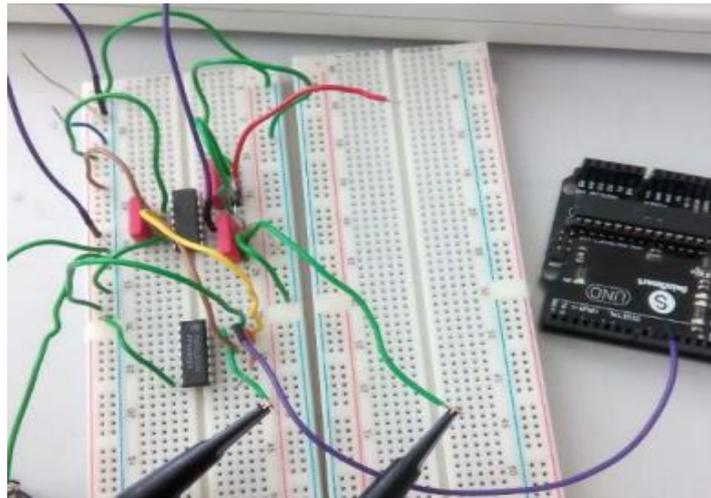


Figure IV.5 : test d'INVERSEUR

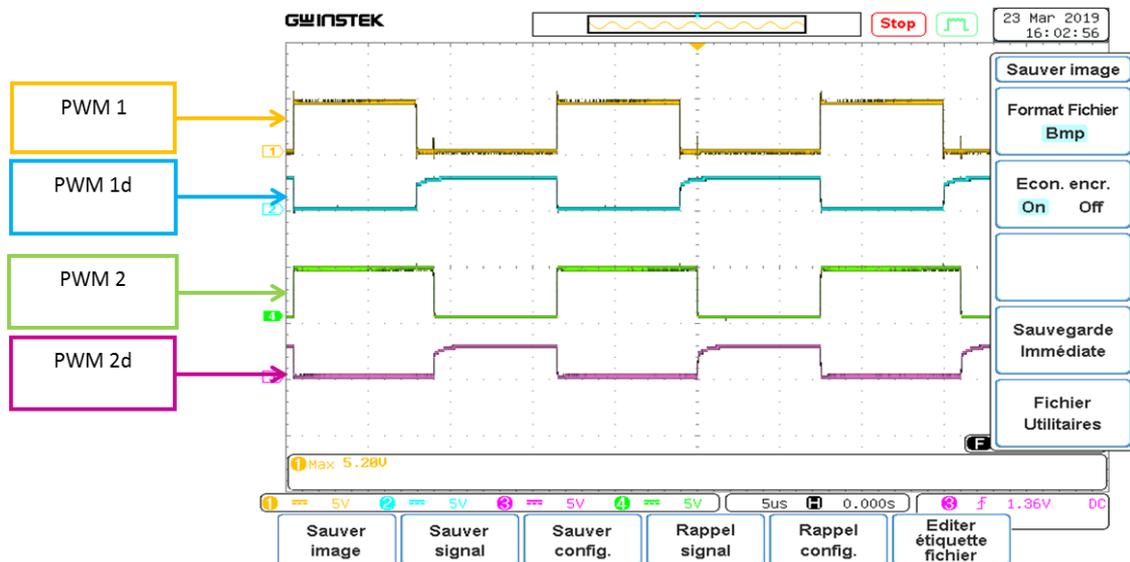


Figure IV.6 : signales de sortie des deux portes inverseurs avec les deux entrées en MLI d'ARDUINO

Les figure (IV.4) et (IV.6) représente les signaux de sortis de l'arduino, Les deux signaux en jaune et vert sont des signaux de MLI d'arduino, par contre les signaux bleu et violet sont des signaux d'inverseur.

#### ➤ Driver 2112 :

C'est un circuit intégré qui permet le pilotage en haut fréquence de 2 MOSFET sous des tensions pouvant atteindre 600 V, son objectif est d'adapter la tension de la sortie de microcontrôleur aux exigences de la porte du MOSFET.

