

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

**Contribution à l'étude des perturbations
électromagnétiques conduites dans les Redresseurs**

Présenté Par :

- 1) Melle MAHIEDDINE Khadidja
- 2) Melle BELKADI Fatima Zohra
- 3) Melle MEDDAH Nor El Houda

Devant le jury composé de :

Dr.Flitti Mohamed	M C AUAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mr.Ayache Zoaoui	C AUAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr. BENZAZZA Baghdadi	M C AUAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

*Nous tenons tous d'abord à remercier Allah de
nous avoir donné la force, la patience et le courage pour
arriver à accomplir ce travail*

*Nous exprimons notre remerciement les plus sincères à
,l'encadreur Mr BENAZZA Baghdadi pour leur patience
remarques et conseils, Qu'il trouve ici le témoignage de
notre profonde gratitude*

*Nous remercions tous nos enseignants et l'ensemble du
corps professoral du département Génie Electrique*

*Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude
a nos parents pour leur contribution et leur soutien*

*A toutes les personnes qui ont participé de près ou
de loin à la réalisation de ce travail*

MAHIEDDINE Khadidja

BELKADI Fatima Zohra

MADDEH Nour El Houda



Dédicace

Nos chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer nos respects pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse leur soutien et leurs prières tout au long de notre étude. Nous vous remercions pour tout le soutien et l'amour que vous nous avez témoigné depuis notre enfance et nous espérons que votre bénédiction continuera toujours avec nous. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux.

Nos chers frères et sœurs

Pour leurs aides et leur encouragement, et leur soutien

À nos chers amis

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles Et particulièrement à mes collègues de travail et ses familles
A tous mes professeurs qui nous ont enseigné*

Salutations à tout notre famille

Oncles, tantes, cousins, cousines et le reste de nos amis et tous ceux que nous aimons et respectons



Table des matières

SOMMAIRE :

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Table des figures et liste de tableau.....	VI
Liste des abréviations.....	X
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I	
GENERALITE SUR LA COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE (C.E.M)	
I. Introduction.....	3
I.1. Historique.....	3
I.2. Définition de la CEM.....	4
I.3. Aspects fondamentaux de la CEM.....	4
I.4. Norme de la CEM.....	4
I.4.1. Les normes fondamentales.....	4
I.4.2. Les normes génériques.....	5
I.4.3. Les normes de familles de produits.....	5
I.5. Objectif de la CEM.....	6
I.6. Règle de base de la CEM.....	6
I.7. Niveaux de compatibilité.....	6
I.8. CEM au niveau industriel.....	7
I.9. Notion d'émissivité/susceptibilité.....	7
I.10. Définition d'un Perturbation électromagnétique.....	8
I.10.1. Fondements de la perturbation électromagnétique (EM)	8
I.10.2. Les émissions enconduites.....	9
I.10.2.1. Mode commun.....	9
I.10.2.2. Mode différentiel.....	9
I.10.3. Les émissions enrayonnées.....	10
I.11. Différents types des perturbations électromagnétiques.....	11
I.11.1. Les harmoniques.....	11
I.11.2. champs magnétiques et électromagnétiques.....	11
I.11.2.1. Le champ électrique.....	11
I.11.2.2. Le champ magnétique.....	11
I.11.2.3. Le champ électromagnétique.....	12
I.11.3. Fluctuations de tension.....	12
I.11.4. Creux de tension et coupure brèves.....	12
I.11.5. Surtensions et coup de foudre.....	13
I.11.6. Décharges électrostatiques.....	13
I.11.7. Variation de fréquence.....	14
I.11.8. Signaux transmis sur le réseau.....	14
I.11.9. Déséquilibre de phases.....	14
I.12. Etude des Couplages électromagnétiques.....	14
I.12.1. Couplage par impédance commune.....	14

I.12.2. Couplage capacitif carte à châssis.....	15
I.12.3. Couplage par diaphonie inductive.....	15
I.12.4. Couplage par diaphonie capacitive.....	15
I.12.5. Couplage du champ à boucle.....	16
I.13. Problèmes de base de la C.E.M.....	16
I.14. Conséquences de la CEM.....	18
I.14.1. Conséquences pour les constructeurs.....	18
I.14.2. Conséquences pour les installateurs.....	18
I.15. TECHNIQUES DE PROTECTION EN CEM.....	19
I.15.1. Blindage.....	19
I.15.2. Filtrage.....	19
I.15.3. Ferrites.....	20
I.15.4. Torsadage.....	20
I.16. Conclusion.....	20

Chapitre II

MODELISATION DES CONVERTISSEURS AC/DC

II. Introduction.....	22
II.1. Définition d'un convertisseur statique.....	22
II.2. Interrupteurs statiques.....	23
II.2.1. Interrupteur parfait.....	23
II.2.2. Les interrupteurs à semi-conducteurs.....	23
II.3. Les familles de convertisseurs statiques.....	25
II.3.1. Le Gradateur.....	25
II.3.2. Le Hacheur.....	26
II.3.3. L'Onduleur.....	27
II.3.4. Le Redresseur.....	28
II.4. Les différents types d'un redresseur.....	28
II.4.1. les redresseurs non commandé.....	29
II.4.2. les redresseurs commandés.....	31
II.5. La modélisation de redresseur à diode PD3.....	35
a) Modèle Simulink du pont redresseur à diodes PD3.....	36
b) Validation expérimentale.....	37
II.6. CEM en électronique de puissance.....	37
II.6.1. cause des perturbations sur les redresseurs.....	38
II.6.2. Etendue spectrale du bruit dans les convertisseurs statiques.....	38
II.6.3. Commutation des redresseurs.....	39
II.7. Classification des émissions des convertisseurs selon le mode de propagations.....	39
II.7.1. Perturbation conduites basses fréquences dans les redresseurs.....	40
II.7.2. Perturbations conduites hautes fréquences dans les redresseurs.....	41
II.8. CONCLUSION.....	41

Chapitre III

SIMULATION CEM DANS UN CONVERTISSEUR AC/DC

III. Introduction.....	42
III.1.DESCRPTION DU LOGICIEL LTSPICE.....	42
III.2.Présentation du logiciel LTspice.....	43
III.2.1.Dessin du circuit.....	45
III.2.1.1. Ajout d'éléments passifs au circuit.....	45
III.2.1.2. Ajout d'éléments actifs.....	46
III.3.Liste des fonctions.....	48
III.4.Simulation.....	48
III.4.1.Paramétrage de la simulation.....	48
III.4.2.Simulation temporelle.....	48
III.4.3.Simulation fréquentielle.....	49
III.5.Application aux redresseurs.....	49
III.5.1.Modèle de redresseur non commandé.....	49
III.5.1.1. Redresseur monophasé simple alternance.....	49
III.5.1.2. Redresseur en pont de diode.....	55
III.5.1.3. Redresseur triphasé PD3.....	61
III.5.2.Modèle de redresseur commandé.....	68
III.5.2.1. Redresseur monophasé simple alternance.....	68
III.5.2.2. Redresseur triphasé PD3.....	74
III.6.Conclusion.....	79
CONCLUSION GENERALE.....	81
BIBIOGRAPHIE	
RESUME	



TABLE DES FIGURES
ET
LISTE DE TABLEAU

TABLE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Compatibilité Electromagnétique.....	4
Figure I.2 : Transmission des perturbations.....	4
Figure I.3 : Niveaux de perturbation en CEM.....	7
Figure I.4 : Développement du produit en fonction de l'échelle du temps.....	7
Figure I.5 : Acteurs de la CEM.....	8
Figure I.6 : Eléments essentiels dans le couplage électromagnétique.....	9
Figure I.7 : les perturbations (émissions) conduites.....	9
Figure I.8 : les perturbations (émissions) rayonnés.....	10
Figure I.9 : Direction de propagation.....	10
Figure I.10 : Décomposition d'un signal perturbé.....	11
Figure I.11 : Le champ électromagnétique.....	12
Figure I.12 : Fluctuation de tension et Flicker.....	12
Figure I.13 : Creux de tension et coupure brève.....	13
Figure I.14 : Surtensions et coup de foudre.....	13
Figure I.15 : Décharge Electrostatique avec une impulsion de 1ns.....	14
Figure I.13 : couplage par impédance commune.....	15
Figure I.14 : le couplage capacitif carte à châssis.....	15
Figure I.15 : diaphonie inductive.....	15
Figure I.16 : diaphonie capacitive.....	16
Figure I.17 : couplage champ à fil.....	16
Figure I.18 : couplage champ à boucle.....	16
Figure I.19 : Emission par rayonnement.....	17
Figure I.20 : Emission conduite par l'équipement.....	17
Figure I.21 : Susceptibilité aux rayonnements.....	17
Figure I.22 : Susceptibilité conduite.....	17
Figure I.23 : Déclaration de conformité.....	18
Figure I.24 : Blindage ou écran électromagnétique.....	19
Figure I.25 : Filtrage des perturbations.....	19
Figure I.26 : Les Ferrite.....	20
Figure I.27 : Diminution du champ magnétique par le principe de torsadage.....	20

CHAPITRE II

Figure II.1 : Convertisseur statique.....	22
Figure II.2 : schéma synoptique de la fonction assurée par les convertisseurs.....	23
Figure II.3 : symbole d'un interrupteur en état ouvert.....	23
Figure II.4 : symbole d'un interrupteur en état fermé.....	23
Figure II.5 : symbole de la diode.....	23
Figure II.6 : symbole du Thyristor.....	23
Figure II.7 : Retarde à l'amorçage.....	24
Figure II.8 : Transistor bipolaire.....	25
Figure II.9 : Transistor NMOS/IGBT.....	25
Figure II.10 : Différents types de convertisseurs statiques.....	25
Figure II.11 : Conversion AC/AC.....	26
Figure II.12 : Conversion DC/DC.....	26
Figure II.13 : La structure des onduleurs.....	27

Figure II.14: Les formes de la tension de sortie.....	27
Figure II.15: La structure des redresseurs.....	28
Figure II.16: redresseur monophasée simple alternance sur la charge résistive.....	29
Figure II.17: allures des tensions et le courant du redresseur monophasée simple alternance..	29
Figure II.18: circuit électrique.....	30
Figure II.19: redressement double alternance sur la charge résistive.....	30
Figure II.20: chronogrammes des tensions et des courants.....	31
Figure II.21: redresseur monophasée simple alternance sur la charge résistive.....	31
Figure II.22: chronogrammes des tensions et des courants.....	32
Figure II.23: redressement double alternance sur la Charge inductive.....	32
Figure II.24: chronogrammes des tensions et des courants.....	32
Figure II.25: redressement double alternance sur la charge résistive.....	33
Figure II.26: évolution des grandeurs dans le cas d'un débit sur charge résistive.....	33
Figure II.27: Montage PD3 charge inductive.....	34
Figure II.28: Forme d'ondes Montage PD3 charge inductive.....	35
Figure II.29: Pont redresseur à diodes PD3.....	35
Figure II.30: Modèle Simulink d'un pont redresseur PD3.....	37
Figure II.31: Comparaison simulation/expérimentation pour un pont redresseur PD3.....	37
Figure II.32: Exemple d'une chaine de conversion d'électronique de puissance.....	38
Figure II.33: Etendue spectrale des phénomènes de perturbateur.....	39
Figure II.34: Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs.....	39
Figure II.35: Représentation spectrale.....	40
Figure II.36: Rang de l'harmonique.....	40
Figure II.37: Modèle simple en basse fréquence.....	41
Figure II.38: Schéma électrique haute fréquence.....	41

CHAPITRE III

Figure III.1: redresseur monophasé simple alternance non commandé «Sans filtre».....	50
Figure III.2: réponse temporelle de tension d'entrée.....	50
Figure III.3: réponse temporelle de tension et de sortie.....	50
Figure III.4: réponse temporelle de courant du sortie.....	51
Figure III.5: réponse temporelle de courant de sortie.....	51
Figure III.6: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	52
Figure III.7: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	52
Figure III.8: redresseur monophasé simple alternance non commandé «Avec un filtre».....	53
Figure III.9: réponse temporelle de tension du sortie.....	53
Figure III.10: réponse temporelle de courant de la sortie.....	54
Figure III.11: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	54
Figure III.12: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	55
Figure III.13: redresseur en pont diode «sans filtre».....	55
Figure III.14: réponse temporelle de tension d'entrée.....	56
Figure III.15: réponse temporelle de tension du sortie.....	56
Figure III.16: réponse temporelle de courant d'entrée.....	56
Figure III.17: réponse temporelle de courant de sortie.....	57
Figure III.18: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	57
Figure III.19: réponse fréquentielle de courant de la sortie.....	58
Figure III.20: redresseur en pont de diode «Avec un filtre».....	59
Figure III.21: réponse temporelle de tension du sortie.....	59

Figure III.22: réponse temporelle de courant du sortie.....	59
Figure III.23: réponse fréquentielle de tension de la sortie.....	60
Figure III.24: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	61
Figure III.25: montage redresseurPD3non commandé «Sans filtre».....	61
Figure III.26: les six signaux de tension d'entrée.....	62
Figure III.27: réponse temporelle des tensions de la sortie.....	62
Figure III.28: réponse temporelle signal de courant de la sortie.....	63
Figure III.29: réponse fréquentielle de tension de la sortie.....	63
Figure III.30: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	64
Figure III.31: schéma électrique de redresseur triphasé non commandé «Avec filtre».....	65
Figure III.32: les six signaux de tension d'entrée.....	65
Figure III.33: réponse temporelle de tension du sortie.....	66
Figure III.34: réponse temporelle de courant du sortie.....	66
Figure III.35: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	67
Figure III.36: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	67
Figure III.37: schéma électrique de redresseur monophasé simple alternance commandé « Sans filtre ».....	68
Figure III.38: réponse temporelle de tension d'entrée.....	68
Figure III.39: réponse temporelle signal de tension du sortie.....	69
Figure III.40: réponse temporelle de courant du sortie.....	69
Figure III.41: réponse temporelle de courant du sortie	70
Figure III.42: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	70
Figure III.43: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	71
Figure III.44: schéma électrique de redresseur monophasé simple alternance commandé « Avec un filtre ».....	71
Figure III.45: réponse temporelle de la tension du sortie.....	72
Figure III.46: réponse temporelle de courant du sortie.....	72
Figure III.47: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	73
Figure III.48: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	73
Figure III.49: montage de redresseurPD3 commandé «Sans filtre»	74
Figure III.50: réponse temporelle de tensions d'entrée.....	74
Figure III.51: réponse temporelle de tensions du sortie.....	75
Figure III.52: réponse temporelle de courant du sortie.....	75
Figure III.53: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	76
Figure III.54: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	76
Figure III.55: schéma électrique de redresseur triphasé commandé «Avec filtre»	77
Figure III.56: réponse temporelle de tensions du sortie.....	78
Figure III.57: réponse temporelle de courant du sortie.....	78
Figure III.58: réponse fréquentielle de tension du sortie.....	79
Figure III.59: réponse fréquentielle de courant du sortie.....	79

LISTE DE TABLEAU

CHAPITRE II

Tableau II.1 : Les tensions des montages sur chaque intervalle de fonctionnement.....	34
Tableau II.2 : Classification des perturbations selon les fréquences.....	40

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Les différentes unités possibles dans LTspice.....	45
---	----

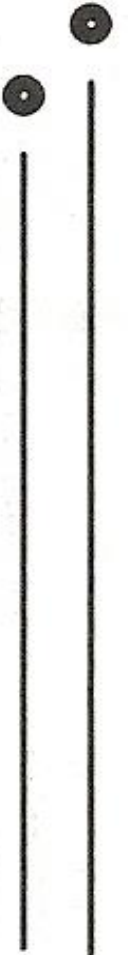


LISTE DES ABREVIATIONS



LISTE DES ABREVIATIONS

CEM	Compatibilité Electromagnétique.
CENELEC	Comité Européen de Normalisation en Electrotechnique
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
UTE	Union Technique de l'Électricité en France
CPU	Central Processing Unit
U (V)	Tension.
I	Courant
P	Puissance
R	Résistance de charge.
L	Inductance.
C	Capacité
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
DC-DC	Convertisseur continu/continu
AC-AC	Convertisseur alternatif /alternatif.
DC-AC	Convertisseur continu/alternatif.
AC-DC	Convertisseur alternatif /continu.
K	Interrupteur
T	La période
< >	La valeur moyenne
u	Commande
HF	Haute Fréquence
BF	Basse Fréquence



INTRODUCTION GENERALE



Introduction Générale

La compatibilité électromagnétique (*C.E.M*) concerne l'étude de la cohabitation des systèmes électriques et électroniques avec des perturbateurs électromagnétiques intentionnels ou non [1]. On fait, tout système en activité se perturbe par son environnement extérieur et à son tour, le perturbe et se perturbe lui-même. Pour cela il doit avoir un niveau d'immunité ou « susceptibilité » suffisamment élevé et il ne doit pas émettre trop de perturbations. [2]

Les modes d'action d'un système source sur un autre système victime sont des phénomènes physiques appelés « couplages » qui représentent le nœud de la compatibilité électromagnétique car pour qu'un système soit compatible, il faut éliminer ces couplages ou les minimiser au maximum. [3]

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, l'étude des moyens de propagation des perturbations, étude des couplages, l'étude des appareillages et de leurs niveaux de perturbations. [2]

La prise en compte des phénomènes électromagnétiques se fait depuis forte longtemps: il existe des règles de câblage, filtrage, blindage. Ces règles ont été élaborées par les constructeurs soucieux de garantir le bon fonctionnement de leurs produits. Cependant, la *CEM* a subi un essor considérable depuis que la multiplication des appareils électriques et l'augmentation des puissances mises en jeu ont amené la mise en place d'une nécessaire réglementation. [2]

Les redresseurs sont des convertisseurs statiques alternatifs-continus, permettant de générer une source de tension alternative variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, résistance et d'interrupteurs statiques. Ils consomment moins de puissance. C'est pour cette raison que les redresseurs ont de très bons rendements. [4]

Notre travail s'articule autour de la problématique et plus particulièrement sur les perturbations électromagnétiques conduites dans les Redresseurs.

Outre, l'introduction générale, ce mémoire est organisé en trois principaux chapitres :

✓ Le premier chapitre est une présentation générale des aspects fondamentaux de la compatibilité électromagnétique. Nous définissons la *CEM* ainsi les objectifs, les Niveaux de compatibilité et les niveaux au industriels, Notion d'émissivité/susceptibilité, les perturbations électromagnétiques et leurs différents types, Les techniques de protection, les normes et les conséquences de la *CEM*, les études sur les couplages et leur conclusion.

✓ Le deuxième chapitre porte sur les généralités des convertisseurs statiques : c'est l'étude des différents types des convertisseurs statiques, et rappel sur les différents types de composants semi-conducteurs, ainsi la modélisation des redresseurs et leurs perturbations électromagnétiques causées au niveau de leur environnement électrique.

✓ Le troisième chapitre concerne la simulation avec le logiciel LTspice, qui étudie les perturbations électromagnétiques d'un modèle équivalent des convertisseurs statique.

Enfin, nous concluons ce mémoire par une conclusion générale sous forme de synthèse globale sur les différents travaux effectués et des perspectives.



Chapitre I

Généralité sur la Compatibilité
Électromagnétique

Chapitre I : Généralité sur la Compatibilité Électromagnétique

I. Introduction :

Depuis le 19^{ème} siècle, les différentes découvertes technologiques, telles que l'électricité et l'électronique ont permis d'entrer dans une nouvelle ère grâce à l'apparition et le développement de multiples applications, qui sont aujourd'hui, indispensables pour notre quotidien [5].

On peut ainsi parler d'équipements électronique de puissance, dont la diffusion rapide et diversifiée de ces équipements dans le domaine professionnel et militaire (équipements embarqués, variateur de vitesse, chauffage, contrôle de l'énergie...), et aussi en grand public (domestique, automobile, ordinateurs,...) qui multiplie les sources de perturbations électromagnétiques. Ces perturbations parfois très contraignantes, ont conduit les ingénieurs de recherches vers un vaste domaine communément appelé «compatibilité électromagnétique» [6].

I.1. Historique :

On pourrait faire remonter la compatibilité électromagnétique au tout début des transmissions radio.

- En 1901 : Marconi réalise la première transmission à travers l'atlantique, il constatait la présence d'interférences, liées aux fréquences d'émission. pour résoudre ce problème il fallait changer de fréquence. [7]

- En 1933: Création du CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radio électriques) par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) qui développe des normes pour éviter les interférences [8].

- Durant la deuxième guerre mondiale, l'utilisation d'appareils électroniques (radio, navigation, radar) s'est accélérée. Beaucoup de cas d'interférences entre radios et systèmes de navigation aérienne sont constatés [8].

- 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 afin de subvenir aux besoins de plus en plus croissants de transmission d'informations [8].

- Due à la sensibilité de plus en plus accrue des circuits électroniques, l'American Federal 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 [8].

I.2. Définition de la CEM:

La compatibilité électromagnétique (CEM ou EMC (en anglais)) c'est une science et technique qui permet de lutter contre les perturbations électromagnétiques.

Elle est définie comme étude des couplages, c'est à dire les effets entre différents matériaux (circuits électriques, appareillages..).

Ces couplages sont toujours bidirectionnels : un matériel pollueur est source de perturbations agit sur un équipement sensible dit « victime », ce dernier peut aussi jouer le rôle de source pour perturber son propre environnement. [9]

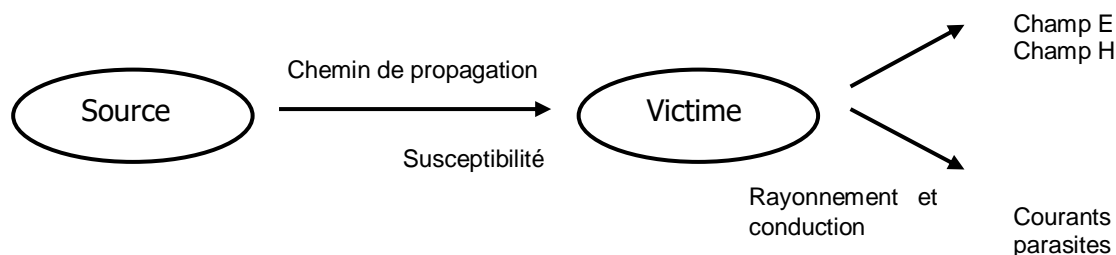


Figure I.1 : Compatibilité Electromagnétique [10]

Un système « électro-magnétiquement compatible » respecte les 3 critères suivants :

- Il ne produit aucune interférence avec d'autres systèmes,
- Il n'est pas susceptible aux émissions d'autres systèmes,
- Il ne produit aucune interférence avec lui-même. [11]

I.3. Aspects fondamentaux de la CEM :

Lors de l'analyse d'un problème de perturbation électromagnétique on constate que la problématique de la CEM peut se résumer à une trilogie (figure I.2) dont les trois acteurs sont :

- La source de perturbation : qui émet les perturbations électromagnétique.
- Le mode de couplage : au travers duquel l'énergie de ces perturbations se propage.
- La victime : capte cette énergie, la traite et la superpose à sa fonction normale.

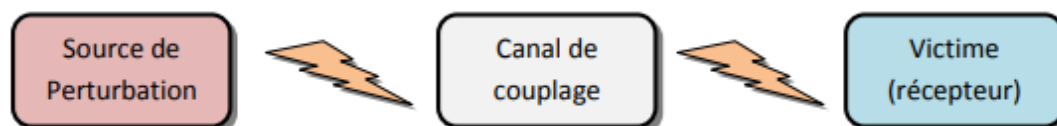


Figure I.2 : Transmission des perturbations [7]

I.4. Norme de CEM :

La directive CEM, définit les principes généraux. C'est les organismes normalisateurs qui s'occupent de la normalisation et préparent les normes. Les principaux organismes normalisateurs sont : [12]

CISPR : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale à Genève.

CENELEC : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique à Bruxelles, Les références des documents commencent par les lettres EN, ENV, HD...

UTE : Union Technique de l'Électricité en France,

Il existe trois types de normes CEM :

I.4.1. Les normes fondamentales :

Elles donnent les règles et les conditions générales pour réaliser la CEM et servent de référence pour les comités de réglementation. Elles concernent : [12]

- La terminologie
- La description des phénomènes électromagnétiques.
- Les niveaux de compatibilité : limites d'émission.
- Les spécifications générales de niveaux d'immunité.
- Les techniques de mesures et d'essais.

Pour les essais d'immunité, les normes fondamentales décrivent les méthodes d'essai, elles sont des normes ouvertes (elles proposent plusieurs niveaux d'essais préférentiels) ne prescrivent pas de limites mais proposent une série de critères d'acceptabilité : [1]

- Comportement normal dans la limite de la spécification ;
- Dégradation temporaire ou perte de fonction ou de comportement auto récupérable ;
- Dégradation temporaire ou perte de fonction ou comportement nécessitant l'intervention d'un opérateur ou la remise à zéro du système ;
- Dégradation ou perte de fonction non récupérable du fait d'une avarie de matériel (composants) ou du logiciel ou encore de pertes de données.

I.4.2. Les normes génériques :

Elles concernent un environnement particulier, elles spécifient un ensemble de prescriptions essentielles, de procédures d'essais et de critères de performance généraux applicables à tous les produits ou systèmes en service dans cet environnement [12]. Pour les méthodes d'essai et les mesures détaillées, les normes génériques se réfèrent aux normes fondamentales. Les normes génériques incluent les prescriptions et essais concernant : [13]

- l'émission en se référant en basse fréquence aux normes CEI 77A (série 61000-3-xx) et en haute fréquence au CISPR ;
- l'immunité, incluant un nombre limité de perturbations et un nombre minimum de niveaux d'essais et de critères d'acceptation afin d'assurer qu'une immunité adéquate est obtenue par un optimum technico-économique.

Actuellement, les deux environnements concernés sont l'environnement domestique, commercial et industrie légère d'une part et l'environnement industriel d'autre part. [13]

Ces normes sont aux nombres de quatre décrivant séparément l'immunité et les émissions pour deux catégories d'équipement :

CEI 61000-6-1 : Immunité pour les environnements résidentiels et l'industrie légère.

CEI 61000-6-2 : Immunité pour les environnements industriels.

CEI 61000-6-3 : Émission pour les environnements résidentiels et l'industriel léger.

CEI 61000-6-4 : Émission pour les environnements industriels [14].

I.4.3. Les normes de familles de produits :

Elles contiennent des prescriptions et des méthodes d'essai spécifiques à une famille de produits particulière.

Une famille de produits est un groupe de produits, systèmes ou installations similaires pour lequel on applique les mêmes normes. Ces normes indiquent les conditions d'installation et de fonctionnement appropriées en donnant les critères d'acceptation précis en fonction du matériel considéré. Elles doivent utiliser les normes fondamentales en y faisant référence pour les méthodes d'essais et les mesures détaillées et être coordonnées avec les normes génériques. Les normes de familles de produits ont précedence sur les normes génériques mais les normes génériques s'appliquent si le matériel considéré n'est couvert par aucune norme de famille de produits. [15]

I.5. Objectif de la CEM :

- Réduire les perturbations aux niveaux des sources
- Protéger les victimes et les équipements électroniques contre ces perturbations
- Réduit les chemins des couplages (perturbateur)
- Protéger des personnes contre les contacts indirects
- Former des spécialistes dans la CEM
- Réduire les risques liés aux champs électromagnétiques [16]

I.6. Règle de base de la CEM:

➤ Un appareil électrique ou électronique ne doit pas perturber un autre appareil électrique ou électronique qu'il soit exploité et utilisé correctement ou également, si c'est possible, en cas d'usage incorrect ou de dérèglement prévisible.

➤ Un appareil électrique ou électronique doit présenter un niveau approprié de résistance aux perturbations électromagnétiques extérieures.

➤ Les appareils électriques ou électroniques commercialisés en Europe doivent être conformes aux normes de la communauté européenne (CE) incluant la conformité aux exigences de Compatibilité Electromagnétique les concernant. Ils doivent faire l'objet du Marquage CE qui responsabilise le fabricant et les distributeurs quant à cette conformité.

➤ En ce sens, les appareils électriques ou électroniques commercialisés en Europe doivent pouvoir subir avec succès les mesures et essais normalisés (par exemple la norme CISPR : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques 22/EN5522) [1].

I.7. Niveaux de compatibilité :

Pour assurer la CEM, différents niveaux et différentes marges ont été définis :

❖ Niveau de susceptibilité : il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.

❖ Niveau d'immunité : c'est le niveau d'une perturbation supportée par un matériel ou 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 le niveau maximal d'émission de perturbation que ne doit pas dépasser un matériel.
- ❖ Marge d'immunité : 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 de limite d'émission. [16]

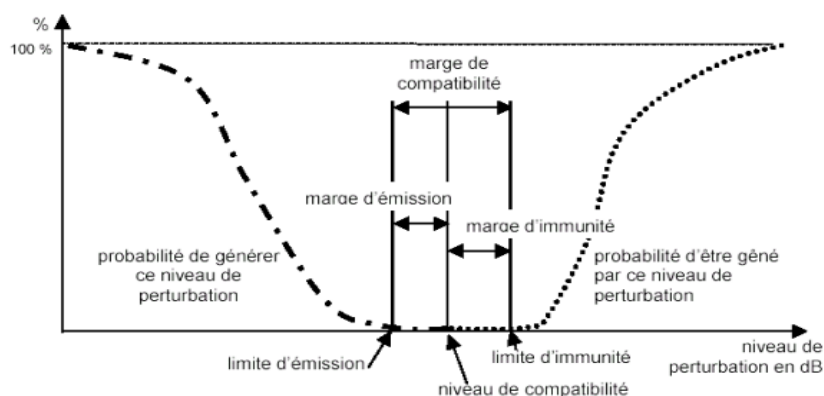


Figure I.3 : Niveaux de perturbation en CEM [17]

I.8. CEM au niveau industriel :

Il est recommandé de se préoccuper d'assurer la compatibilité électromagnétique dès le stade de la conception d'une installation. C'est la meilleure assurance contre les dysfonctionnements et la dérive des coûts (Fig. I.4) pour tout produit : [18]

- ✓ qui risque de se trouver dans un environnement perturbé.
- ✓ qui est particulièrement sensible.

On estime que si la CEM est prise en considération :

- ✓ à la conception \Rightarrow coût majoré de 5%.
- ✓ après la construction du prototype \Rightarrow coût majoré de 50%.
- ✓ quand le produit est sur le marché \Rightarrow coût majoré de 100% [19].

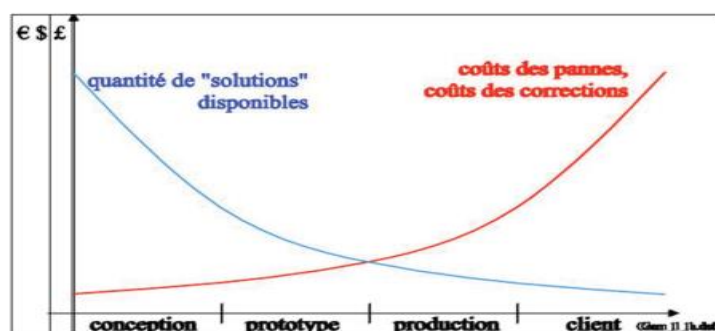


Figure I.4 : Développement du produit en fonction de l'échelle du temps [19].

I.9. Notion d'émissivité/susceptibilité

❖ Emissivité (émission) : ce terme est employé pour évaluer le pouvoir perturbateur d'un appareil.

Les perturbations générées par un appareil peuvent être :

- Perturbations conduites (câbles, supports, ...)
- Perturbations rayonnées (sous forme d'onde électromagnétique).

❖ Immunité : c'est l'aptitude d'un appareil ou dispositif électronique à ne pas être perturbé par l'extérieur (son environnement).

L'immunité doit être contre :

- Les perturbations conduites
- Les perturbations rayonnées

❖ Susceptibilité : C'est la capacité d'un dispositif d'être perturbé par l'extérieur.

Le niveau de compatibilité ne doit pas être considéré comme un niveau de perturbation défini, mais comme une valeur de référence conventionnelle, sur laquelle on se basera pour la coordination entre le niveau de perturbation et le niveau d'immunité (essais).

La Figure I.5 signifie que le niveau d'immunité de chaque appareil est tel qu'il n'est pas perturbé par son environnement électromagnétique. Son niveau d'émission de perturbation doit être suffisamment bas pour ne pas perturber les appareils qui se trouvent dans son environnement électromagnétique. [20]

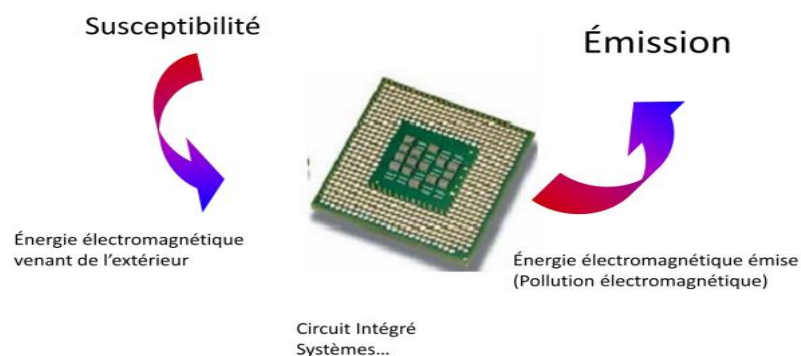


Figure I.5 : Acteurs de la CEM [20]

I.10. Définition d'un Perturbation électromagnétique :

- On appelle par perturbation électromagnétique (PEM), tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, équipement ou système...

- Elles sont le résultat de tous les courants et tensions électriques.
- Elle peut être un bruit électromagnétique. [16]

I.10.1. Fondements de la perturbation électromagnétique (PEM) :

Basée sur le transfert d'énergie électromagnétique, la pollution électromagnétique est généralement classée en quatre sous-groupes : les émissions conduites, les émissions rayonnées, la susceptibilité conduite et la susceptibilité rayonnée. Ces éléments sont répertoriés à la figure I-6.

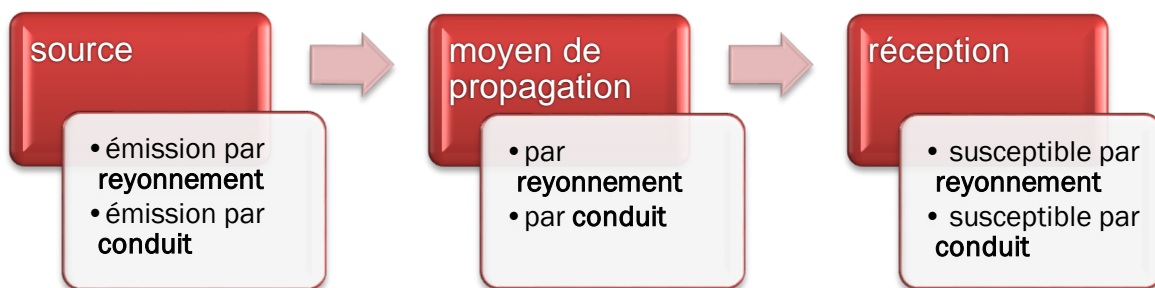


Figure I.6 : Eléments essentiels dans le couplage électromagnétique. [21]

Il y a trois éléments essentiels dans le problème EM: la source, les chemins de propagation et la victime. La source génère les émissions et l'énergie d'émission est transférée à travers les chemins de propagation vers la victime. [22]

I.10.2. Les émissions conduites :

Si la source et la victime sont voisins avec liaison galvanique (lignes d'alimentation, bus de transmission de données, câbles de masses, terre, capacités parasites, ...), Le couplage dit proche et il peut être de nature « capacitive, inductive ou résistive ». [16]

Ces PEM se propagent vers la source d'énergie et vers la charge par l'intermédiaire des câbles et des lignes d'alimentation selon deux modes :

- ✓ Mode différentiel
- ✓ Mode commun

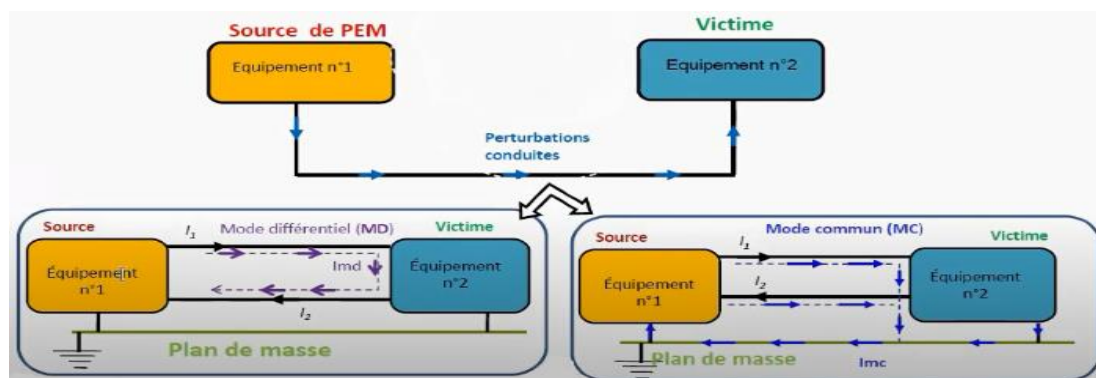


Figure I.7 : les perturbations (émissions) conduites [16].

I.10.2.1. Mode commun :

La propagation s'effectue en mode commun lorsque la perturbation est transmise à l'ensemble des conducteurs actifs. Le courant de mode commun se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse à travers des capacités parasites.

Ces courants peuvent être induits par un champ externe dans la boucle formée par le câble, le plan de terre et les impédances de connexion des équipements et la terre. [16]

I.10.2.2. Mode différentiel :

La propagation s'effectue en mode différentiel lorsque la perturbation est transmise à un seul des conducteurs actifs.

Le courant de mode différentiel se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers l'équipement et revient par un autre conducteur.