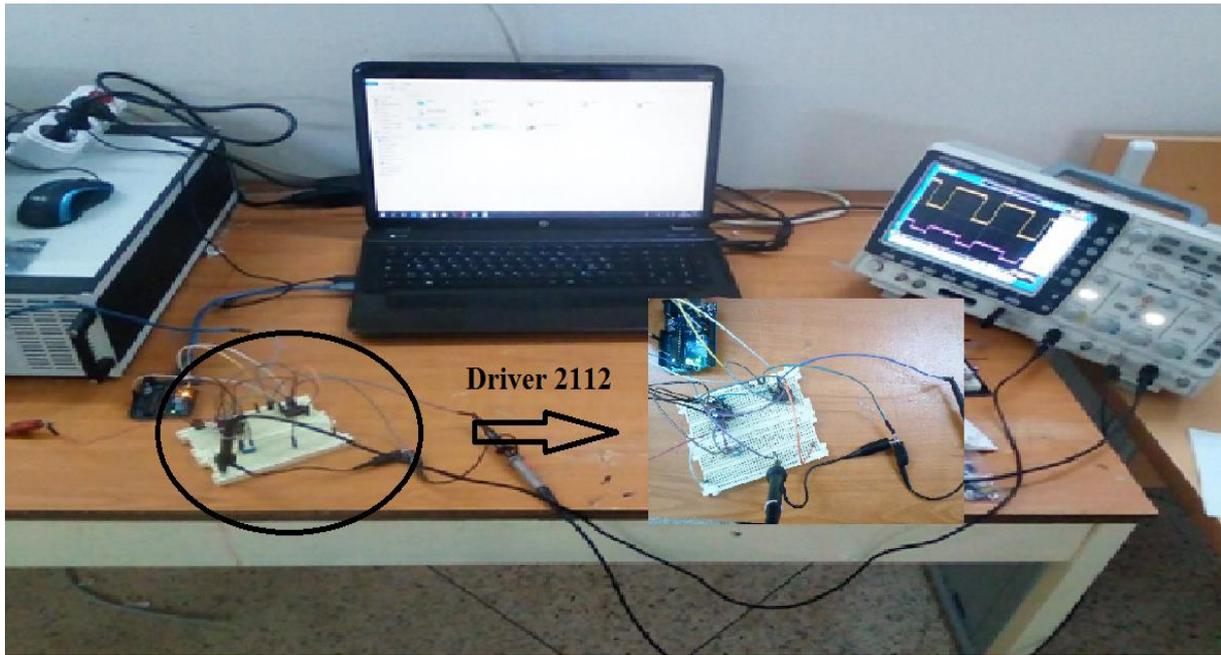


Figure IV.7 : Banc expérimentale

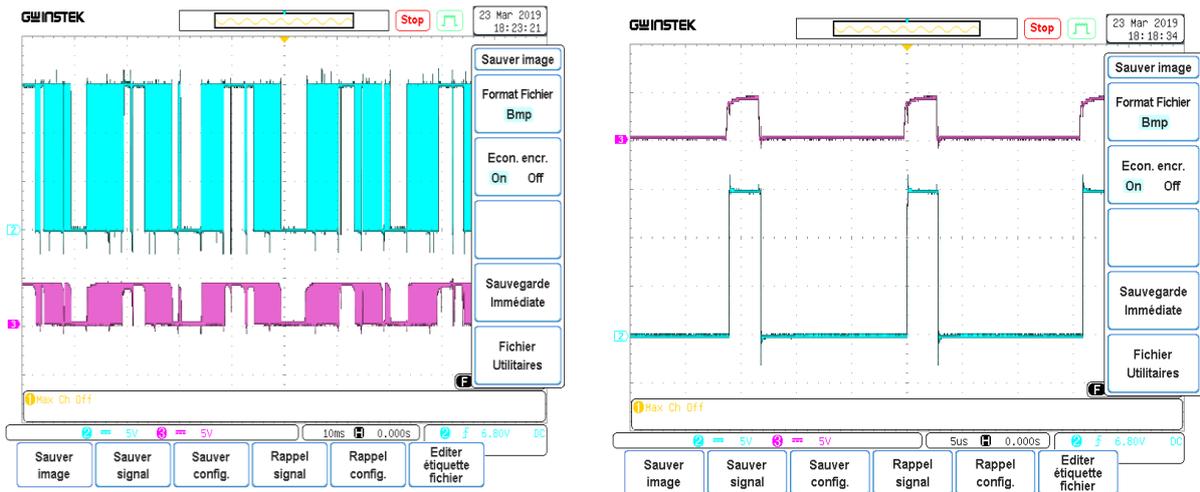


Figure IV.8 : signales de sortie de la porte de Driver

### B. Circuit de puissance :

Après le circuit de commande, l'étape suivante consiste à créer et à simuler le circuit final, qui comprend l'ARDUINO-UNO, un porte inverseur 74LS04, deux pilotes IR2112 et le pont complet en 4 MOSFET, la figure (IV.9) représente le circuit final :

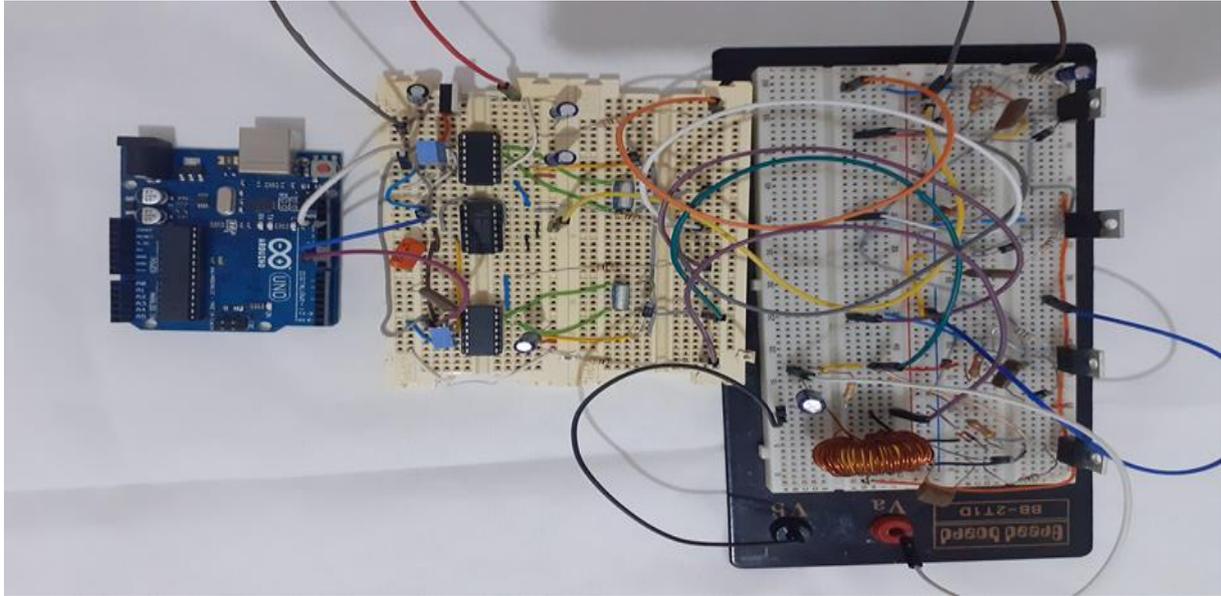


Figure IV.9 : la partie commande et puissance d'ondeur

La figure (IV.9) représente les deux parties de l'ondeur, la partie commande à base d'un AURDUINO qui est constituée de 4 circuits intégrés (2 Driver IRF2110 et 2 inverseurs), Figure (IV.10) et la partie puissance qui constituée par 4 MOSFET, une inductance de filtrage de 470 ( $\mu\text{H}$ ) et un condensateur de 47 $\mu\text{F}$  figure ( IV.11) :