I.10.3. Les émissions en rayonnées :

Si la source et la victime sont éloignées avec liaison galvanique, la perturbation est transmise par : « champ électrique, champ magnétique ou onde électromagnétique » [16]

Ensuite, ces perturbations se couplent par conduction dans les composants et les circuits adjacents. Pour ce mode de couplage, il est nécessaire de différencier le rayonnement en **champ proche** et celui en **champ lointain** [22].

Quand la source se trouve dans une zone lointaine de la victime, le couplage se fait par rayonnement et nous parlons d'un couplage « **champ à fil** » ou un couplage « **champ à boucle** ».

Cependant quand la source se trouve dans une zone proche de la victime le couplage se fait par diaphonie qui peut être de nature capacitive ou inductive. Ce champ rayonné est constitué de deux composantes, un champ magnétique H et un champ électrique E qui échangent de l'énergie et se régénèrent l'un à l'autre dans leur propagation à travers l'espace [23].

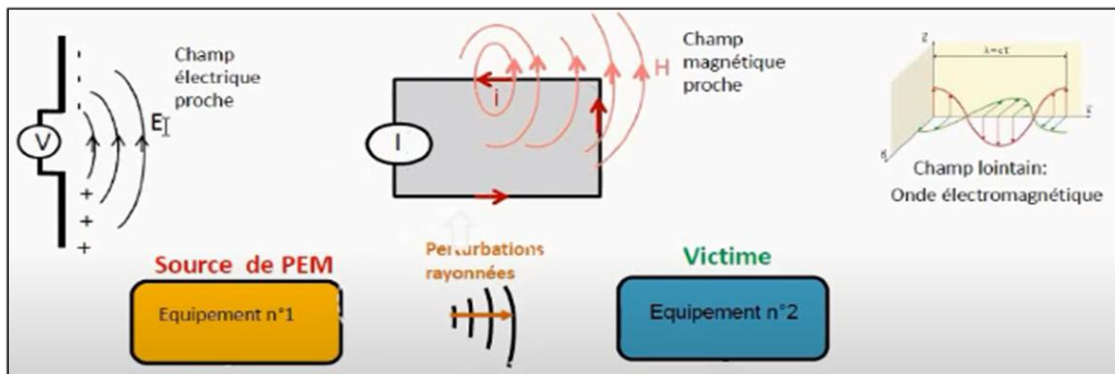


Figure I.8: les perturbations (émissions) rayonnées [16].

⌘ **Couplage champ à fil** : la variation d'un champ électrique incident sur un fil crée un courant dans le conducteur.

⌘ **Couplage champ à boucle** : la variation d'un champ magnétique embrassant une boucle crée une différence de potentiel aux bornes de celle-ci

⌘ **Champ proche** : Le champ dit proche où les deux champs sont faiblement liés : un des champs et plus important que l'autres.

⌘ **Champ lointain** : Le champ dit lointain où l'onde électromagnétique est plan : les des champs sont fortement liées.

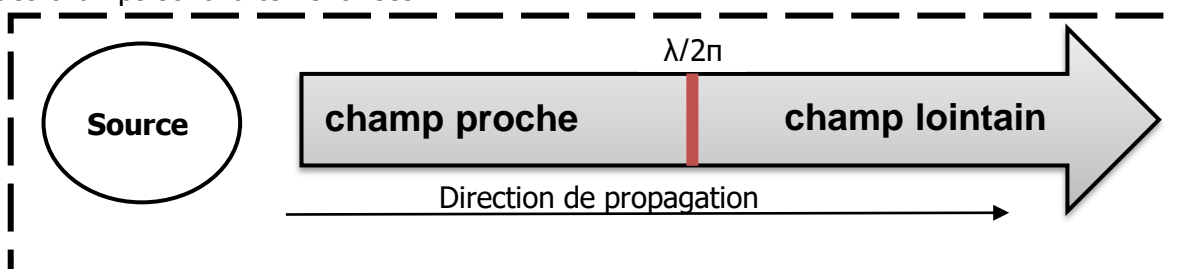


Figure I.9 : Direction de propagation [16]

La distance à partir de laquelle l'onde devient plane vaut $\lambda/2\pi$; avec λ longueur d'onde.

- Si la distance entre PEM et la victime inférieure de $\lambda/2\pi$ le champ dit proche.
- Si la distance entre PEM et la victime supérieure de $\lambda/2\pi$ le champ dit lointain.

I.11. Différents types des perturbations électromagnétiques :

I.11.1. Les harmoniques :

Les harmoniques sont des sources perturbatrices possédant des fréquences multiples que celle de la composante fondamentale.

Les tensions et les courants harmoniques touchent les appareils et les équipements utilisés. [24]

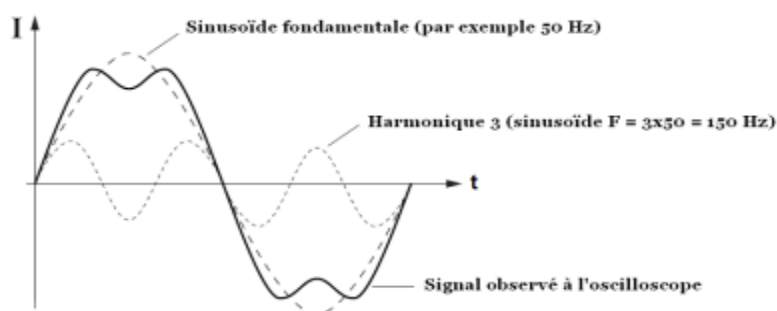


Figure 1.10: Décomposition d'un signal perturbé [12]

I.11.2. Les champs magnétiques et électromagnétiques

Tout conducteur traversé par un courant électrique rayonne un champ magnétique H. Si un conducteur électrique formant une boucle (fermé-ouvert) est traversé par le champ magnétique H, toute Transformation de H va induire une f.é.m. dans la boucle entraînant la circulation d'un courant de perturbation dans le circuit si cette boucle est fermée.

La perturbation est proportionnelle à la surface de boucle et à la variation. Elle devient importante pour des phénomènes transitoires rapides ainsi que lorsque la surface de boucle est importante. [25]

On a vu que les perturbations électromagnétique sont des ondes électromagnétique.

Le champ électromagnétique est la composition du champ électrique et du champ magnétique. [26]

I.11.2.1. Le champ électrique

Un corps électriquement chargé est entouré d'un champ électrique, par exemple un point P au Voisinage d'une sphère conductrice isolé portant une charge Q, le champ électrique vaut :

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{\mathbf{r}} \quad (\text{I.1})$$

Ou r est la distance entre le centre de la sphère et P, $\hat{\mathbf{r}}$ est le vecteur unitaire orienté vers l'extérieur et la constante $\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} C^2 . N^{-1} . m^{-2}$ est la permittivité du vide.

I.11.2.2. Le champ magnétique :

En fait, tous les champs magnétiques sont produits indirectement en déplaçant les charges Électriques.

C'est un fait fondamental de nature que les électrons mobiles, aussi bien que toutes les autres charges, produisent un champ magnétique quand ils sont en mouvement. Les courants Électriques en fils produisent également des champs magnétiques parce qu'un courant est Fondamentalement le mouvement collectif d'un grand nombre d'électrons. Un courant continu Circulant dans un fil produit un champ magnétique qui l'encercler

Une charge simple se déplaçant à une vitesse constante produit également un champ Magnétique tubulaire qui encercle la charge. [26]

I.11.2.3. Le champ électromagnétique :

L'onde électromagnétique est constituée de la superposition de champs électriques et du Champ magnétique comme le montre la Figure I.11 et qui se déplace dans le vide à la vitesse de Lumière $c = 3 * 10^8 \text{m/s}$ [26]

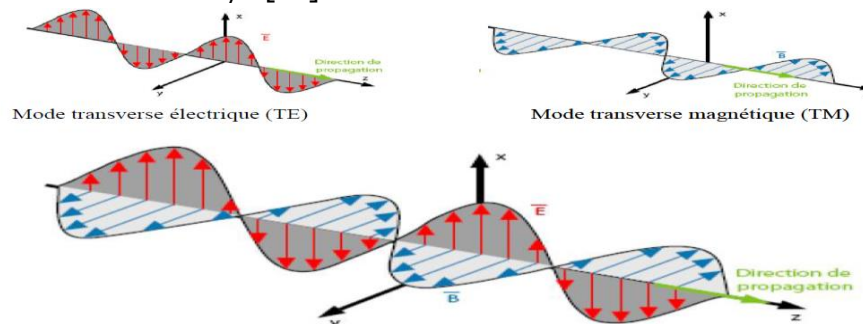


Figure I.11: Le champ électromagnétique [26]

I.11.3. Fluctuations de tension :

- Il s'agit de variations qui restent dans la limite de $\pm 10\%$.
- Elles sont provoquées essentiellement par toutes les machines à fort courant d'appel
- Les conséquences de ces variations restent faibles.

La tension ne variant que dans la limite des $\pm 10\%$. Cependant sur certains récepteurs, comme l'éclairage, cela peut provoquer du Flicker (scintillement ou clignotement). (Voir Figure I.12) [26]

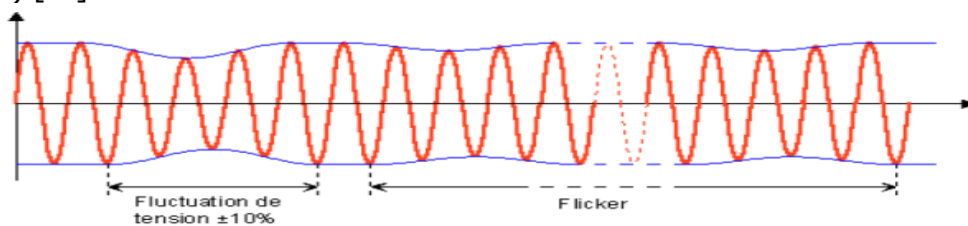


Figure I.12: Fluctuation de tension et Flicker [27]

I.11.4. Creux de tension et coupure brèves

IL s'agit d'une diminution de la tension comprise entre 10% et 100%, pendant une durée allant de 10 ms (une demi-période) à 1 mm.

Elles sont provoquées par la mise sous tension de gros récepteurs (20In), de condensateurs, par la proximité d'un court –circuit voisin, par la coupure associée au ré enclenchement automatique d'un dispositif de protection. Les conséquences vont du décrochage des moteurs asynchrones, à l'initialisation des systèmes automatiques voir la perte de l'alimentation. [26]

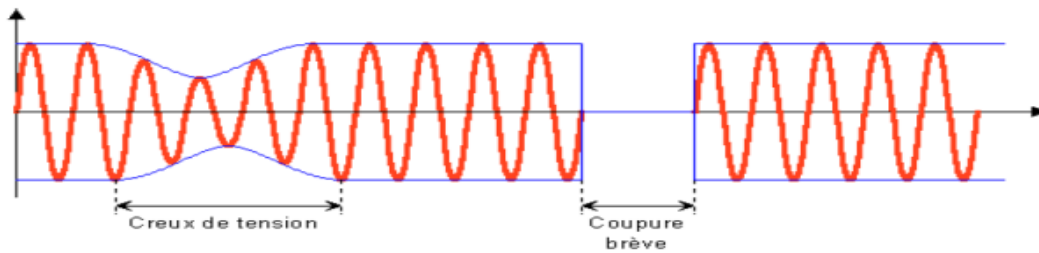


Figure I.13: Creux de tension et coupure brève [27]

I.11.5. Surtensions et coup de foudre :

Ce sont des perturbations impulsionnelles de forte amplitude. Leur origine peut être naturelle dans le cas du choc de foudre, ou industrielle lors de la coupure de circuits inductifs ou de la manœuvre d'appareillage de connexion en HT.

Dans le cas des surtensions de manœuvre, les conséquences sont peu nombreuses pour le matériel électrotechnique, mais elles peuvent entraîner la destruction du matériel électronique si celui-ci n'est pas protégé.

Les chocs de foudre sont eux des perturbations brusques et très importantes [26]

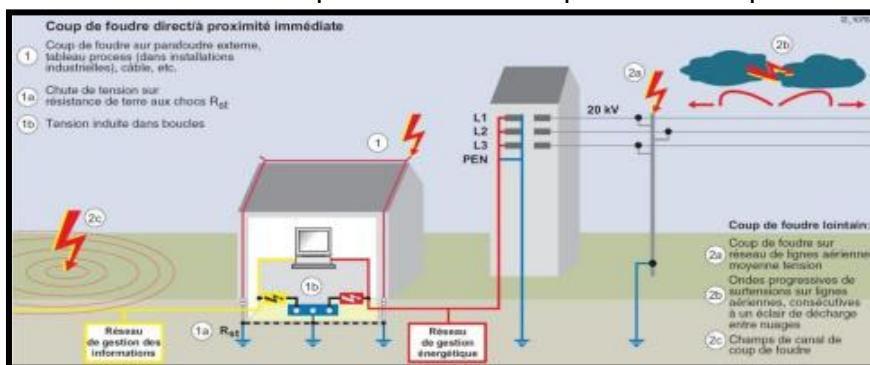


Figure I.14: Surtensions et coup de foudre [27].

I.11.6. Décharges électrostatiques

- Elles sont caractérisées par un très faible temps de montée de l'impulsion (1ns) mais avec une décharge de 60ns, une tension très élevée (2a 15KV) et un très large Spectre (jusqu'à 1GHz).

- Elles surviennent lorsqu'un élément a emmagasiné une charge électrostatique et se décharge brusquement en entrant en contact avec un autre élément relié à la ou présentant une différence de potentiel.

- Les conséquences des décharges électrostatiques sont le plus souvent liées au Claquage diélectrique de composants. Ce type de perturbation est une préoccupation importante des fabricants de matériel car le révèle que lors de la mise en service du matériel.

La figure ci-dessous présente Décharge Electrostatique avec une impulsion de 1n (Figure I.15). [26]

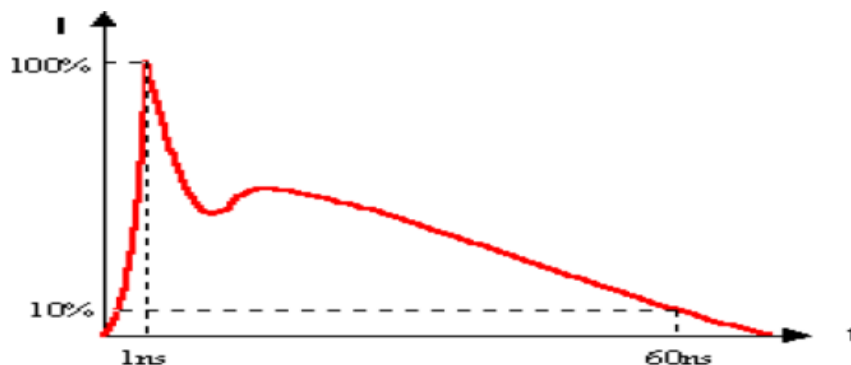


Figure I.15 : Décharge Electrostatique avec une impulsion de 1ns [27]

I.11.7. Variation de fréquence :

Les variations de fréquences qui sont essentiellement provoquées par le couplage des groupes électrogènes sont probablement les plus rares des perturbations. Elles entraînent la perte de synchronisation des matériels qui utilisent la fréquence du secteur comme horloge [26].

I.11.8. Signaux transmis sur le réseau :

C'est essentiellement la transmission de courants porteurs utilisés par :

- Les distributeurs d'énergie pour véhiculer les ordres tarifaires,
- Les composants de commande à distance (CAD),
- Les systèmes de communication interne de type interphone sur 12 le réseau,

Tous ces signaux peuvent perturber certains composants très sensibles notamment aux harmoniques. [26]

I.11.9. Déséquilibre de phases :

Si la puissance des charges monophasées est mal répartie, il y'a un risque de Déséquilibre de tension entre les phases. Ce déséquilibre engendre des composantes Inverses de courant qui provoquent des couples de freinage et échauffement dans les moteurs à courant alternatif [18] [28]

I.12. Etude des couplages électromagnétiques :

Les couplages sont des chemins de propagation par les quels les sources de perturbations entrent en contact avec les équipements victimes. Il existe principalement six modes de couplage, deux en mode conduit et quatre en mode rayonné (deux en champ proche et deux en champ lointain) [1].

Les couplages entre les éléments du circuit sont les suivants :

I.12.1. Le couplage par impédance commune :

Tout conducteur possède une impédance non nulle. Ainsi, tout courant (utile ou parasite) circulant dans le conducteur génère une tension entre ses extrémités. Ceci est particulièrement critique pour les circuits à bas niveau ou rapide (avec peu ou pas d'effet de filtrage en HF). [12]

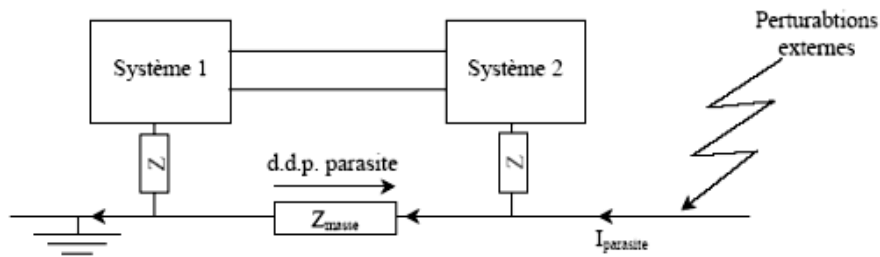


Figure I.13 : couplage par impédance commune [10]

I.12.2. Couplage capacitif carte à châssis :

Ce couplage est dû aux condensateurs existants entre les différents conducteurs et le plan de masse. La variation du potentiel dans les conducteurs crée donc un courant de déplacement des conducteurs vers le plan de masse. [29]

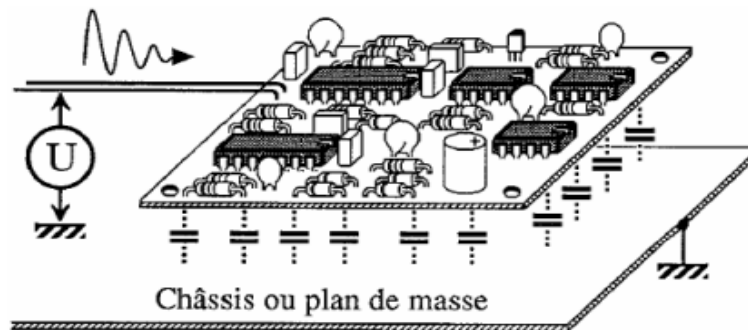


Figure I.14 : le couplage capacitif carte à châssis [30]

I.12.3. Couplage par diaphonie inductive:

Le courant circulant dans un fil crée un champ magnétique. La variation du flux magnétique dans la boucle y induit une tension (Figure I.15). [12]

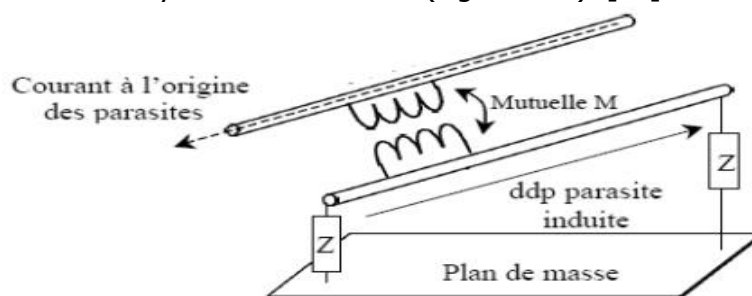


Figure I.15 : diaphonie inductive [10]

I.12.4. Couplage par diaphonie capacitive :

La différence de potentiel entre un conducteur et son environnement génère autour de ce conducteur un champ électrique. La variation de ce champ crée un courant injecté dans les conducteurs proches. [29]

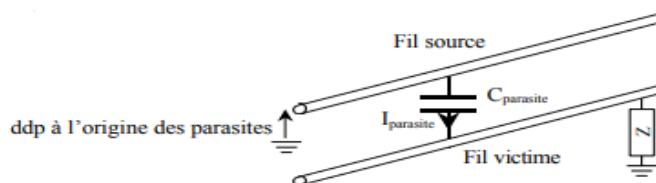


Figure I.16 : diaphonie capacitive [10]

Les couplages entre le circuit et son environnement sont les suivants:

- **Couplage champ à fil :**

La variation d'un champ électrique incident sur un fil crée un courant dans le conducteur (Figure I. 21). Ce phénomène est appelé couplage champ à fil ou champ à câble. [30]

Ce phénomène physique est utilisé par les antennes d'automobiles pour convertir le champ radioélectrique en courant électrique conduit. Un champ électrique qui éclaire un conducteur y déplace un courant. La cause est un champ électrique variable, l'effet un courant induit. [15]

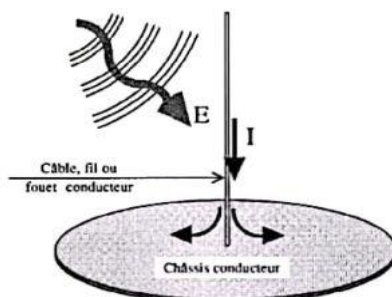


Figure I.17:couplage champ à fil [12]

I.12.5. Couplage du champ à boucle :

La variation d'un champ magnétique embrassant une boucle crée une tension, dite force contre-électromotrice. Ce phénomène est appelé couplage champ à boucle (Figure I.22).