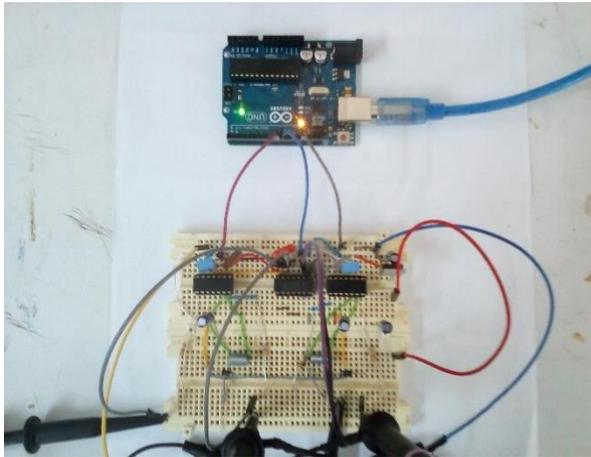


Figure IV.10 : la partie commande

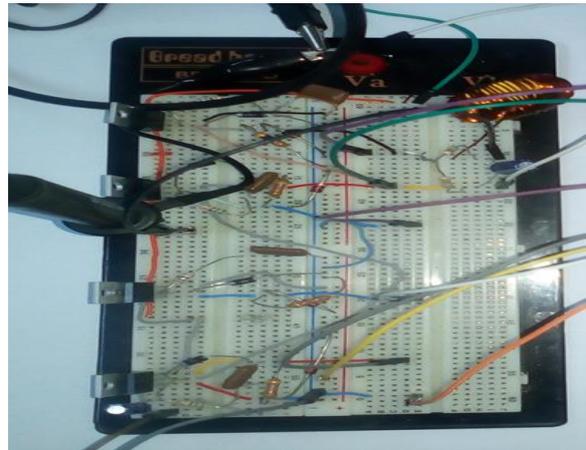


Figure IV.11 : la partie puissance

#### IV.4. Résultats :

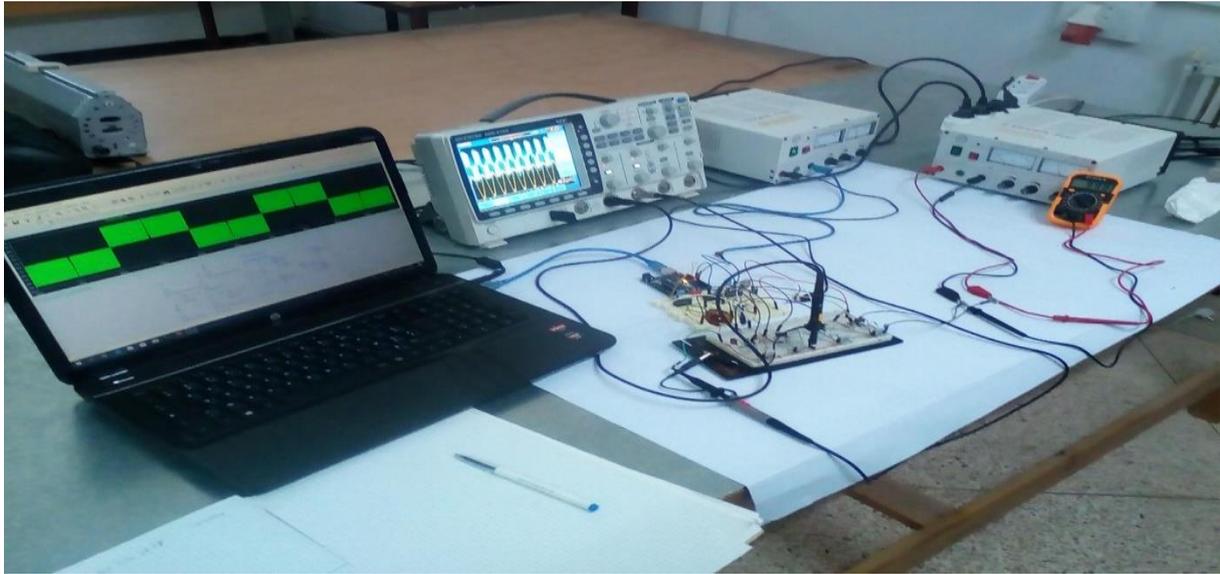


Figure IV.12 : Image du résultat du banc de test d'onduleur



Figure IV.13 : la tension de sortie de l'onduleur d'amplitude 5V.

La figure (IV.13) montre deux signaux, l'un qui de couleur Bleu qui représente le résultat temporel de la tension sans filtre LC et l'autre de couleur Jaune qui représente le résultat sinusoïdale de la tension de sortie de notre onduleur en présence du filtre LC en charge d'une résistance de  $500 \Omega$  et d'amplitude de 5V.

La figure (IV.14) montre le résultat temporel de la tension de sortie d'amplitude 10V.

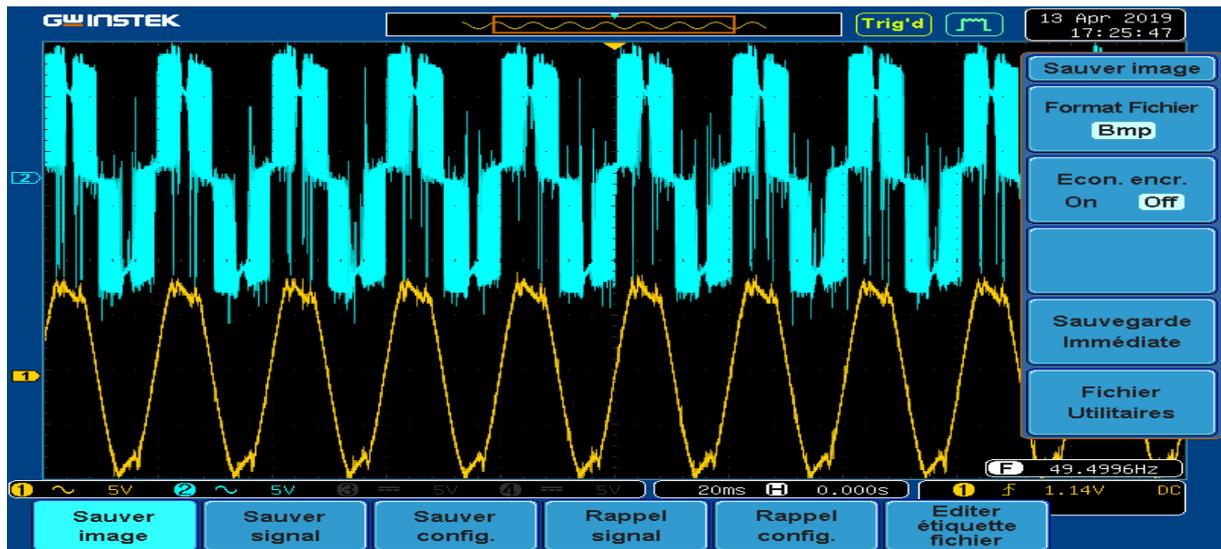


Figure IV.14 : la tension de sortie de l'onduleur d'amplitude 10V.