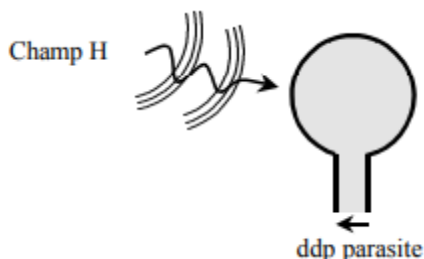


Figure I.18 : couplage champ à boucle [10]

La connaissance de ces couplages est nécessaire pour pouvoir déterminer et contrôler les perturbations dans le circuit. Cependant, il est très difficile de quantifier ou de prévoir ces couplages sans l'aide d'outils numériques très performants [20].

I.13. Problèmes de base de la C.E.M:

La constatation que le couplage des perturbations peut se faire tant directement par rayonnement que par conduction dans les câbles, et d'autre part que tout équipement peut

être, selon les circonstances, émetteur ou récepteur (victime) des perturbations conduit à décomposer les essais et analyses en quatre catégories, que l'on trouve dans les normes de compatibilité [30]. Le transfert de l'énergie électromagnétique peut être schématisé en :

- ✓ Emission rayonnement : mesure des champs E.M rayonnés par l'équipement sous test.



Figure I.19: Emission par rayonnement [31]

- ✓ Emissions conduites par l'équipement : mesure de la perturbation injectée dans le réseau.



Figure I.20 : Emission conduite par l'équipement [31]

- ✓ Susceptibilité aux rayonnements : capacité de fonctionner en présence de champs E.M donnés.

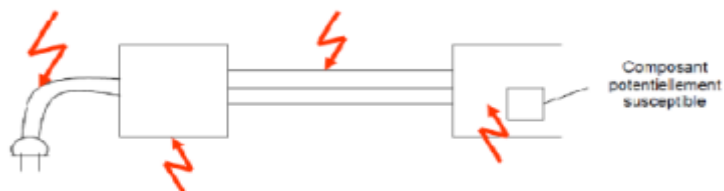


Figure I.21 : Susceptibilité aux rayonnements [31]

- ✓ Susceptibilité conduite : capacité de fonctionner en présence de perturbation conduites (réseau ou câble de données).



Figure I.22 : Susceptibilité conduite. [31]

Les câbles d'alimentation et d'interconnexion ont le potentiel d'émettre ou de capter l'énergie électromagnétique. Les signaux perturbateurs peuvent également passer directement entre différentes parties du système par conduction directe.

Des émissions électromagnétiques peuvent être également engendrées par une composante électronique dans une enceinte non métallique (Fig. I-19).

Les problèmes d'émission ou de susceptibilité interviennent également lorsque les signaux perturbateurs circulent par conduction le long des conducteurs (Fig. I-20 et Fig. I-22).

Pour bloquer la transmission de ce type de perturbation, on utilise généralement des filtres.

Il est enfin important de réaliser que les problèmes d'interférences vont au-delà des schémas des Fig. I-19 à Fig. I-22 et souvent, on est en présence d'au moins deux des quatre catégories illustrées. [31][18]

I.14. Conséquences de la CEM :

I.14.1. Conséquences pour les constructeurs :

Les fabricants de matériel ont été les premiers à être concernés par la C.E.M. Depuis le 1er janvier 1996 seuls les produits conformes à la réglementation en vigueur sur la C.E.M. et portant le marquage CE peuvent être commercialisés en France et dans l'Union Européenne.

La conformité aux exigences de la directive européenne peut se faire selon les articles suivants : (Fig. I.23)

- ⌘ **art. 10.1** : application totale des normes harmonisées
 - ⌘ **art. 10.2** : application partielle des normes harmonisées
 - ⌘ **art. 10.5** : article concernant uniquement les appareils de radiocommunications
- [25]

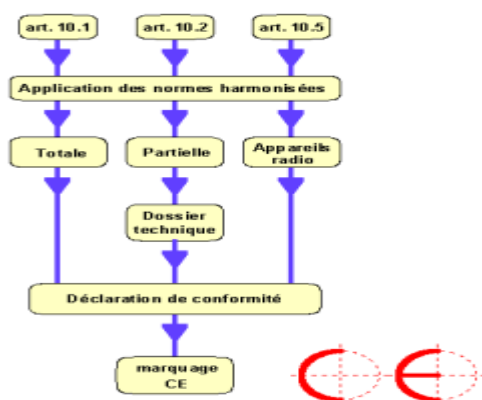


Figure I.23 : Déclaration de conformité [25]

I.14.2. Conséquences pour les installateurs :

Si le choix d'un matériel conforme aux normes CEM est important, les conditions d'installation de ce matériel ne le sont pas moins. Le respect des normes d'installation, notamment la norme NF C 15-100, permet de maîtriser les effets des perturbations et d'assurer la compatibilité électromagnétique.

Aujourd'hui, l'application des règles de l'art classiques n'est plus suffisante en raison de la multiplication des circuits à bas niveau d'énergie. La CEM implique de nouvelles connaissances, de nouvelles règles et de nouvelles précautions d'installation. Toutes ces nouveautés sont à prendre en compte notamment pour :

- les câbles de liaison courant faible,
- le cheminement des câbles de puissance et de courants faibles,
- le positionnement des appareils,
- le maillage des réseaux de masse et de terre.

Il est également important de s'assurer que toutes ces règles persistent lors de l'installation ne soient pas détériorées lors d'une intervention après vente. Il est donc nécessaire de sensibiliser les responsables de maintenance et d'exploitation des dispositions visant à assurer la CEM. [7][25]

I.15. TECHNIQUES DE PROTECTION EN CEM :

L'amélioration de la compatibilité électromagnétique agit du côté des sources en tentant de réduire les perturbations qu'elles émettent, et du côté des victimes en les protégeant des influences extérieures. Nous avons vu qu'une source de perturbations atteignait sa victime par le biais d'un couplage. C'est à ce niveau qu'il faut agir. Afin de protéger un équipement contre les perturbations conduites et rayonnées, nous utilisons respectivement le filtrage et le blindage ÉM [32].

I.15.1. Blindage :

Un blindage ou un écran électromagnétique (Fig. I.24) 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 : contenir les émissions rayonnées à l'intérieur de l'enceinte blindée et exclure les émissions rayonnées de sources se trouvant à l'extérieur de l'enceinte [33].

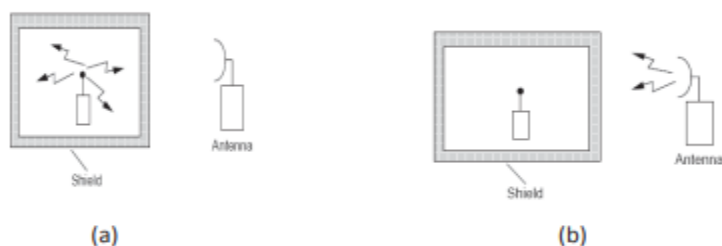


Figure I.24 : Blindage ou écran électromagnétique [33]

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

I.15.2. Filtrage :

Les filtres travaillent soit par absorption, soit par désadaptation, la perte d'insertion d'un filtre à faible absorption (composé uniquement de condensateurs et d'inductance à faibles pertes) ne dépend que de la désadaptation d'impédance qu'il introduit dans le circuit.

Pour une forte réflexion, un filtre doit présenter une impédance très différente de celle du circuit.

Pour une grande perte d'insertion, un filtre installé sur un circuit à faible impédance doit présenter une forte impédance. Inversement un filtre installé sur un circuit à haute impédance doit présenter une basse impédance. [32]

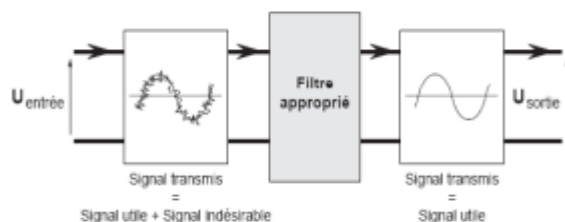


Figure I.25 : Filtrage des perturbations [33].

I.15.3. Ferrites :

Les filtres passe-bas sont les plus utilisés en CEM. Tous les filtres d'alimentation et la plupart de ceux d'entrée-sortie sont de type passe-bas. Le filtre le plus simple est composé d'un condensateur. L'efficacité d'un condensateur s'améliore en ajoutant une résistance en série à la ligne. De simples filtres RC peuvent être utilisés sur les entrées signaux.

Des filtres inductifs tels que les ferrites sont très efficaces car ils présentent en HF une importante composante résistive amortissant ainsi les résonances. Ils peuvent, de plus, être montés sur les câbles [32]



Figure I.26 : Les ferrites [32]

Des filtres plus complexes intégrant des selfs et des condensateurs tels les filtres en «T», c'est-à-dire L-C-L ou en «π», c'est-à-dire C-L-C, permettent une coupure plus raide.

Les filtres secteurs les plus courants filtrent le mode commun (MC) et le mode différentiel (MD) dans le même boîtier.

I.15.1. 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 (Fig. I.32).

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) [18].

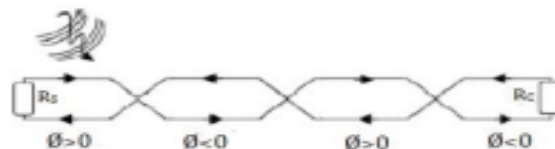


Figure I.27 : Diminution du champ magnétique par le principe de torsadage [18].

I.16. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de généraliser la compatibilité électromagnétique et avoir expliqué le phénomène selon les trois parties suivantes :

✓ Dans un premier temps, nous avons défini que le problème de la Compatibilité électromagnétique CEM était un phénomène très courant, et même parfois très gênant dans certains cas et avoir étudié comment ont été créées ces perturbations et comment les éviter au maximum, tout en restant assez général sur le sujet.

✓ Alors que dans un second temps, nous avons traité l'aspect fondamental de la CEM, le vecteur de propagation et leurs différents modes de transmission.

✓ Dans un troisième temps, nous nous sommes attachés à présenter les essais effectués dans la CEM, les techniques de protection et les normes.

Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse et la modélisation des convertisseurs Statiques AC/DC (Redresseurs).



Chapitre II

Modélisation des convertisseurs
AC/DC

Chapitre II : Modélisation des Convertisseurs AC/DC

II.Introduction :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée) [34]

Les convertisseurs statiques de part leur fonctionnement sont de puissantes sources de perturbation. L'étude des perturbations créées par les dispositifs d'électronique de puissance est récente mais nécessaire compte tenu d'une part de la vitesse de commutation élevée des interrupteurs statiques (elles proviennent principalement de l'ouverture et/ou de la fermeture des interrupteurs) ainsi que leur fréquence de commutation, et d'autre part l'accroissement rapide des dispositifs électriques intégrant une électronique de puissance (variation de vitesse, éclairage chauffage, automobile, etc...). Les convertisseurs statiques génèrent des perturbations conduites et rayonnées. [35]

L'utilisation de ces convertisseurs de puissance pour des différentes applications devient de plus en plus importante. Les domaines sont principalement les applications domestiques (téléphone mobile, ordinateurs, électroménager), l'industrie automobile (avec l'apparition de véhicules hybrides et électriques), l'aéronautique (l'avion électrique), le domaine ferroviaire, les énergies renouvelables (panneaux solaires photovoltaïques, éoliennes), les réseaux de transport d'énergie électrique (la liaison à courant continu), etc. [3]

Dans ce chapitre on présentera les notions générales des différents convertisseurs statiques utilisés et l'origine et les chemins de propagation des perturbations électromagnétiques dans une structure de convertisseurs statiques. Par la suite, On présentera le principe de fonctionnement des convertisseurs statiques AC-DC à commutation forcée monophasé et triphasé et leurs modélisations.

II.1. Définition d'un convertisseur statique :

Un convertisseur statique est un montage utilisant des interrupteurs à semi-conducteurs permettant par une commande convenable de ces derniers de régler un transfert d'énergie entre une source d'entrée et une source de sortie comme le montre la figure(II.1).La source d'entrée peut être un générateur ou un récepteur (idem pour la source de sortie). [36]

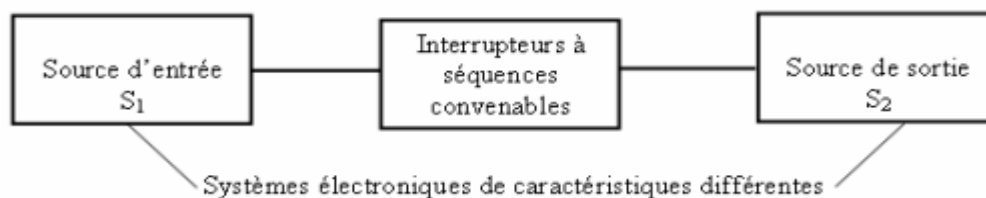


Figure II.1: Convertisseur statique [36]

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques:

- ✓ **le redresseur** : transforme l'énergie alternative en énergie sous forme continue ;
- ✓ **l'onduleur (invertir)** : transforme de l'énergie continue en énergie alternative ;

- ✓ **le hacheur** : permet de faire varier la tension et le courant d'une énergie sous forme continue ;
- ✓ **le gradateur** : permet de faire varier la valeur efficace de la tension et du courant d'une énergie sous forme alternative. Il ne permet pas de faire varier la fréquence. [37]

✚ **utilisation de convertisseur :**

- Variateurs de vitesse pour les moteurs à courant continu
- Variateurs de vitesse pour les moteurs à courant alternatif
- Alimentations sans coupure

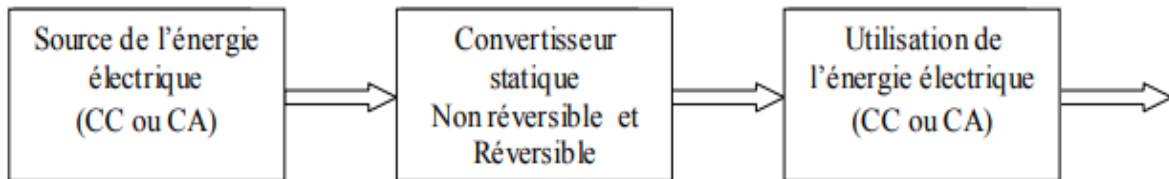


Figure II.2: schéma synoptique de la fonction assurée par les convertisseurs [38]

II.2. Interrupteurs statiques :

II.2.1. Interrupteur parfait:

Un interrupteur parfait possède deux états : "Ouvert (OFF)" et "Fermé (ON)". [39]

- **Interrupteur ouvert** (position OFF : $i = 0$)



Figure II.3: symbole d'un interrupteur en état ouvert [40]

- **Interrupteur fermé** (position ON : $u = 0$)

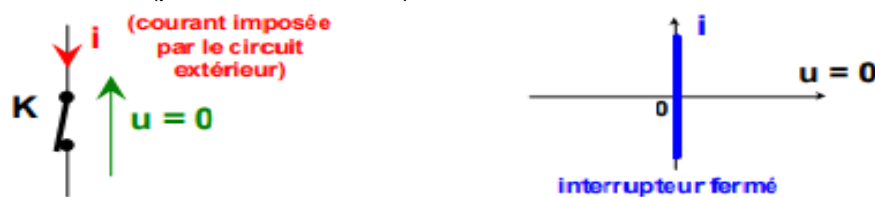


Figure II.4: symbole d'un interrupteur en état fermé [40]

II.2.2. Les interrupteurs à semi-conducteurs :

- **La Diode** (interrupteur non commandé) [40]



Figure II.5: symbole de la diode [40]

La diode passe de l'état bloqué à l'état passant lorsque u ou i change de signe (positif).

La diode passe de l'état passant à l'état bloqué lorsque u ou i change de signe (négatif).

La commutation est spontanée car elle ne dépend que de signe du courant ou de la tension du circuit extérieur. [39]

▪ Le Thyristor :

Le thyristor est une diode commandée qui ne permet donc le passage du courant que dans un sens. De plus il n'est commandable qu'à la fermeture. L'ouverture s'effectue lors de la disparition du courant direct (voir diode). [39]

Le thyristor se comporte donc comme une diode dont la mise en conduction dans le sens passant sera autorisée par une impulsion de courant sur la gâchette (retard α à l'amorçage réglable). [40]

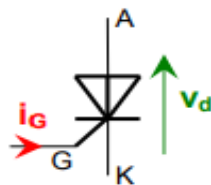


Figure II.6: symbole du Thyristor [39]

Prenons l'exemple du redressement commandé.