### IV.5. Comparaison des résultats temporels:

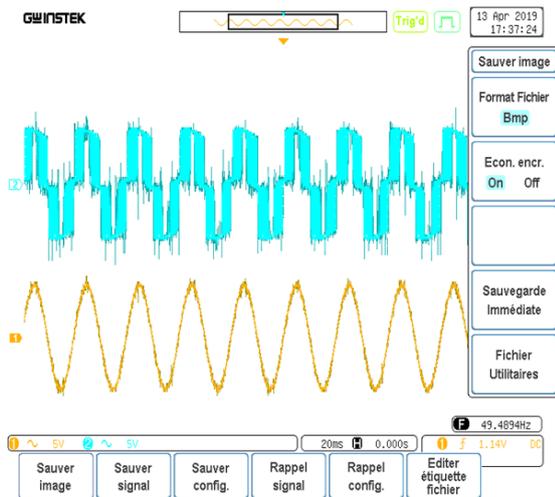


Figure IV.15 : Résultat expérimentale



Figure IV.16 : Résultat en simulation

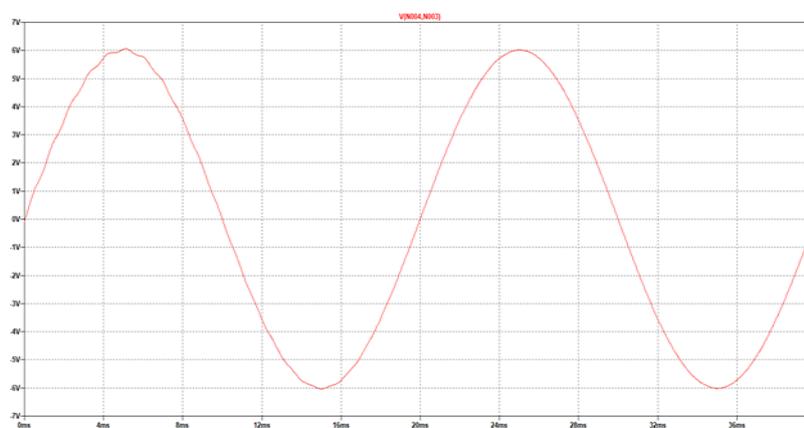


Figure IV.17 : Résultat en simulation du signal sinusoïdal

Si on compare les résultats de notre réalisation de figure (IV.15) avec celle de la simulation à l'aide de logiciel LTspice de figure (IV.16) et figure (IV.17), on trouve qu'ils sont identiques.

#### IV.5.1. Avant le filtrage :

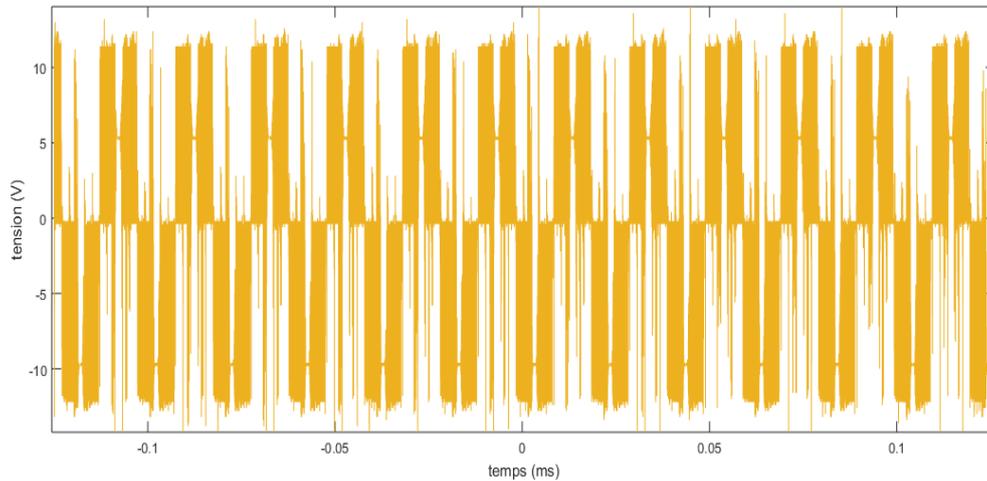


Figure IV.18 : Résultat en simulation

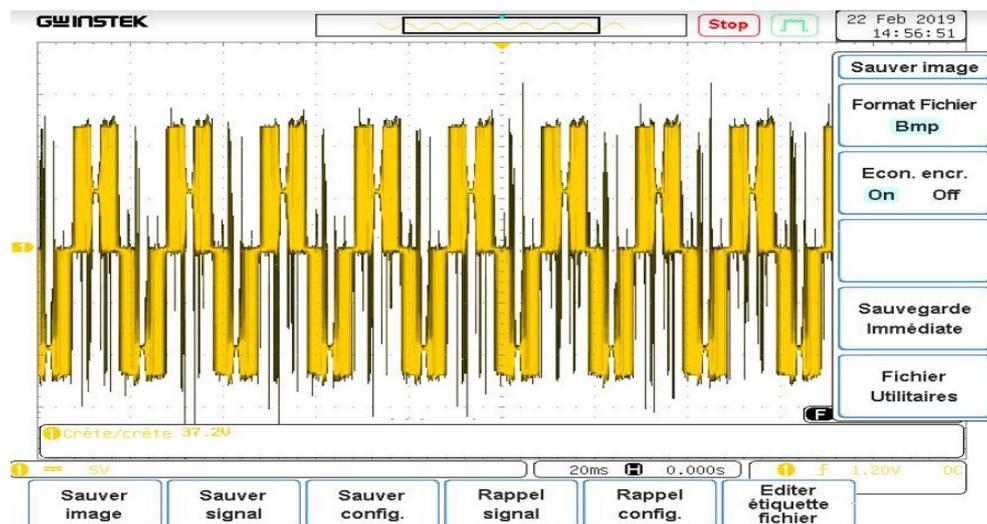


Figure IV.19 : Résultat expérimentale

Les deux figures précédent en voie que les résultats de expérimentation sont pareille avec les résultats de simulations.