On retarde à l'amorçage du thyristor pour régler la valeur moyenne (schéma ci-dessous): [40]

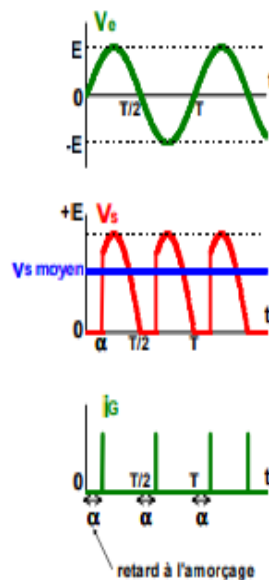


Figure II.7: Retarde à l'amorçage [40]

▪ Les transistors bipolaires:

Cet interrupteur est commandable à l'ouverture et à la fermeture, la commutation se fait par une action électrique (injection d'un courant de base i_B). On utilise essentiellement des transistors NPN. [39] [40]

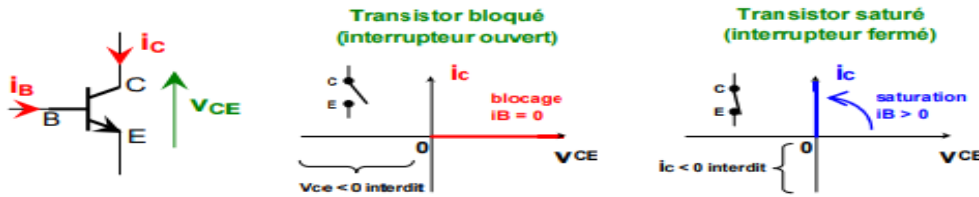


Figure II.8: Transistor bipolaire [39]

Lorsque le transistor est saturé (interrupteur fermé) le courant i_c et la tension v_{CE} ne doivent pas être négatif. Le transistor est donc un interrupteur commandé unidirectionnel en tension et en courant [39] [40]

- $I_B = 0 \implies I_C = 0$ (commutateur ouvert)
- $I_B > 0 \implies I_C = \beta \cdot I_B$ (Amplificateur)
- $I_B = I_{Bsat} \implies I_C = I_{Cmax}$ (commutateur fermé)

▪ **Le transistor MOS et l'IGBT :**

Ces transistors, plus performants, ont le même comportement que le bipolaire à la différence qu'ils se commandent avec une tension (le courant de commande est très faible). [40]

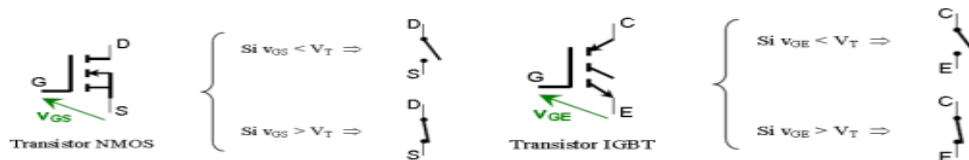


Figure II.9: Transistor NMOS/IGBT [40]

II.3. Les familles de convertisseurs statiques :

Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques (schéma ci-dessous): [40]

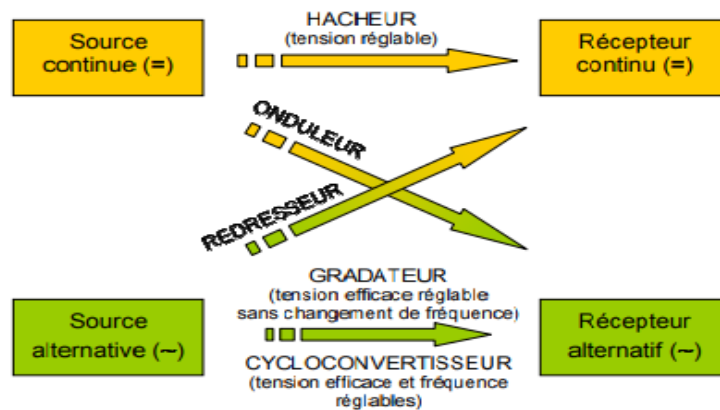


Figure II.10: Différents types de convertisseurs statiques [40]

II.3.1. Le Gradateur :

C'est un convertisseur alternatif-alternatif, qui donne en sortie une tension alternative de même fréquence que la tension d'entrée et dont on peut réduire la valeur efficace de façon continue. Ce convertisseur est essentiellement utilisé pour la varier la vitesse des moteurs

alternatifs comme les moteurs asynchrones ou synchrones en variant leur tension d'alimentation. [41]

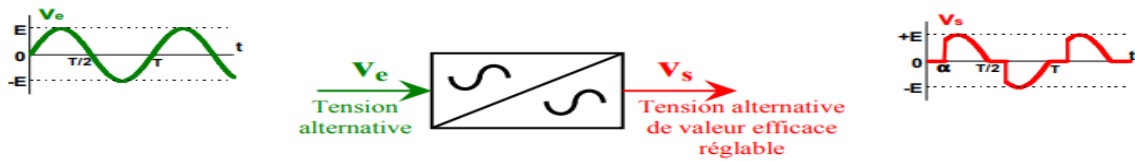
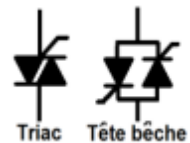


Figure II.11: Conversion AC/AC [41]

La structure de base repose sur un interrupteur électronique capable de conduire dans les deux sens à l'état passant et de supporter une tension également dans les deux sens à l'état bloqué. [42]

Cet interrupteur peut être alors réalisé :

- ✓ Soit avec un seul composant : le triac
- ✓ Soit en assemblant deux thyristors tête-bêche



Dans ce type de convertisseur on distingue deux types de commande :

- ✓ Gradateur à angle de phase
- ✓ Gradateur à train d'onde

▣ Utilisation de gradateur :

- Chauffage (contrôle de température)
- Eclairage (contrôle de lumière)
- Variation de vitesse des moteurs alternatifs de faibles puissances (perceuse, aspirateurs de quelques centaines de Watts).
- En règle générale, ils sont utilisés sur des systèmes ne présentant pas ou peu d'inertie thermique ou mécanique.[43]

II.3.2. Le Hacheur :

Le hacheur permet d'alimenter une charge sous une tension continue réglable à partir d'une source continue fixe. [44]

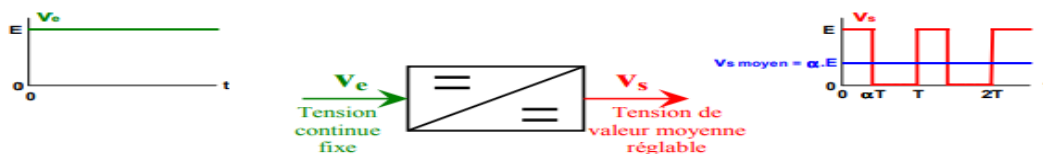


Figure II.12: Conversion DC/DC [44]

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés, à titre d'exemple nous citons quelques types : [45]

- Abaisseur de tension « BUCK ».
- Elévateur de tension « BOOST ».
- Abaisseur élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

Il existe d'autres types de hacheurs.

■ Utilisation d'hacheur :

L'hacheur peut être utilisé pour le contrôle de vitesse des moteurs à courant continu et tout particulièrement en traction (trains, trolleybus, métro, ...) et en robotique. Un hacheur peut servir: [46]

- Pour abaisser la tension (tension de sortie inférieure à la tension d'entrée) : Dévolteur
- Pour élever la tension (tension de sortie supérieure à la tension d'entrée): Survolteur
- Soit les deux fonctions en même temps (dévolteur-survolteur).

II.3.3. L'Onduleur :

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques d'énergie électrique du continu en alternatif. Ils permettent d'obtenir une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue donnée (figure II.13). [46]

La forme d'onde alternative de la tension de sortie est déterminée par le système (par différence avec les onduleurs autonomes). Selon la forme de cette tension de sortie, on classe les onduleurs en plusieurs catégories (figure II.14) : [46]

- Onduleur 2 états (tension en créneaux $+U$, $-U$) : La valeur efficace de la tension de sortie n'est pas réglable et dépend de la tension continue d'entrée.
- Onduleurs 3 états ($+U$, 0 , $-U$) : La valeur efficace de la tension de sortie est réglable en agissant sur la durée du créneau.
- Onduleurs à modulation de largeur d'impulsions : MLI (Pulse Width Modulation : PWM): L'onde de sortie est avec train d'impulsions de largeur et d'espacement variables. Ceci permet de réduire le taux des harmoniques. On peut même obtenir une onde de sortie voisine de l'onde sinusoïdale.
- Onduleurs à tension de sortie en marche d'escalier : L'onde de sortie est constituée par la somme ou la différence de créneaux de largeur variable et sa forme générale se rapproche au mieux de la sinusoïde. L'un des problèmes de ce système est le nombre important d'éléments.

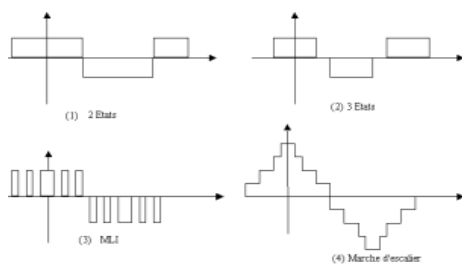


Figure II.12: La structure des onduleurs [46]

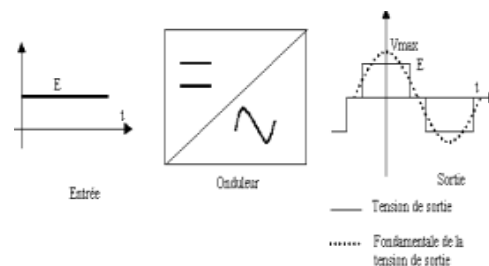


Figure II.13: Les formes de la tension de sortie [46]

Il existe des onduleurs monophasés et des onduleurs triphasés. Pour les onduleurs monophasés, nous avons 3 schémas de principe : [46]

- Deux interrupteurs (Transistors ou thyristors) parallèle
- Deux interrupteurs (Transistors ou thyristors) sérient
- Quatre interrupteurs en pont.

⚡ Utilisation d'onduleur :

Les onduleurs sont utilisés dans plusieurs applications industrielles : [46]

- Variation de vitesse des moteurs électriques à courant alternatif (moteur asynchrone ou synchrone)
- Four à induction
- Alimentations dans les avions
- Alimentation sans interruption de secours (pour ordinateurs et autres applications)

II.3.4. Le Redresseur :

Les convertisseurs AC/DC, souvent appelés redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui permettent d'obtenir une tension continue (de valeur moyenne non nulle) à partir d'une tension alternative sinusoïdale monophasée ou triphasées (de valeur moyenne nulle). [47]

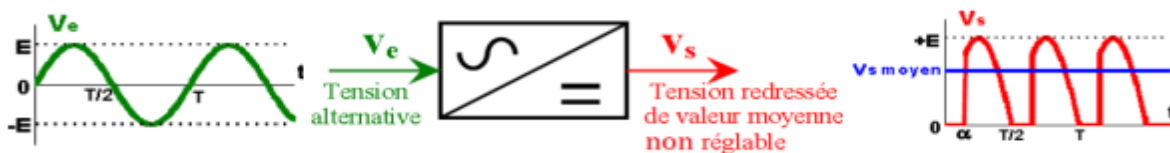


Figure II.15: La structure des redresseurs [44]

On distingue le redressement non commandé, utilisant uniquement des diodes et délivrant une tension de valeur moyenne non réglable et le redressement commandé, utilisant des thyristors permettant d'obtenir une tension de valeur moyenne réglable. [47]

⚡ Utilisation de redresseur :

Il peut utiliser pour:

- l'alimentation de moteur à courant continu.
- Chargeur de batteries d'accumulateur.
- Variateur de vitesse pour moteur à courant continu [48]

II.4. Les différents types d'un redresseur :

Dans ce type de convertisseur, on peut les classer en deux classes : les redresseurs non contrôlé et les Redresseur contrôlé.

Nous allons présenter les redresseurs monophasé et triphasé commandés et Non commandés. Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions Alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (nombre déphases q). Ces tensions peuvent être celles aux bornes d'un alternateur.

Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur. On distingue trois types de montages [49]

1. Pq : montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;

2. PDq : montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;

3. Sq. : montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont".

II.4.1. les redresseurs non commandé :

▣ Redresseur monophasé :

Dans les redresseurs non commandé, les diodes sont remplacées pour commander la puissance voulue aux bornes du récepteur.[50]

⇒ **Redresseur monophasée simple alternance :**

Le circuit de principe est donné sur la figure (II.14) de valeur instantanée suivant : [51]

$$V(t) = U \sin(\omega t) \tag{II-1}$$

$I_s < 0 \rightarrow$ diode est bloquée

$I_s > 0 \rightarrow$ diode est passante

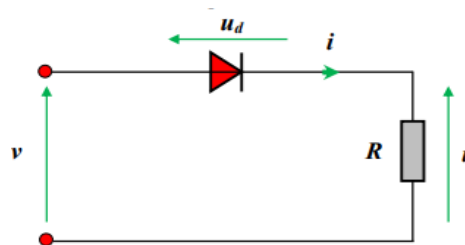


Figure II.16: redresseur monophasée simple alternance sur la charge résistive [51]

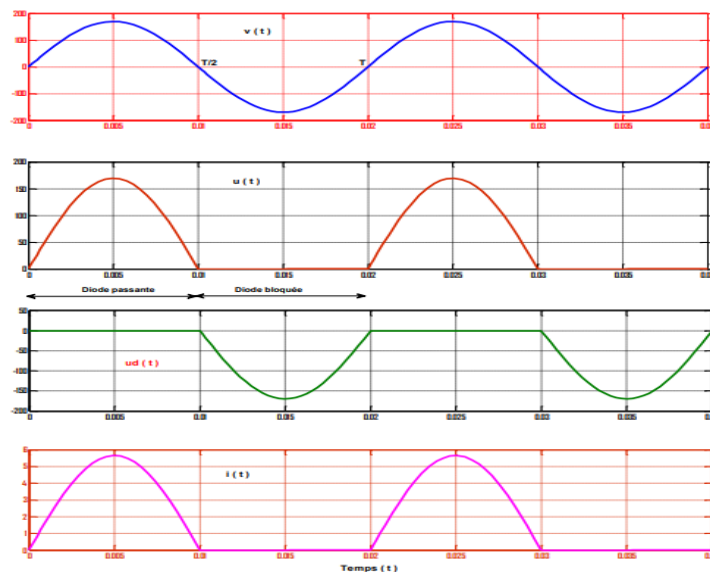


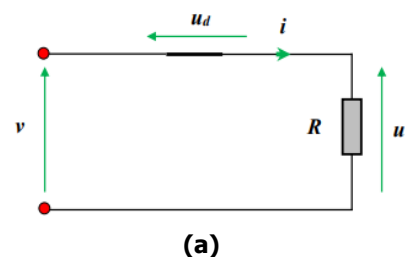
Figure II.17: allures des tensions et le courant du redresseur monophasée simple alternance [51]

➤ **Analyse du fonctionnement :**

Quelque soit l'état de la diode on a :

$$v = u_d + u \tag{II-2}$$

1- Pour : $0 < \alpha < \pi$



La tension $v(t) > 0 \rightarrow ud > 0$

Alors La diode devient passante :

$$ud = 0, u = v, i = \frac{u}{R}$$

2- Pour : $\pi < \alpha < 2\pi$

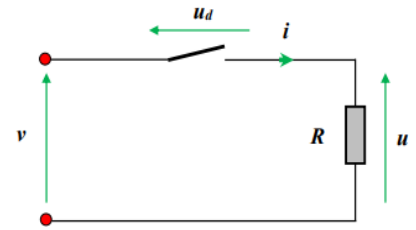
La tension $v(t) < 0 \rightarrow ud < 0$

Alors La diode devient bloquée :

$$i = 0, u = 0, ud = v. [51]$$

⇒ **Le redressement double alternance :**

Le redressement double alternance peut s'effectuer avec un transformateur à point milieu et deux diodes ou avec un transformateur ordinaire et un pont de Graëtz constitué de quatre diodes. [51]



(b)

Figure II.18: circuit électrique

(a) Interrupteur fermé

(b) Interrupteur ouvert

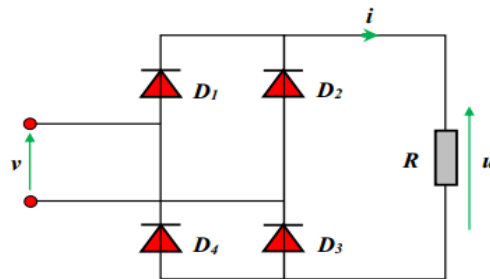


Figure II.19: redressement double alternance sur la charge résistive [51]

➤ **Analyse du fonctionnement :** [51]

1-Pour : $0 < \alpha < \pi$

La tension $v(t) > 0$

Les diodes passantes sont : D1 et D3.

Les diodes D2 et D4 sont bloquées.

Alors :

$$vd1 = vd3 = 0, \quad id1 = id3 = i$$

$$vd2 = vd4 = -v, \quad id2 = id4 = 0$$

$$u = v, \quad i = \frac{u}{R}$$

2-Pour : $\pi < \alpha < 2\pi$

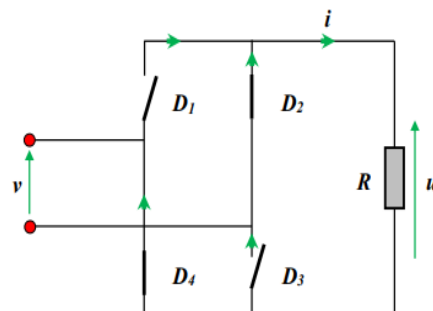
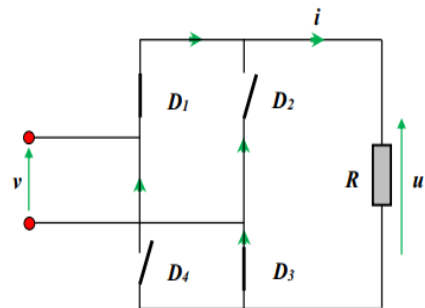
La tension $v(t) < 0$

Les diodes passantes sont : D2 et D4.

Les diodes D1 et D3 sont bloquées.

Alors :

$$vd2 = vd4 = 0, \quad id2 = id4 = i$$



$$vd1 = vd3 = v, \quad id1 = id3 = 0$$

$$u = -v > 0$$

Ce fonctionnement est illustré par les chronogrammes des tensions et des courants suivants :

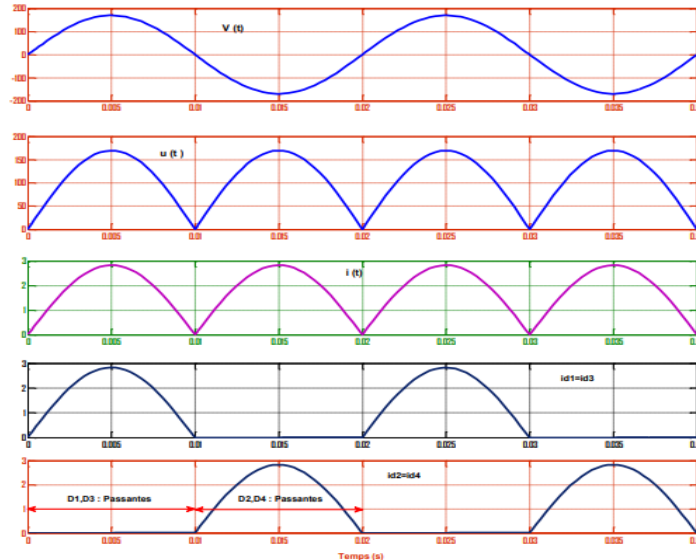


Figure II.20 : chronogrammes des tensions et des courants [51]

II.4.2. les redresseurs commandés :

Le redresseur à thyristors réalise une conversion commandée alternatif-continu, du type $(V, f) \leftrightarrow (U')$. La commande est réalisée en agissant sur l'angle retard à l'amorçage δ . Il est possible de réaliser une commande de type « Arc cosinus » de cet angle d'amorçage, de manière analogique ou numérique. La référence de l'angle de retard à l'amorçage δ est imposée par la source alternative. [52]

⇒ Redresseur monophasée simple alternance :

Soit le montage de la figure (II-21) alimentant une charge résistive. Le thyristor est supposée idéal. [53]

$$V(t) = \hat{u} \sin(\omega t) \tag{II-3}$$

Le thyristor est passant qu'à partir du moment où l'on envoie le signal de gâchette et à la condition que la tension V_{AK} soit positive. [53]

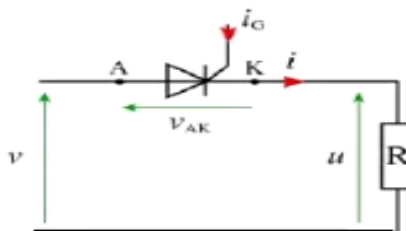


Figure II.21: redresseur monophasée simple alternance sur la charge résistive [53]

➤ Analyse du fonctionnement : [53]

Quelque soit l'état de la diode on a : $v = v_{AK} + u$

$$V(t) > 0 \rightarrow v_{AK} > 0$$

Le thyristor peut être amorcé.

- Si : $i_G = 0$

TH reste bloqué donc : $i = 0, u = 0$ et $v_{AK} = V$

- Si une impulsion de courant i_G suffisante apparaît sur sa gâchette alors T_H devient passant.

$$v_{AK} = 0, \quad u = v, \quad i = \frac{u}{R}$$

Si :

$v(t) = 0 \rightarrow i = 0$: Le thyristor se bloque naturellement.

$v(t) = 0 \rightarrow v_{AK} < 0$: Le thyristor ne peut pas être amorcé. il reste bloqué même si une impulsion apparaît sur sa gâchette.

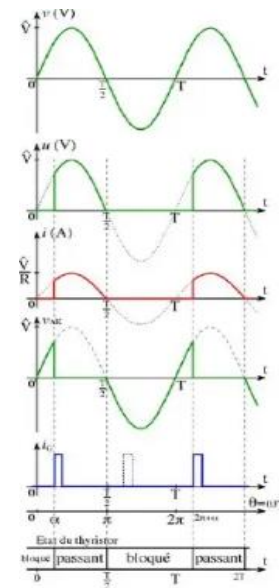


Figure II.22 : chronogrammes des tensions et des courants

⇒ **Le redressement double alternance :**

1-pont mixte :

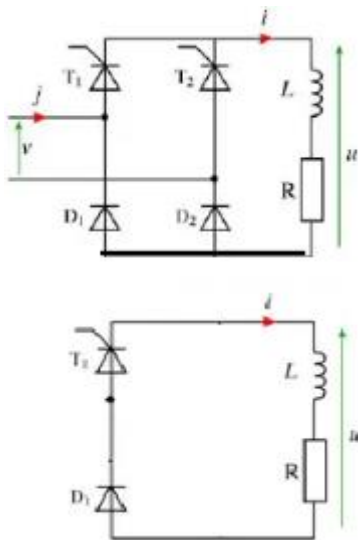


Figure II.23 : redressement double alternance sur la Charge inductive [53]

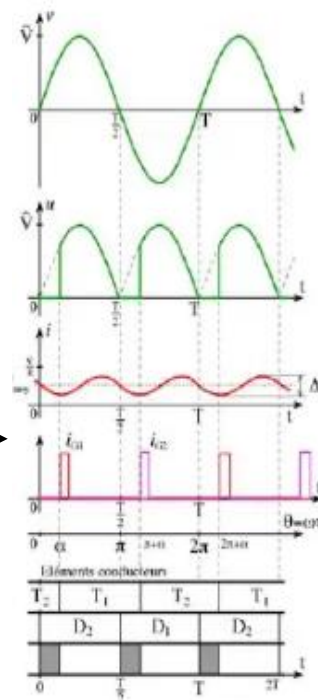


Figure II.24 : chronogrammes des tensions et des courants [53]

✚ La tension de sortie u s'annule lorsque v devient négatif. Cela est dû à la présence des diodes.

✚ Durant les instants où la tension est nulle,

La charge fonctionne en roue libre

➤ **Analyse du fonctionnement :**

Pour l'intervalle $\delta \leq 0 < \pi + \delta$:

- À $t = 0$ on amorce T_{H1} , alors :
- $v_{TH1} = 0$; $v_{D2} = 0$ car D_2 polarisée en directe donc passante
- $u = v > 0$
- $i_{TH1} = i_{D2} = i$;
- $j = i > 0$;
- $v_{TH2} = v_{D1} = -v < 0$;
- $i_{TH2} = i_{D1} = 0$ car D_1 polarisée en inverse donc bloquée.
- Pour $\theta = \pi$: $v = 0$ or $i = i_{TH1} \neq 0 \Rightarrow TH1$ ne peut pas se bloquer naturellement et continue d'assurer la conduction. Par contre la diode D_2 se bloque naturellement, D_1 se trouve polarisée en direct et devient passante
- Pour $\pi < \theta < \pi + \delta$: $V(t) < 0$:

$v_{TH2} = -v > 0 \Rightarrow TH2$ Peut être amorcé mais on ne le fait pas.

\Rightarrow Tant que $\pi \leq \theta < \pi + \delta$, $TH1$ continue d'assurer la conduction avec D_1 puisque $i > 0$, la charge est court-circuitée : **phase de roue libre**. [53]

2-pont tout thyristors :

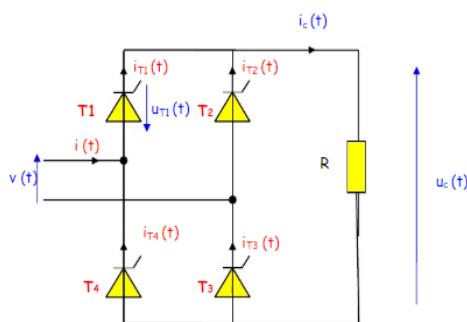


Figure II.25 : redressement double alternance sur la charge résistive [53]

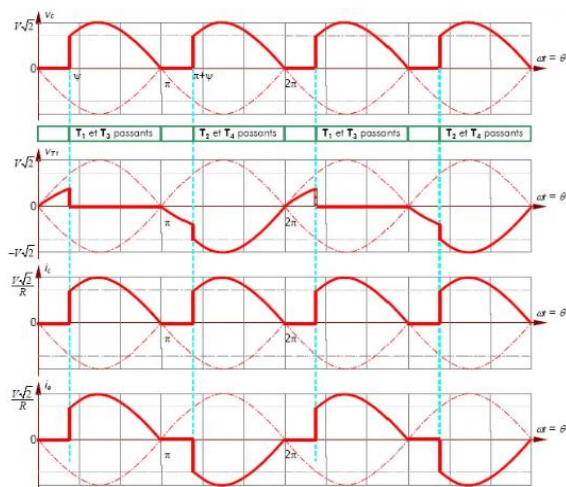


Figure II.26 : évolution des grandeurs dans le cas d'un débit sur charge résistive [53]

\Rightarrow **Redresseur triphasé PD3 :**

Ce montage peut être considéré comme résultant de l'association d'un montage à anodes communes et d'un montage à cathodes communes [37]

On gardera les mêmes hypothèses que précédemment c'est-à-dire que le redresseur ainsi que le transformateur sont parfaits et que la charge est fortement inductive. [37]

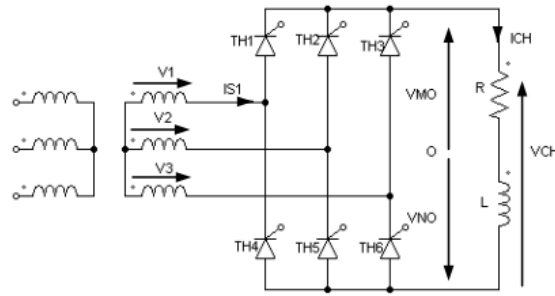


Figure II.27 : Montage PD3 charge inductive [37]

a) Analyse élémentaire de fonctionnement :

Nous utilisons le principe des fonctions de commutation exposé à la section précédente. Les fonctions de commutation ont une forme identique à celles présentées dans le cas d'un redresseur à diodes. Elles subissent une translation positive d'un angle α .

Dans le cas d'une alimentation triphasée équilibrée, les instants de commutation pour le redresseur à diodes sont définis comme suit: [54]

$$U_{ch}(\theta) = U_{MO}(\theta) - U_{NO}(\theta) \tag{II-4}$$

Intervalles	VMO	VNO	UCH
$[0; \frac{\pi}{6} + \alpha]$	V3	V2	U32
$[\frac{\pi}{6} + \alpha; \frac{\pi}{2} + \alpha]$	V1	V2	U12
$[\frac{\pi}{2} + \alpha; \frac{5\pi}{6} + \alpha]$	V1	V3	U13
$[\frac{5\pi}{6} + \alpha; \frac{7\pi}{6} + \alpha]$	V2	V3	U23
$[\frac{7\pi}{6} + \alpha; \frac{3\pi}{2} + \alpha]$	V2	V1	U21
$[\frac{3\pi}{2} + \alpha; \frac{11\pi}{6} + \alpha]$	V3	V1	U31
$[\frac{11\pi}{6} + \alpha; \pi + \alpha]$	V3	V2	U32

Tableau II.1 : Les tensions des montages sur chaque intervalle de fonctionnement [37]

b) Forme d'onde des différentes grandeurs :

On considère le cas du montage très fréquemment utilisé redressant à l'aide de six thyristors les tensions v_1, v_2, v_3 (figure II.27) :

$$v_1 = v_m * \sin(\omega t), \quad v_2 = v_m * \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{6}\right), \quad v_3 = v_m * \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{6}\right) \tag{II-5}$$

La figure (II.28) montre les intervalles possibles d'amorçage des six thyristors. Présenté d'un traçage des tensions simples et composées.

Les tensions composées sont définit par les équations suivantes :

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right), \quad V_{13} = V_1 - V_3 = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \tag{II-6}$$

$$V_{21} = V_2 - V_1 = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{5\pi}{6}\right), \quad V_{23} = V_2 - V_3 = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{II-7}$$

$$\tag{II-8}$$

$$V_{31} = V_3 - V_1 = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{5\pi}{6}\right), \quad V_{32} = V_3 - V_2 = \sqrt{3}V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

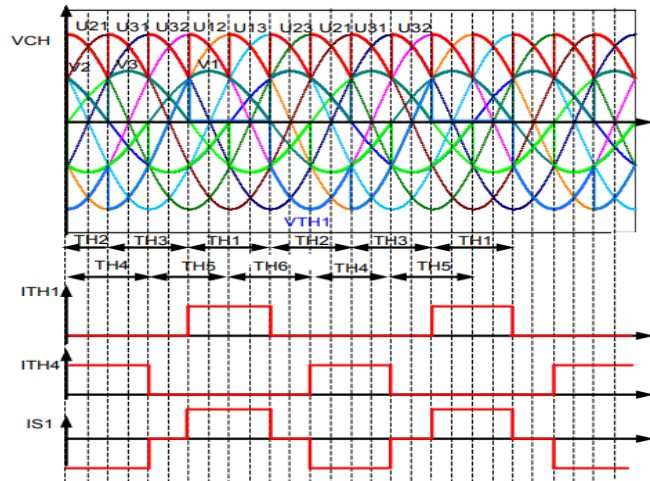


Figure II.28 : Forme d’ondes Montage PD3 charge inductive [37]

II.5. La modélisation de redresseur à diode PD3:

Pour illustrer ces propos, prenons le cas d’un pont redresseur PD3 où les diodes sont modélisées par un interrupteur idéal (figure II.29 (a)). L’étude de ce convertisseur fait apparaître 3 régimes possibles :

- 1 phase sans conduction où toutes les diodes sont bloquées (figure II.29 (b))
- 6 phases normales de conduction où seulement 2 diodes conduisent (exemple figure II.29 (c))
- 6 phases d’empiètement où seulement 3 diodes sont passantes simultanément (exemple figure II.29 (d)) [55] [56]

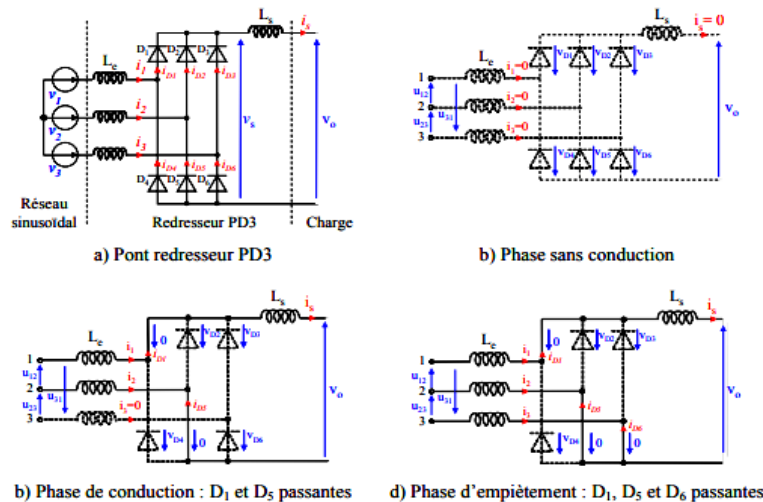


Figure II.29: Pont redresseur à diodes PD3 [56]

❖ Phase sans conduction

Dans ce mode, le courant de sortie i_s est nul et toutes les diodes sont bloquées (figure II.29 (b)). L’équation (II-9) décrit cette phase de fonctionnement. [56]

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{di_2}{dt} = \frac{di_3}{dt} = 0 \tag{II-9}$$

❖ Phase de conduction

Prenons par exemple la phase de conduction où les diodes D_1 et D_5 sont passantes. A partir de l'analyse de la figure II.29(c), les équations (II-10) (II-11) et (II-12) peuvent être écrites. [56]

$$\frac{di_{D1}}{dt} = \frac{di_{D5}}{dt} = \frac{u_{12} - v_0}{2L_e + L_s} \quad (\text{II-10})$$

$$\frac{di_{D2}}{dt} = \frac{di_{D3}}{dt} = \frac{di_{D4}}{dt} = \frac{di_{D6}}{dt} = 0 \quad (\text{II-11})$$

$$v_{D6} = \frac{L_e}{2L_e + L_s} (u_{12} - v_0) + u_{23} \quad (\text{II-12})$$

Les $\frac{di}{dt}$ correspondent aux autres phases de conduction peuvent être obtenus par une permutation circulaire des indices.

❖ Phase d'empiètement

Prenons par exemple la phase d'empiètement où les diodes $D1$, $D5$ et $D6$ sont passantes. A partir de l'analyse de la figure II.29(d), les équations (II-13) (II-14) et (II-15) peuvent être écrites. [56]

$$\frac{di_{D1}}{dt} = \frac{1}{3L_e + 2L_s} (u_{12} + u_{13} - 2v_0) \quad (\text{II-13})$$

$$\frac{di_{D5}}{dt} = \frac{1}{3L_e + 2L_s} \left(\frac{2L_e + L_s}{L_e} u_{12} - \frac{L_e + L_s}{L_e} u_{13} - v_0 \right) \quad (\text{II-14})$$

$$\frac{di_{D6}}{dt} = \frac{1}{3L_e + 2L_s} \left(-\frac{L_e + L_s}{L_e} u_{12} + \frac{2L_e + L_s}{L_e} u_{13} - v_0 \right) \quad (\text{II-15})$$

Comme précédemment, les $\frac{di}{dt}$ correspondent aux autres phases d'empiètement peuvent être obtenus par une permutation circulaire des indices.

a) Modèle Simulink du pont redresseur à diodes PD3 :

Le modèle Simulink d'un pont redresseur à diodes PD3 est illustré à la figure II.30(a).

La structure interne du bloc 'PD3' est représentée à la figure II.30(b). Il comporte 4 blocs.

Le bloc 'MF1' est une fonction qui calcule la tension aux bornes des diodes pour la phase de fonctionnement en cours.

Le second bloc 'MF2' détermine quelle sera la prochaine phase de fonctionnement et calcule le $\frac{di}{dt}$ de chaque inductance.

Le troisième bloc 'courant' représenté à la figure II.30(c) calcule le courant dans chaque diode ce qui permet d'en déduire les courants de ligne i_1 , i_2 et i_3 ainsi que le courant de sortie i_s . Le quatrième bloc est constitué de blocs 'Memory'.

Ainsi au pas de calcul suivant, la nouvelle phase de fonctionnement calculé au pas de calcul précédent devient la phase initiale pour ce pas de calcul. L'algorithme de calcul est illustré à la figure II.30(d). [55] [56]

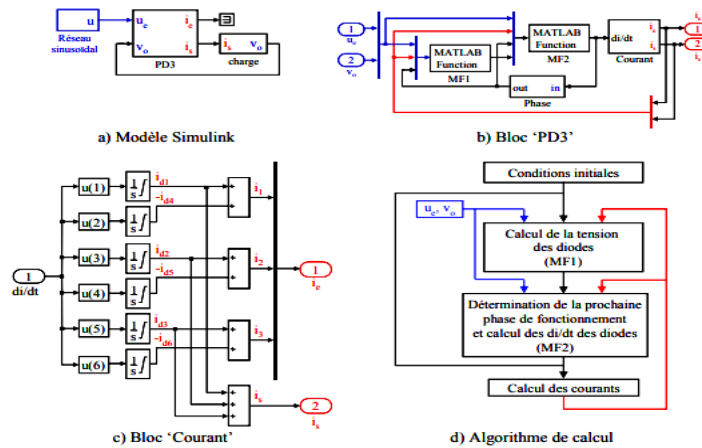


Figure II.30: Modèle Simulink d'un pont redresseur PD3 [56]

L'originalité de notre approche est le calcul des valeurs de chaque courant de diode avec les valeurs de $\frac{di}{dt}$ des inductances L_i et L_o . On utilise alors six blocs intégrateurs (un pour chaque diode). Les blocs intégrateurs sont réglés pour limiter leur valeur de sortie minimale à zéro (limite inférieure de saturation), cette caractéristique permet d'éviter le problème de la détermination précise de l'instant où les courants des diodes atteignent zéro. [55]

b) Validation expérimentale :

Des simulations confrontées à des formes d'ondes expérimentales sont illustrées à la figure (II.31). Les paramètres de simulations sont les suivantes : [55]

$$U_{RMS} = 230 \text{ V} ; R = 58 \Omega ; L_e = 800 \mu\text{H} ; L_s = 800 \text{ mH}$$

Les formes d'ondes simulées et expérimentales sont très proches. La durée de l'empîement est la même dans les 2 cas ($u \cong 0.7 \text{ ms}$).