### IV.5.2. Après le filtrage :

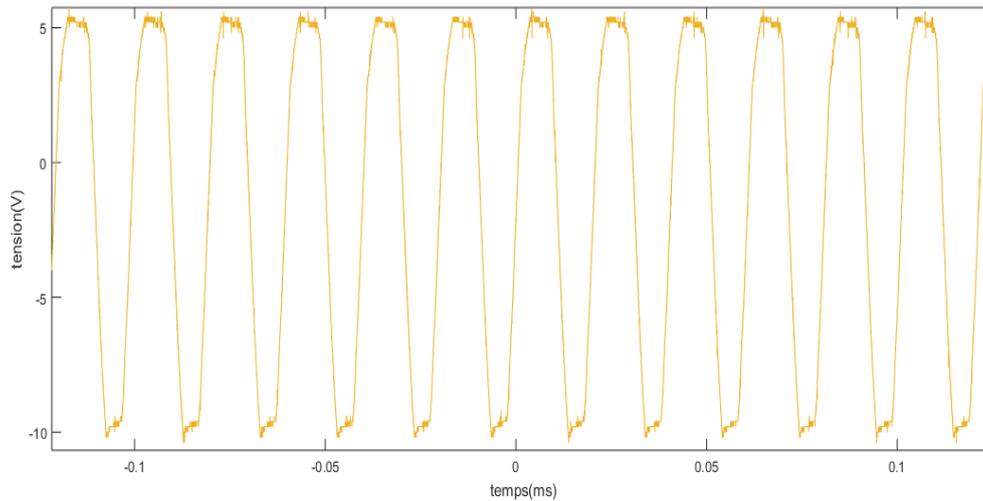


Figure IV.20 : Résultat en simulation

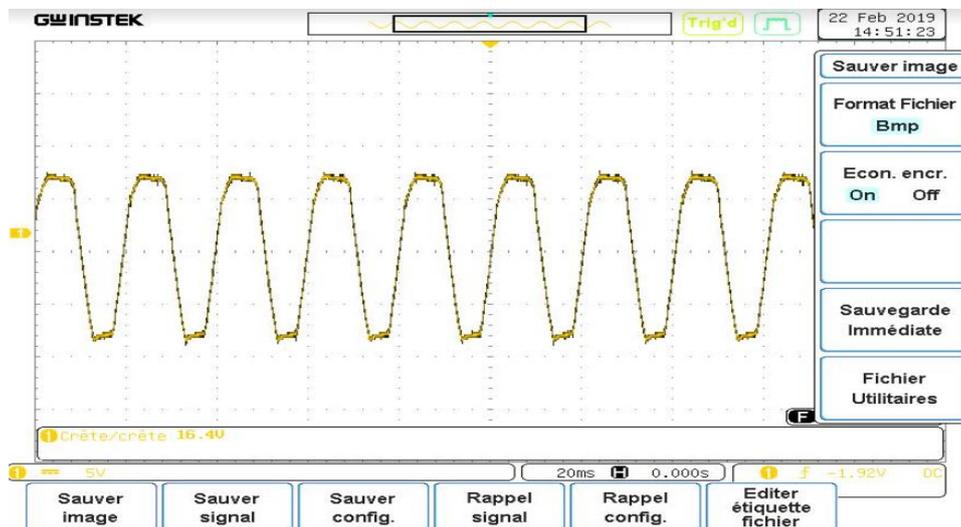


Figure IV.21 : Résultat expérimentale

D'après les résultats de simulation et expérimentale temporelle après le filtrage, on trouve que se sont identiques. Cela implique que notre réalisation est parfaite.

## IV.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans cette partie l'étude expérimentale d'un onduleur monophasé en pont complet et ses étapes (la conception du montage pratique et le circuit final) ainsi les résultats temporels de la tension de sortie. La commande utilisée dans cette partie c'est la carte d'ARDUINO-UNO.

Les résultats pratiques sont les fruits de notre connaissance théorique qui affirme la fiabilité de notre onduleur en pont complet.

## *Conclusion Générale*

## Conclusion Générale

La Compatibilité Electromagnétique (C.E.M.) est la capacité d'un dispositif, équipement ou système, à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire lui-même de perturbation électromagnétiques de nature à créer des troubles susceptibles de nuire au bon fonctionnement des appareils ou des systèmes situés dans son environnement. [4]

L'importance d'aujourd'hui des convertisseurs statiques est accrue par la concentration de dispositifs ou de systèmes avec des niveaux très différents de force et de sensibilité dans un même environnement. Le rôle d'CEM est de s'assurer qu'un système particulier bénéficie d'un degré d'immunité à son environnement afin qu'il puisse fonctionner sans affecter ses performances, la CEM est devenu un outil pour améliorer la conception et les performances des installations fixes. [6]

Pour cela l'environnement électromagnétique est devenu l'un des paramètres à prendre en compte dans tout projet industriel faisant intervenir de l'électronique au même titre que la tenue en température ou la tenue aux vibrations. Cette prise en compte doit avoir lieu dès le début de la conception jusqu'à l'installation finale du produit aux différents stades d'évolutions de celui-ci. Les facteurs d'influences pris en considération, tel que le rayonnement et la conduction, doivent évoluer et être représentatifs s'approchant le plus possible de la réalité. [6]

Actuellement, ce domaine de Compatibilité Electromagnétique concerne tous les secteurs de l'électronique et de l'électricité, elle est particulièrement importante, car la CEM n'est que de la physique élémentaire et finalement amusante. La maîtrise de la CEM est devenue une exigence incontournable pour les entreprises. [1]

Dans ce travail, nous avons étudié le phénomène des perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques DC-AC. L'évaluation de ces perturbations nous permet de connaître leurs degrés de nuisance sur les dispositifs d'électronique de puissance.

Dans un premier temps, le chapitre 1 était consacré à la compatibilité électromagnétique en général et en particulier, les perturbations et les modes de transmission. Nous avons mis en lumière les facteurs amplifiant ou canalisant la propagation des perturbations. Nous nous sommes intéressés aux perturbations observées dans les cellules de commutation.

Dans le deuxième temps, le chapitre 2 nous a permis de voir de près quelques convertisseurs statiques leurs types et leur applications, et Nous avons mis en évidence plus sur le convertisseur DC-AC ainsi leur modélisation.

Dans le troisième chapitre, on a présenté une méthode de simulation des perturbations électromagnétiques en utilisant logiciel LTSPICE dans le domaine temporel et fréquentiel. Le convertisseur utilisé pour cette étude est un onduleur DC-AC de type complet (pont H), on a simulé avec et sans Filtre LC à la charge sans oublier le rôle de la présence d'un RSIL dans un

circuit électrique. La simulation sous LTSPICE, nous a permis d'obtenir rapidement une estimation réaliste des perturbations émises par le convertisseur DC-AC.