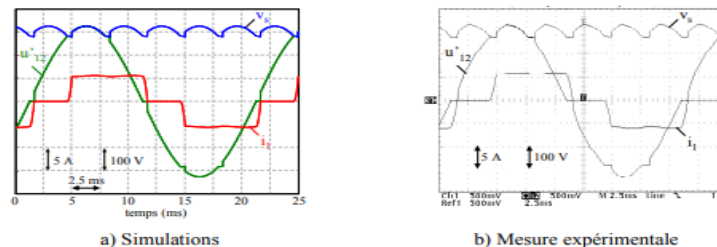


Figure II.31: Comparaison simulation/expérimentation pour un pont redresseur PD3 [56]

II.6. CEM en électronique de puissance :

L'augmentation de la puissance et de la rapidité des convertisseurs a fait que ces derniers créent des perturbations électromagnétiques de plus en plus importantes. [57]

L'étude de la compatibilité électromagnétique est devenue donc un passage obligatoire pour les concepteurs de circuits en électronique de puissance. [57]

Dans un circuit de convertisseur statique, on retrouve les éléments suivants :

- Pistes de circuits imprimés (CI)
- Câbles de connexion
- Plans de masse
- Composants discrets : passifs (résistances, condensateurs, inductances...) ou actifs (transistors, diodes ...).

- Diélectriques et châssis

La configuration du circuit de convertisseur statique et la disposition de ses différents éléments définissent les différents couplages qui existent. Ces couplages créent et amplifient les perturbations électromagnétiques. [57]

Tous les couplages possibles en CEM existent dans un circuit de convertisseur statique. Ces couplages peuvent être entre éléments du circuit ou entre le circuit et son environnement [57]

II.6.1. cause des perturbations sur les redresseurs :

Le fonctionnement d'un convertisseur statique en général est polluant, car les temps de commutation sont très courts et les amplitudes très élevées. Les commutations rapides permettent de réduire les pertes lors des commutations (présence simultanée de la tension et du courant dans les interrupteurs). Un autre facteur qui augmente la pollution électromagnétique est la fréquence de découpage très élevée. [58] [59]

Par exemple le redresseur triphasé à diodes utilisé comme premier étage pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones. La commande de la machine asynchrone en vitesse variable est utilisée dans des applications comme l'entraînement de compresseurs, de ventilateurs, de pompes, de convoyeurs, etc. [60]

II.6.2. Etendue spectrale du bruit dans les convertisseurs statiques :

L'étude de la compatibilité électromagnétique peut se faire à plusieurs niveaux tels que les lignes d'alimentation, redresseur, convertisseur et sa commande, aussi filtrage, charge, etc (figure II.32) notre étude n'est pas basée sur les convertisseurs de puissance toutes les perturbations sont rassemblée dans un convertisseur [61]

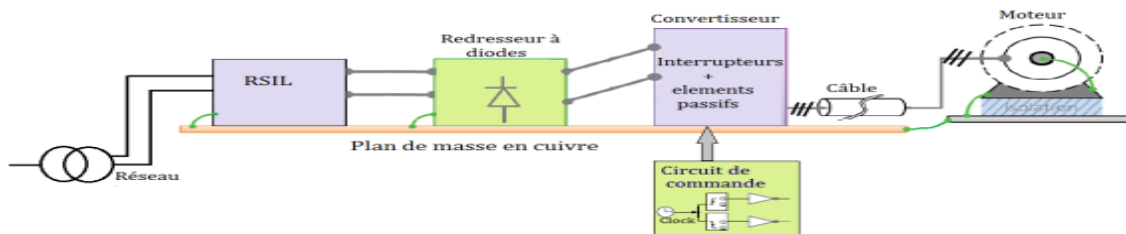


Figure II.32 : Exemple d'une chaîne de conversion d'électronique de puissance [62]

L'ensemble des dispositifs de conversion émettent une pollution électromagnétique sur une plage très large de fréquences décrite dans la Figure (II.33). Les différents étages de puissance impactent sur des plages de fréquences qui couvrent 7 décades. Les étages de commande contribuent aussi à l'émission de perturbations conduites et rayonnées qui dépendent de la structure de conversion, de la nature de la technologie des interrupteurs utilisés et de son mode de commutation. [61]

En effet, chaque étage de conversion va contribuer à créer des perturbations dans une certaine plage de fréquences. On note que le redresseur influe jusqu'à quelques 10 kHz, l'étage de commutation jusqu'à quelques mégahertz et enfin les phénomènes liés aux transitions de commutation (résonances, excitation des modes propres) jusqu'à quelques dizaines de mégahertz. Il est évident que ces dispositifs de conversion d'énergie électrique contribuent fortement à la pollution électromagnétique d'origine humaine. [62]

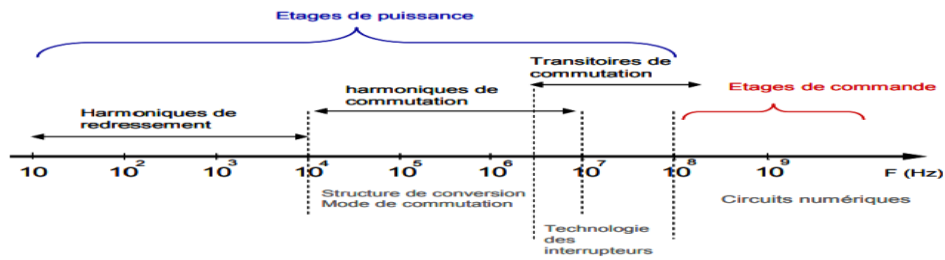


Figure II.33 : Etendue spectrale des phénomènes de perturbateur [59]

II.6.3. Commutation des redresseurs :

La conversion d'énergie en électronique de puissance est basée sur deux phases complémentaires, le découpage et le stockage d'énergie. [63]

Le découpage est fait par des interrupteurs de puissance avec des composants semi-conducteurs. Il existe des interrupteurs à commutation commandée (MOSFET, IGBT, JFET) qui nécessitent une commande et d'autres à commutation naturelle (diode PiN, Schottky). [63]

Le stockage d'énergie s'effectue dans des composants passifs comme les condensateurs et les inductances. L'intégration de ces deux phases est le principe de la cellule de commutation. [63]

Lorsque plusieurs redresseurs ont une électrode commune, on verra que chacun n'est conducteur que pendant une durée limitée et qu'un seul conduit à chaque instant (lorsque l'on considère les interrupteurs redresseurs comme parfaits). [64]

Si le courant produit par le montage redresseur est ininterrompu, ce qui représente le cas général, cela impose que l'enclenchement d'un redresseur s'accompagne du blocage de celui qui conduisait auparavant. [64]

La figure (II.34) montre qu'à l'instant t_1 le redresseur R_2 devient conducteur tandis que R_1 se bloque. [64]

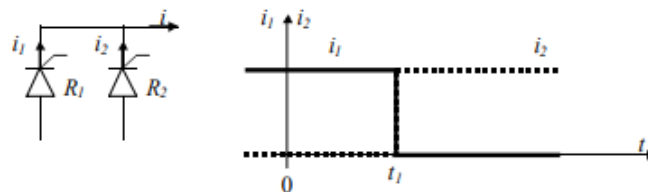


Figure II.34 : Commutation instantanée des interrupteurs redresseurs [64]

II.7. Classification des émissions des convertisseurs selon le mode de propagations :

Le tableau (II.2) donne la classification des perturbations selon les fréquences et leurs limites de plages correspondant aux normes en émission [65]

fréquences	0Hz A 50Hz	50Hz A 2KHz	9KHz A 150KHz	150KHz A 30MHz	150KHz A 300MHz	30MHz A 1GHz
Grandeurs le plus souvent observées	Sous harmonique des courants	Harmoniques des courants et des tensions	Courants radio fréquences	Courant radio fréquences	Rayonnement des câbles	Rayonnement avec les champs généralement couplés
			Tensions perturbatrices	Champs proches	Puissances perturbatrices	
			Champ magnétique			
Convertisseurs statiques et appareils électriques pouvant être concernés	Gradateurs en trains d'ondes	Redresseurs	Appareils électriques d'éclairage et analogues	Micro ordinateurs	Outils électriques avec moteurs ou dispositifs thermiques	Micro-ordinateurs
	Cycle-convertisseurs	Gradateurs en angle de phase		Alimentations à découpage	Appareils électrodomestiques	Alimentations à découpage
						Tout système numérique

Tableau II.2 : Classification des perturbations selon les fréquences [65]

Les perturbations électromagnétiques créées par les convertisseurs statiques d'énergie peuvent être classées selon leur mode de propagation. On distingue des perturbations conduites et des perturbations rayonnées. [65]

Joseph FOURIER, mathématicien français (1768–1830) a démontré qu'un signal non sinusoïdal peut être représenté sous la forme d'une somme de signaux de fréquence différentes (appelée harmonique de rang 3, 5, etc...) [66].

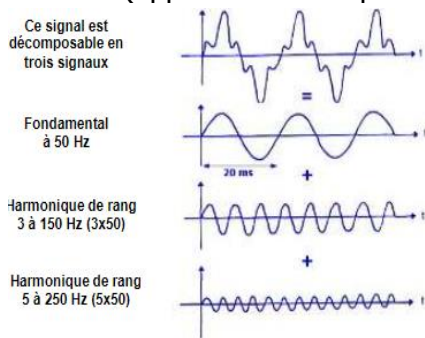


Figure II.35 : Représentation spectrale [66]

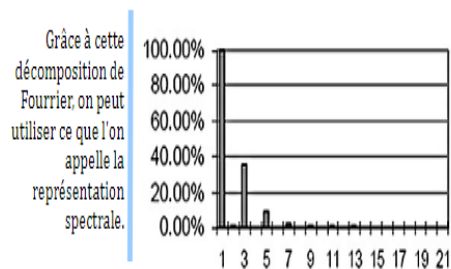


Figure II.36 : Rang de l'harmonique [66]

II.7.1. Perturbation conduites basses fréquences dans les redresseurs (50Hz– 2KHz) :

Ces perturbations sont essentiellement liées aux harmoniques et sous harmoniques des courants de la fréquence à 50 Hz [66]

Le modèle simple présenté sur la figure (II.37) permet de déterminer la tension aux bornes du condensateur et le courant absorbé par le pont de diode et sa charge ; ce dernier étant relativement peu chargé en harmoniques, ce modèle peut être alors qualifié de modèle en basse fréquence. [21]

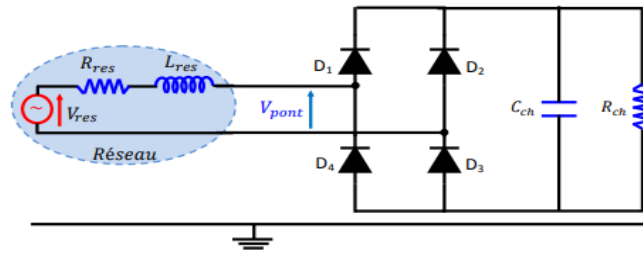


Figure II.37: Modèle simple en basse fréquence [18]

II.7.2. Perturbations conduites hautes fréquences dans les redresseurs (150KHz – 30MHz):

Dans cette classe, on parle le plus souvent des harmoniques de courantes hautes fréquences de 15 Hz [66]

On aboutit alors au schéma équivalent haute fréquence ci-après figure (II-38) où chaque phénomène parasite est modélisé et où chaque composant physique est présenté sous sa forme idéale et reste à être caractérisé. [67]

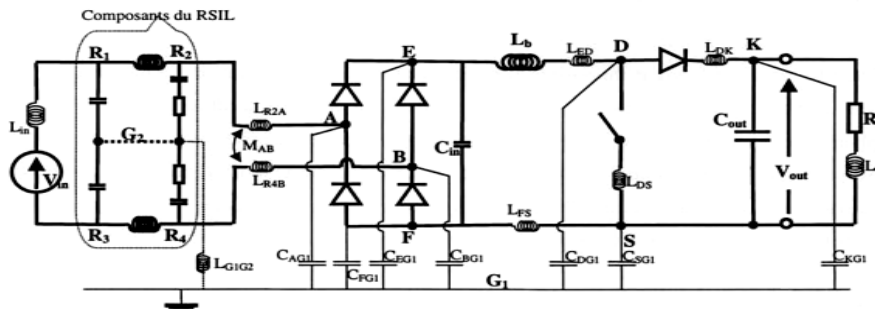


Figure II.38 : Schéma électrique haute fréquence [67]

A partir de ce schéma électrique, nous pouvons effectuer la modélisation des différentes parties de notre modèle fréquentiel. C'est ce que nous allons voir dans les deux prochains paragraphes où nous allons caractériser puis modéliser le comportement fréquentiel de la cellule de commutation (et de ses sources de perturbations) ainsi que celui des chemins de propagation. [67]

II.8. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons donné l'état de l'art de quatre types de convertisseurs (gradateur, hacheur, onduleur et redresseur). En suite, On a consacré une partie sur la modélisation des redresseurs ainsi leurs perturbations électromagnétiques causées au niveau de leur environnement électrique.

Le prochain chapitre va être consacré à l'étude de la synthèse des sources de perturbations électromagnétique d'un redresseur dans un environnement électrique.



Chapitre III

Simulation CEM dans un convertisseur AC/DC

Chapitre III : simulation CEM dans un convertisseur (AC/DC)

III. Introduction :

Les circuits d'électronique de puissance sont largement utilisés dans l'environnement industriel et domestique. Ces circuits permettent de convertir de l'énergie électrique avec un rendement élevé tout en réduisant la taille et la masse des circuits. Pour fonctionner, ces circuits découpent les deux grandeurs électriques courant et tension avec des fréquences de fonctionnement très élevées et génèrent donc des perturbations électromagnétiques en mode conduit et rayonné. Nous nous sommes intéressés à l'étude des perturbations conduites dans les basses fréquences. [68]

Cette étude est abordée de différentes façons dans la littérature, soit par la modélisation dans le domaine fréquentiel, soit dans le domaine temporel en utilisant des simulateurs de type circuit LTSPICE.

Dans ce chapitre nous présentons une méthode de modélisation temporel et fréquentielle appliquée à un redresseur non commandé et commandé « mono et triphasé ». Nous expliquons les différentes étapes de cette simulation sous logiciel LTSPICE et nous présentons les résultats de perturbations obtenues.

L'objectif de l'étude c'est de proposer un modèle CEM d'un convertisseur AC/DC plus simple et toujours précis, afin de permettre et faciliter l'étude globale d'un réseau avec ses convertisseurs statiques AC/DC en parallèle liés avec des connectiques.

III.1. DESCRIPTION DU LOGICIEL LTSPICE :

LTspice est un logiciel de simulation gratuit de circuits électroniques. Il est basé sur le moteur informatique Spice développé dans les années 70 à l'université de Californie (Berkeley) par l'équipe de Ron Rohrer. [69]

Le programme LTspice permet d'effectuer des simulations de circuits électroniques contenant des : [69]

- ⌘ Résistances, Condensateurs, Selfs, inductances Mutuelles, lignes de transmission
- ⌘ Sources de tension et courant indépendantes ou contrôlées
- ⌘ Diodes, Transistors bipolaires, transistors FET et MOS.
- ⌘ Composants électroniques complexes : amplificateurs opérationnels, circuits logiques
- ⌘ Et des Tubes. . .

Les simulations permettent de faire au choix :

- ⌘ L'Analyse du fonctionnement en continu du montage (point de repos)
- ⌘ L'analyse temporelle (réponse temporelle à une excitation)
- ⌘ L'analyse fréquentielle (réponse en fréquence du montage)
- ⌘ L'analyse du bruit Linear Technology améliore de manière régulière le logiciel LTspice,

ce qui en fait un outil fiable et à jour. Par ailleurs de nombreux fabricants concurrents comme Texas Instrument, proposent des modèles Spice de leurs composants (comme le TL081 par exemple).

❖ **ANALYSE EN CONTINU** :[70]

Calcul du point de repos ou DC operating point :

Il s'agit du mode d'analyse le plus simple car on se place dans le cas d'un régime continu pur. Ainsi les capacités sont remplacées par des circuits ouverts et les inductances par des courts-circuits. La commande spice correspondante commence par la directive **.op**

Calcul du point de repos en fonction d'une source continue variable. Dans ce cas on répète plusieurs fois une analyse du point de repos en fonction des variations d'une source de tension ou de courant continu. Ces variations peuvent être linéaire ou logarithmique entre 2 points ou tout simplement fixées par l'utilisateur sous la forme d'une liste. La Commande spice correspondante commence par la directive **.dc**

❖ **ANALYSE FREQUENTIELLE : [70]**

Il s'agit en fait d'une analyse harmonique linéaire. Tous les composants sont remplacés par leurs modèles petits signaux autour du point de polarisation. Ce type d'analyse permet ainsi de représenter les diagrammes de Bode. La commande spice correspondante commence par la directive **.ac**

❖ **ANALYSE TEMPORELLE : [70]**

On effectue ici une analyse temporelle en grands signaux des différents potentiels et courants d'un circuit électronique au cours du temps. Ce type d'analyse prend en compte les non-linéarités des composants. Il s'agit d'un mode de simulation qui se rapproche de l'observation d'un système électronique que l'on peut effectuer avec un oscilloscope. La commande spice correspondante commence par la directive **.tran**

❖ **ANALYSE DU BRUIT : [70]**





Nous reparlerons de ce type d'analyse un peu plus tard car il ne s'agit pas d'un élément primordial pour une première utilisation de spice.

III.2. Présentation du logiciel LTspice :



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 détaillées comme suit:



➤ Menu File: dans ce menu on trouve les commandes suivantes:

- ✓ 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.
- ✓ Exit: pour quitter LTspice.





➤ Le menu tools:

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










- Le menu View: c'est le menu avec lequel on peut activer ou désactiver les barres de LTspice.
 - ✓ Toolbar : pour activer ou désactiver la barre d'outils.
- Le menu help: aider l'utilisateur à manipuler le logiciel d'une façon plus aisée.

En activant la commande New ou Open la deuxième interface apparait.















- 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.
- Menu Edit : ce menu comporte des commandes permettant de modifier les schémas :
 - ✓ Undo (annuler) :  Pour annuler l'action précédente
 - ✓ Texte : **Aa** Pour ajouter du texte sur le schéma comme des commentaires.
 - ✓ Spice directive:  Pour ajouter une directive spice sur le schéma : Il s'agit d'instructions données au moteur de simulation spice pour effectuer l'analyse de votre circuit

On peut ajouter les composants suivants :

- ✚ Résistor (résistance) 
- ✚ capacitor (capacité) 
- ✚ Inductor (inductance) 
- ✚ Diode (diode) 
- ✚ Component (composant) 
- ✚ Rotate (rotation):  Permet d'effectuer une rotation de 90° du composant sélectionné sur la grille.
- ✚ Mirror (miroir):  Permet d'effectuer un effet de miroir du composant sélectionné sur la grille de travail.
- ✚ Draw wire (Dessiner le fil):  Pour relier les composants par des fils.
- ✚ Label net :  Pour donner un nom (plus parlant) aux potentiels du circuit.

Exemple: Vin, Vout.