Le quatrième chapitre est l'objet de cette étude traite la méthode de réalisation d'un onduleur monophasé en pont complet (H) à l'aide d'un ARDUINO-UNO. Ensuite, nous passons à la partie la plus essentielle dans ce chapitre qui est de la réalisation d'onduleur, nous détaillerons les différentes étapes de la réalisation de l'onduleur où parler de tous les composants qui entrent dans cette réalisation, une fois les différentes cartes ont été réalisées, nous collectons les parties pour obtenir le produit finale.

Notre travail avait pour but de présenter l'origine des perturbations électromagnétiques ainsi que les deux principales approches utilisées pour l'analyse CEM en électronique de puissance notamment pour un CVS DC-AC à base de quatre interrupteurs de type (MOSFET). Comme il a été expliqué, les commutations des interrupteurs de puissance (MOSFET) sont les principales sources des perturbations conduites au sein du convertisseur.

Ensuite nous avons appliqué le RSIL, Comme nous le savons tous, la commutation de l'interrupteur d'alimentation est la principale source d'interférences conduites. Ainsi, tous les effets inductifs et capacitifs de la structure du convertisseur et des connexions inductives et capacitives en tant qu'éléments parasites assurent à leur tour que la propagation des perturbations conduites au RSIL est possible.

En termes de perspectives, une adaptation plus grande au besoin industriel sera aussi à envisager et sera intéressant de définir clairement les critères de la conception du convertisseur DC-AC d'un réseau embarqué.

## *BIBLIOGRAPHIE*

# BIBLIOGRAPHIE

[1]. Maurice LARDELLIER ; « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES GENEREES PAR DES CONVERTISSEURS A LIAISONS DIRECTES » ; Doctorat en Génie électrique ; Ecole centrale de Lyon ; Français ; 21 mai 1996.

[2]. Document disponible sur ; <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00260186/document>

[3]. Document de « l'onduleur » disponible sur ; <http://forge.blogspot.com/2015/08/londuleur.html>

[4]. Document de « la compatibilité électromagnétique » disponible sur ; [https://homepages.laas.fr/fcaignet/Cours/CEM\\_2004.pdf](https://homepages.laas.fr/fcaignet/Cours/CEM_2004.pdf)

[5]. Document de « Champs électromagnétiques, compatibilité électromagnétique (CEM), interférence électromagnétique (EMI) » ; disponible sur ; [https://www.emitech.fr/fr/champselectromagnetiques-essais-cem#:~:text=La%20compatibilit%C3%A9%20%C3%A9lectromagn%C3%A9tique%20\(CM\)%20est,se%20trouve%20dans%20cet%20environnement](https://www.emitech.fr/fr/champselectromagnetiques-essais-cem#:~:text=La%20compatibilit%C3%A9%20%C3%A9lectromagn%C3%A9tique%20(CM)%20est,se%20trouve%20dans%20cet%20environnement)

[6]. Document sur « THE IMPORTANCE OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY » disponible sur ; <https://www.sicomtesting.com/en/blog/limportanza-della-compatibilita-elettromagnetica/>

[7]. Document sur « la CEM » disponible sur ; <https://www.youtube.com/watch?v=xeV6c6i6wTI>

[8]. Abdallah Darkawi . Qualité d'Energie (Compatibilité Electromagnétique CEM). École d'ingénieur. Qualité d'Energie (CEM) UE : Qualité d'énergie, CNAM, France. 2017. ffccl-01474998f

[9]. CHEHADA Mohammed ; « COUPLAGE ELECTROMAGNETIQUE D'UNE ONDE DE Foudre AVEC UNE LIGNE DE TRANSPORT D'ÉNERGIE » ; Diplôme de MASTER en Energie et Réseaux Electrique ; UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUUM EL BOUAGHI ; 2014-2015.

[10]. « La Compatibilité électromagnétique » Disponible sur : <https://pdfcoffee.com/cemgtr2pdf-pdf-free.html>

[11]. « Compatibilité électromagnétique » ; Wikipédia : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Compatibilit%C3%A9\\_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Compatibilit%C3%A9_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique)

[12]. « Définition et explication compatibilité électromagnétique » ; Disponible sur :

<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Compatibilite-electromagnetique-page-3.html>

[13]. Abdallah Darkawi. La Compatibilité Électromagnétique (CEM). École d'ingénieur. France. 2016

[14]. « Limiter les expositions professionnelles aux champs électromagnétiques » ; Disponible sur : <https://www.inrs.fr/risques/champs-electromagnetiques/ce-qu-il-faut-retenir.html#:~:text=Un%20champ%20C3%A9lectromagn%3%A9tique%20appara%C3%AEt%20d%C3%A8s,champ%20C3%A9lectrique%20dans%20son%20voisinage.>

[15]. « Teste de performance ; Compatibilité électromagnétique » ; Disponible sur : <http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/CEM/tests.html>

[16]. « Qu'est-ce que la CEM » ; Document électronique ; Disponible sur : <https://www.actutem.com/quest-ce-que-le-test-cem/>

[17]. Document, « Compatibilité électromagnétique », Disponible sur : <https://manualzz.com/doc/5084666/4-compatibilit-lectromagnitique--cem>

[18]. PDF, « Compatibilité electromagnétique », Disponible sur : [http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/guettafi\\_amor/files/compatibilite\\_electromagnetique.pdf](http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/guettafi_amor/files/compatibilite_electromagnetique.pdf)

[19]. COSTA François, GAUTIER Cyrille, LABOURÉ Éric, REVOL Bertrand « La compatibilité électromagnétique en électronique de puissance (principes et cas d'études) » ; Livre de ; MULTON Bernard, SABONNADIÈRE Jean-Claude.

[20]. « CEM en électronique de puissance » ; Disponible sur : <https://slideplayer.fr/slide/1168295/>

[21]. Noureddine KHELIFI « La CEM (Electronique des Hautes Fréquences) » ; Grade de Doctorat ; Université de LIMOGES ECOLE DOCTORALE Science et Ingénierie pour l'Information FACULTE des Sciences et Techniques de Limoges ; Année 2013.

[22]. « Compatibilité électromagnétique » ; La plateforme du proficionnele des installations électrique en suisse ; Disponible sur <http://www.electromagazine.ch/fr/compatibilite-electromagnetique/>

[23]. K.Arzag , Z.Azzouz , B.Ghemri , A.Mimouni « Etude CEM sur le couplage du champ Électromagnétique rayonné » ; Doctorat ; Université Tahar Moulay Saida , Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, USTO-MB , Université Ibn Khaldoun Tiaret ; 2014 .

[24]. JASCQUES CUVILLIER « Cours de CEM » ; génie électrique et information industrielle ; Document libre ; 1999.

[25]. Document sur « Recommandations pour l'amélioration de la CEM » ; Disponible sur : [https://fr.electrical-installation.org/fr/wiki/Recommandations\\_pour\\_l%27am%C3%A9lioration\\_de\\_la\\_CEM](https://fr.electrical-installation.org/fr/wiki/Recommandations_pour_l%27am%C3%A9lioration_de_la_CEM)

---

[26]. BIDI MANEL, LATRACHE.MED LHADI « Cem Compatibilité Électromagnétique Et Réseaux D'énergie, perturbations, effets Et Solutions » ; Doctorat génie électrotechnique et automatique ; Université frères Mentouri – Constantine ; 2017.

[27]. Document « compatibilité électromagnétique » ; Disponible sur : <file:///C:/Users/space-net/Downloads/cem2.pdf>

[28]. Eliana Rondon-Pinilla. Conception de convertisseurs électroniques de puissance à faible impact électromagnétique intégrant de nouvelles technologies d'interrupteurs à semi-conducteurs. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2014. Français.

[29]. Christian Vollaire « Caractéristiques et évolution du bruit électromagnétique dans les dispositifs d'alimentation embarqués sur avion » ; SATIE, ENS Cachan, PRES UniverSud, 61 av. du Pdt Wilson, Cachan, France, IUFM de Créteil, Université Paris 12, place du 8 mai 1945, Saint-Denis, France, AMPERE, Ecole Centrale de Lyon, 36 Av. Guy de Collonges, Ecully, France.

[30]. Christophe LEDOUX « Conception par optimisation de convertisseurs statiques pour applications mono-convertisseur multi-machines séquentielles ; Contribution à l'optimisation du placement-routage » ; Doctorat ; Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes » ; 11 décembre 2012.

[31]. Cours « Blindage (CEM) » ; 2005 ; Disponible sur : <https://www.etudier.com/dissertations/Blindage-Cem/51964214.html>

[32]. Thomas RAYNAUD « Rappel des principales techniques de protection pour l'immunité (Compatibilité électromagnétique en phase de maintenance) », Document 10.02.2017.

[33]. SLIMANI HALIMA « Compatibilité électromagnétique (Estimation des perturbations conduites et rayonnés) » ; Doctorat ; UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE sidi belabes ; 28.06.2016.

[34]. **Stéphane VIENOT** « Méthodes de modélisation CEM de l'électronique de puissance appliquées au domaine automobile », Doctorat, Université de Lille, Mai 2021

[35]. Claude CHEVASSU « Électronique de puissance Principes » ; Ecole nationale superieur Maritime ; 5.12.2013.

[36]. Ilyas Dchar. Conception d'un module d'électronique de puissance "Fail-to-short" pour « application haute tension » ; Electronique ; Université de Lyon ; 2017. Français.

[37]. ACHOUR Abderraouf « Analyse et commande d'un hacheur Buck-boost » ; Mémoire de Master ; Réseaux électrique ; Université Mohamed Khider de Biskra ; 23.06.2018.

[38]. KACHENOURA Rahma « Etude des pertes dans les convertisseurs statiques » ; thèse de Doctorat en électrotechnique ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU ; 2015.

[39]. Document « convertisseurs statiques » ; disponible sur : [file:///C:/Users/space-net/Downloads/\[CStat\]\[CO\]Convertisseurs statiques%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/space-net/Downloads/[CStat][CO]Convertisseurs statiques%20(3).pdf)

[40]. « les convertisseurs statiques (définition et exemple) » ; disponible sur : <https://www.automation-sense.com/blog/electronique/les-convertisseurs-statiques-definition-et-exemples.html>

[41]. « généralités sur les convertisseurs statiques » , disponible sur, <http://4electromecanique.blogspot.com/2016/10/generalites-sur-les-convertisseurs.html>

[42]. Oussama Demane « Simulation et étude expérimentale d'un hacheur dévolteur à base d'un MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor) » ; Doctorat ; Université de Batna - Master en génie électrique 2011.

[43]. Cours de LUC LASNE « électronique de puissance 2eme édition » ; professeur agrégé a l'université de bordeaux.

[44]. LUISE «Énergie et convertisseurs d'énergie » ; Master ; Université de Savoie ; 2005.

[45]. SABER ACHRAF; HAOUAM ABDERRAZZAQ « les convertisseurs statiques » ; Master ; Université ABDELMALEK ESSAADI ;FACULTE DES SCIENCES ;TETOUAN ; 2011.

[46]. Document « les gradateurs » ; Disponible sur : [https://get-couffignal.pagesperso-orange.fr/cours/cours\\_physique/GRADATOR.pdf](https://get-couffignal.pagesperso-orange.fr/cours/cours_physique/GRADATOR.pdf)

[47]. Document sur « les convertisseurs statiques » ; Disponible sur : <https://www.etudier.com/dissertations/Boost/253470.html>

[48]. Document sur « les types des convertisseurs statiques » ; Disponible sur : <https://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/>

[49]. Mr: SOYED-Abdessami « Cours d'électronique de puissance (les convertisseurs DC/AC) » Disponible sur : <https://www.technologuepro.com/cours-electronique-puissance-as/chapitre-6-les-onduleurs.pdf>

[50]. Hidri.Imed « Cours D'électronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC » ; Institut supérieur des études technologiques de Nabeul.

[51]. Document « les onduleurs autonome » ; Disponible sur : [http://elearning.univ-djelfa.dz/pluginfile.php/40670/mod\\_resource/content/1/chap3\\_Onduleurs.pdf](http://elearning.univ-djelfa.dz/pluginfile.php/40670/mod_resource/content/1/chap3_Onduleurs.pdf)

[52]. Cours « les convertisseurs statiques » ; Lycée Jean Zay 21 rue Jean Zay 63300 Thiers Académie de Clermont-Ferrand.

[53]. MESBAHI NADHIR « Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multiniveaux sur les Réseaux de Distribution » ; Doctorat en sciences ; Réseaux Electriques ; Université BADJI MOKHTAR ANNABA ; 2014.

[54]. Dechoucha. Souhila ; Bourezg. Ouarda « Conception des techniques MLI dédiées à la commande des convertisseurs DC/DC et DC/AC à base du microcontrôleur PIC18F4431 » ; Master académie ; CONTRÔLE INDUSTRIEL ; Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; 2016/2017.

[55]. Document « généralité sur les onduleurs » ; Disponible sur ; [https://get-couffignal.pagesperso-orange.fr/cours/cours\\_physique/ONDULEUR.pdf](https://get-couffignal.pagesperso-orange.fr/cours/cours_physique/ONDULEUR.pdf)

[56]. Document : [http://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/22430/TFE\\_ElisaBraco.pdf?sequence=1](http://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/22430/TFE_ElisaBraco.pdf?sequence=1)

[57]. Karima BERKOUNE « Approche mathématique originale appliquée à la modélisation des stratégies de modulation des onduleurs multiniveaux » ; Document ; Laboratoire Génie de Production, INPT-ENIT, Université de Toulouse, 47 Av d'Azereix, 65000 Tarbes, France.

[58]. IKHOU ADDA HABIB; MEGAIZ YOUNES « Modélisation, contrôle et évaluation de la performance d'un système productif d'électricité à base de panneaux photovoltaïques »; Master; INGÉNIERIE DES SYSTEMES ÉLECTRIQUES; Université MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA; 2016/2017.

[59]. GHORZI Zoulikha MIMOUNI Amina « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé » ; Master ; Electrotechnique ; ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES-T L E M C E N- ; 9/7/2019.

[60]. Document « Compatibilité électromagnétique (optimiser la simulation avec LTspice) » ; Electronique ; disponible sur ; <https://www.zonetronik.com/compatibilite-electromagnetique-optimiser-la-simulation-avec-ltspice/>

[61]. TOMAS. BN « Introduction à LTspice » ; Document ; Électronique Analogique ; Université de liège ; Février 2010.

[62]. Christophe Viallon « Notice d'utilisation simplifiée de LTspice » ; Document ; Université Paul Sabatier, Toulouse III ; 2010/2014.

[65]. S. Rezini ; Z. Azzouz « Impact des émissions EM conduites produites par un hacheur abaisseur » ; Doctorat ; Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, Algérie, 10 Septembre 2017.

[66]. Abdelkader SABEUR, Mokhtar SLIMANI « Etude des perturbations conduites d'un Convertisseur de puissance » ; ingénieur d'Etat ; GENIE ELECTRIQUE ; ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE ; 2009.

[67]. ABDELKRIM, Abdelatif « Etude et simulation d'un onduleur de tension pont en H multi-niveaux en cascade » ; thèse de doctorat ; Université larbi tbessi Tipazza ; 22/2/2022.

[68]. TAYEBI AZZEDINNE « Réalisation d'un Onduleur de Tension Commandé par Microcontrôleur pour un Système Photovoltaïque » ; Doctorat ; Réseaux électriques ; Université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES ; 2021.

[69]. MECHTA Douaa et GHERBI Radhwane « AUTOMATISATION DES TACHES DOMOTIQUES D'UNE MAISON A L'AIDE D'UNE CARTE ARDUINO ET LABVIEW » ; Master académique ; Intremontations ; Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; 26 / 06 / 2019.

## *Résumé*

## Résumé

Ces dernières décennies, les perturbations électromagnétiques deviennent de plus en plus gênantes pour les systèmes électriques et/ou électroniques. Ces derniers peuvent être aussi une source de perturbations pour les systèmes voisins ou les autres utilisateurs du même système. Ceci donne naissance à une discipline nommée : la compatibilité électromagnétique CEM.

De cette définition découlent trois pôles d'intérêt : l'étude des sources de perturbations, l'étude des couplages et, enfin, l'étude de l'impact des perturbations sur une « victime ». Dans ce mémoire, nous avons appliqués cette problématique dans le domaine haute fréquence, parmi les sources des perturbations électromagnétiques, on peut citer le convertisseur statique DC-AC. Après modélisation et simulation à l'aide de logiciel LTspice, les résultats obtenus Permettent de confirmer la réalité de perturbations électromagnétique du convertisseur statique DC/AC après l'utilisation des solutions comme des filtres LC et RSIL.

**Mots clés :** compatibilité électromagnétique(CEM), perturbation électromagnétique, convertisseur statique DC-AC, filtre LC, RSIL.

## Abstract

In recent decades, electromagnetic disturbances have become increasingly troublesome for electrical and/or electronic systems. The latter may also be a source of disturbance for neighbouring systems or other users of the same system. This gives rise to a discipline called EMC electromagnetic compatibility.

From this definition, arise three poles of interest: the study of the sources of disturbances, the study of the linkages and, finally, the study of the impact of the disturbances on a «victim». In this brief, we have applied this problem in the high frequency domain, among the sources of electromagnetic disturbances; we can mention the DC-AC static converter. After modelling and simulation using LTspice software, the results obtained confirm the electromagnetic disturbance reality of the DC/AC static converter after the use of solutions such as LC and RSIL filters.

**Keywords:** Electromagnetic compatibility (EMC), DC-AC static converter, electromagnetic disturbance, LC filter, RSIL.

## ملخص

في العقود الأخيرة، أصبحت الاضطرابات الكهرومغناطيسية مزعجة بشكل متزايد للأنظمة الكهربائية و/أو الإلكترونية. وقد يكون هذا الأخير أيضا مصدر اضطراب للنظم المجاورة أو للمستخدمين الآخرين للنظام نفسه. يؤدي هذا إلى ظهور تخصص يسمى التوافق الكهرومغناطيسي (CEM).

وينشأ عن هذا التعريف ثلاثة أقطاب ذات أهمية: دراسة مصادر الاضطرابات، ودراسة الروابط، وأخيرا دراسة أثر الاضطرابات على «الضحية». في هذا الموجز، طبقنا هذه المشكلة في مجال التردد العالي، من بين مصادر الاضطرابات الكهرومغناطيسية، يمكننا ذكر محول DC/AC الساكن. فبعد النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج LTspice، تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها حقيقة الاضطرابات الكهرومغناطيسية لمحول DC/AC الساكن بعد استخدام حلول مثل مرشحات LC وRSIL.

**الكلمات الرئيسية:** التوافق الكهرومغناطيسي (CEM)، الاضطرابات الكهرومغناطيسية، المحول الساكن DC/AC، المرشحات LC، RSIL.