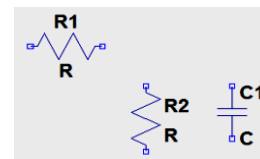
- ✚ Place GND :  pour placer une référence de masse.
 - ✚ Duplicate (copier) :  Pour copier et coller un élément.
 - ✚ Move (déplacer):  Pour déplacer des éléments.
 - ✚ Drage :  Pour déplacer un composant et ses connexions.
 - ✚ Delete (supprimer) :  Pour effacer un élément du schéma.
 - ✚ Draw : Commande de dessin pour illustrer votre schéma : ces commandes ne peuvent pas être utilisées pour effectuer les connexions électriques entre composants (seule la commande Draw Wire permet cela).
- Menu view :

- ✓ Zoom Area:  zoom avant.
- ✓ Zoom Back:  zoom arrière.
- ✓ Zoom to Fit:  annuler le zoom.
- ✓ Show grid : afficher un espace de dessin sous forme d'une grille.
- Menu hierarchy :
 - ✓ Open This sheet's symbol : ouvrir le détail de ce symbole.
 - ✓ Create new symbole : créer un nouveau symbole.
 - ✓ Create a new sheet : créer une nouvelle feuille.
 - ✓ Menu Simulate:
 - ✓ Run :  pour lancer la simulation
- Menu window :
 - ✓ Tile horisontally: arranger horizontalement.
 - ✓ Tile vertically:  arranger verticalement.
 - ✓ Cascade 
 - ✓ Close everything:  fermer tous.

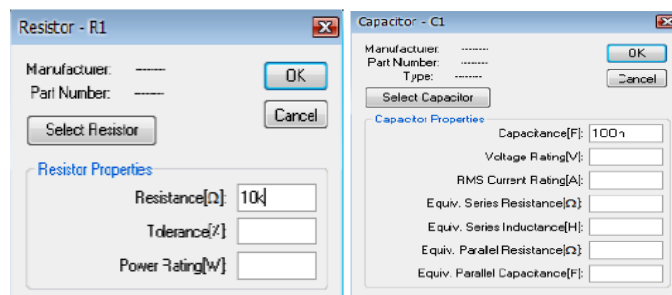
III.2.1. Dessin du circuit :

III.2.1.1. Ajout d'éléments passifs au circuit :

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



- 1) Ctrl-R and Ctrl-M pour le faire tourner ou pour obtenir son symétrique (miroir).
- 2) Bougez la souris à l'endroit où vous souhaitez positionner l'élément.
- 3) Cliquez gauche pour fixer l'élément.
- 4) Apparition dans le Schematic de la résistance et du condensateur.
- 5) Cliquez droit sur le symbole du composant pour modifier sa valeur.



- Les différentes unités possibles sont :

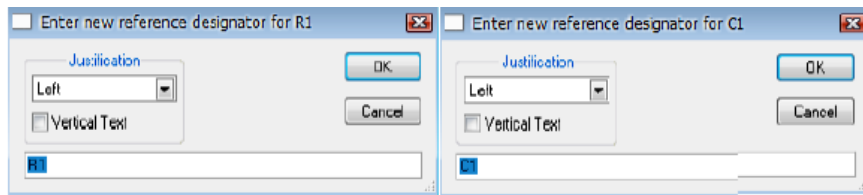
M=m	U=μ	N=n	P=p	F=f	K=k	Meg	G=g	T=t
10 ⁻³	10 ⁻⁶	10 ⁻⁹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹⁵	10 ³	10 ⁶	10 ⁹	10 ¹²
milli	micro	nano	pico	femto	kilo	méga	giga	terra

Tableau III-1 : Les différentes unités possibles dans LTspice

- Unités utilisées : sont I_s unités du système international.


a) Changement du nom de composant :

Clique droit sur le nom actuel




Chaque type de composant peut être placé plusieurs fois de suite, et ils seront automatiquement numérotés

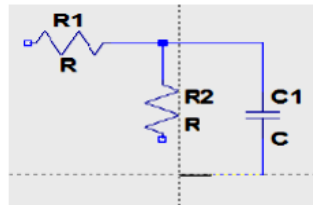
b) Placement des composants :

- Pour déplacer les pièces, cliques sur move icône 
- Vous sélectionnez les composants et faits-les glisser où le voulez.

c) Connexions du circuit :

Maintenant que vos pièces sont disposées bien vous aurez à les attacher avec des fils.

- Sélectionnez Dessine-Wire bouton  ou Allez dans Edition
- Cliquez avec le crayon pointeur de la recherche sur l'une des extrémités d'un composant.

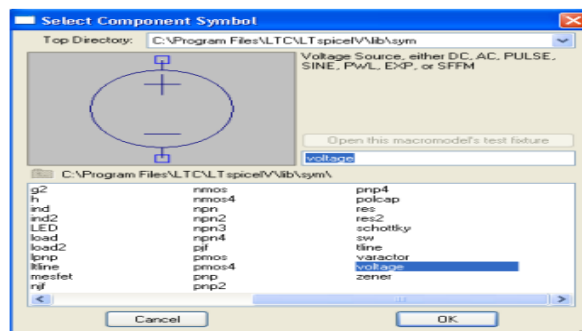


- Branchez l'autre extrémité de votre fil à l'autre partie du composant circuit.
- Répétez cette opération jusqu'à ce que votre circuit soit entièrement câblé.
- Clique droit pour stopper l'option Drawwire.

III.2.1.2. Ajout d'éléments actifs :

a) Source de tension :

- Clique gauche sur le symbole  Component de la barre d'édition Schematic.

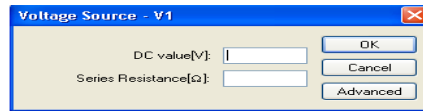


2) Sélectionnez Voltage puis cliquez sur OK. On obtient le symbole suivant dans Schematic pour une source de tension



3) Cliquez droit sur le composant


4) Cliquez sur Advanced



5) Choix entre les différents types de sources de tension: on peut choisir différents signaux de tension

b) Ground :

Il est impératif de mettre une référence de masse sinon aucune simulation ne peut fonctionner. Pour placer la référence de masse :

- 1) Cliquez gauche sur addground. 
- 2) Cliquez gauche à l'endroit où vous voulez la Placer.
- 3) On peut aussi utiliser la touche g comme raccourci.

c) Le label :

Les labels sont utiles si vous désirez utiliser vos propres noms des noeuds (pour trouver plus facilement une tension ou un courant dans le circuit) à la place de la numérotation automatiquement fournie par LTspice.

- Pour ajouter un label,

1) Appuyez sur F4 ou utilisez l'icône

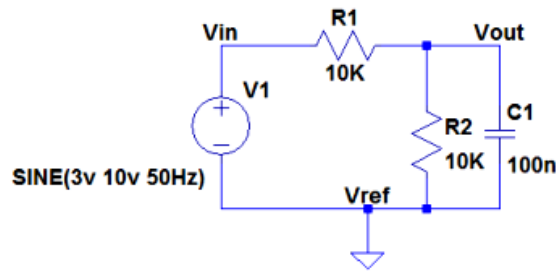
La fenêtre suivante s'ouvrira:



2) Écrivez le nom désiré (la tension d'entrée V_{in} , le potentiel de référence V_{ref} et la tension de sortie V_{out}) puis cliquez sur OK.

3) Cliquez une fois sur un fil du circuit à l'endroit où vous désirez obtenir cette nomenclature.

Nous obtenons le schéma électrique suivant: [71] [72]



III.3. Liste des fonctions :

Voici une liste restreinte des fonctions utilisables dans LTspice.

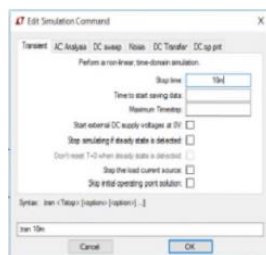
Nom	Fonction
Abs(x)	Valeur absolue
cos(x), sin(x), tan(x), acos(x), asin(x), atan(x), acosh(x), asinh(x), atanh(x)	Fonctions trigonométriques
exp(x), log(x), ln(x), log10(x)	Fonctions logarithmiques
sqrt(x)	Carré

III.4. Simulation :

III.4.1. Paramétrage de la simulation

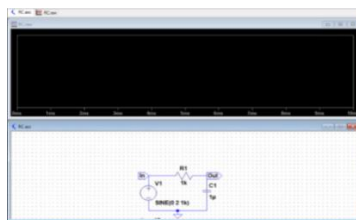
Ouvrir la fenêtre de configuration de la simulation en allant dans Simulate/Edit Simulation Cmd. Une fenêtre s’ouvre.

Les deux types de simulation que nous utiliserons le plus sont : la simulation temporelle (onglet Transient) et la simulation fréquentielle (diagramme de Bode), onglet AC analysis. [42]

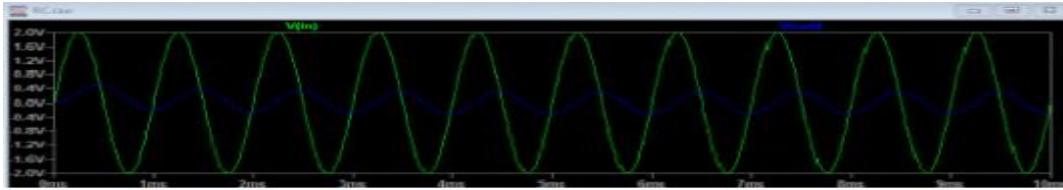


III.4.2. Simulation temporelle [68]

Dans la case Stop time, entrez la valeur 10m (cela demande évidemment un petit calcul de période). Puis appuyez sur Ok : la fenêtre se divise en deux avec une partie graphique.



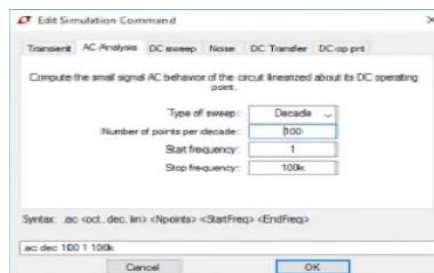
Pour ajouter une courbe, on peut promener la souris à l'endroit voulu sur le circuit (par exemple In et Out ici) et cliquer pour tracer.



On peut aussi utiliser le menu Plot settings qui contient de nombreuses options.

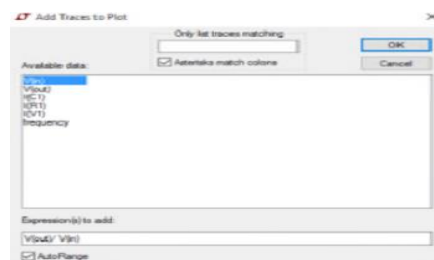
III.4.3. Simulation fréquentielle [68]

Rouvrir la fenêtre de configuration. Cliquer sur l'onglet AC analysis. Et entrez les valeurs suivantes:



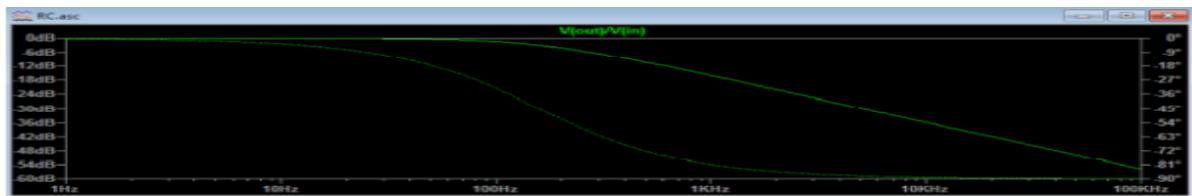
Lancez la simulation.

Allez ensuite dans Plot Settings/Add Trace. Et entrez Vout/Vin comme ci-dessous :



Remarque : dans la configuration de la source de tension, si on a bien choisi 1 V pour Small signal AC analysis, on peut ne tracer que Vout.

On observe alors le diagramme de Bode :



III.5. Application aux redresseurs :

III.5.1. Modèle de redresseur non commandé :

III.5.1.1. Redresseur monophasé simple alternance :

A. Sans filtre :

1) montage :

Le convertisseur de l'étude, présenté dans la Figure III.1, est un redresseur monophasé simple alternance composé d'une source et diode D1N914 avec une charge résistive.

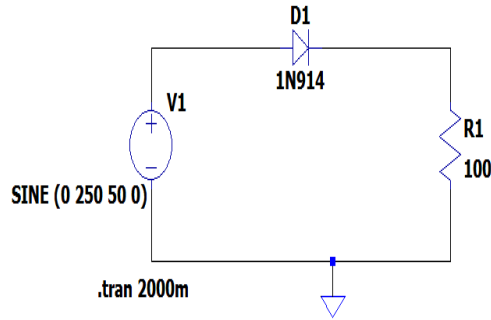


Figure III.1: redresseur monophasé simple alternance non commandé
« Sans filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. Réponses temporelles :

❖ **La tension :**

Les deux figures (III.2–III.3) représentent deux tensions « entrée et sortie ».

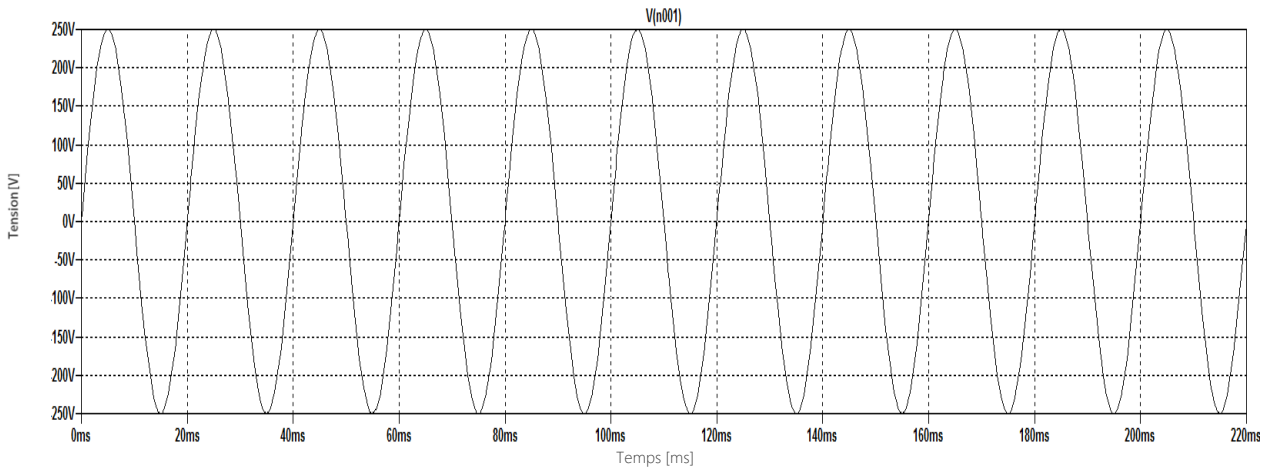


Figure III.2: réponse temporelle de tension d'entrée

Le signal de tension d'entrée est parfaite, sinusoïdale avec une amplitude de 250V

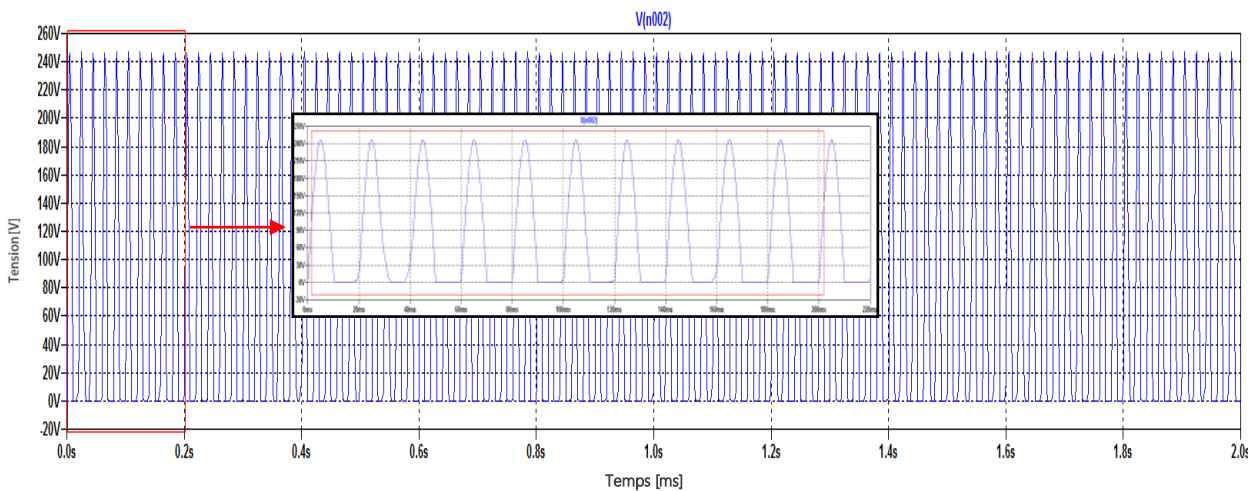


Figure III.3: réponse temporelle de tension du sortie

La tension de sortie est parfaitement redressé, La diode se bloque lorsque la tension à ses bornes est négative, elle supprime les alternances négatives du signal d'entrée et conserve les alternances positives d'une entrée monophasée.

On constate une réduction de l'amplitude du signal d'une valeur de 250v à une valeur de 247v (signale de sortie).

❖ Le courant:

Les deux figures (III.4–III.5) représentent deux courants « entrée et sortie ».

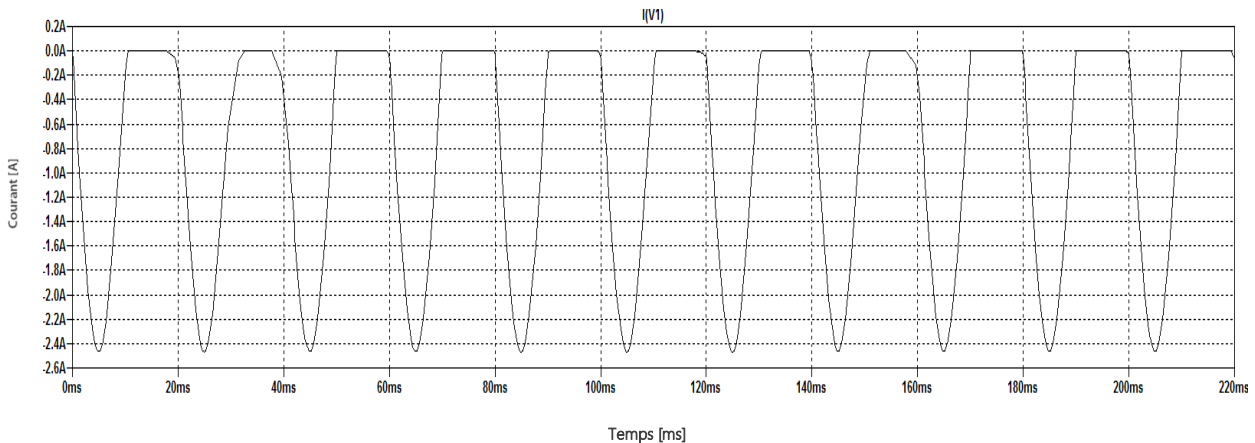


Figure III.4: réponse temporelle de courant d'entrée

Le signal du courant d'entrée est parfaitement redressé à une amplitude de 2.47A, à l'inverse de signal de sortie.

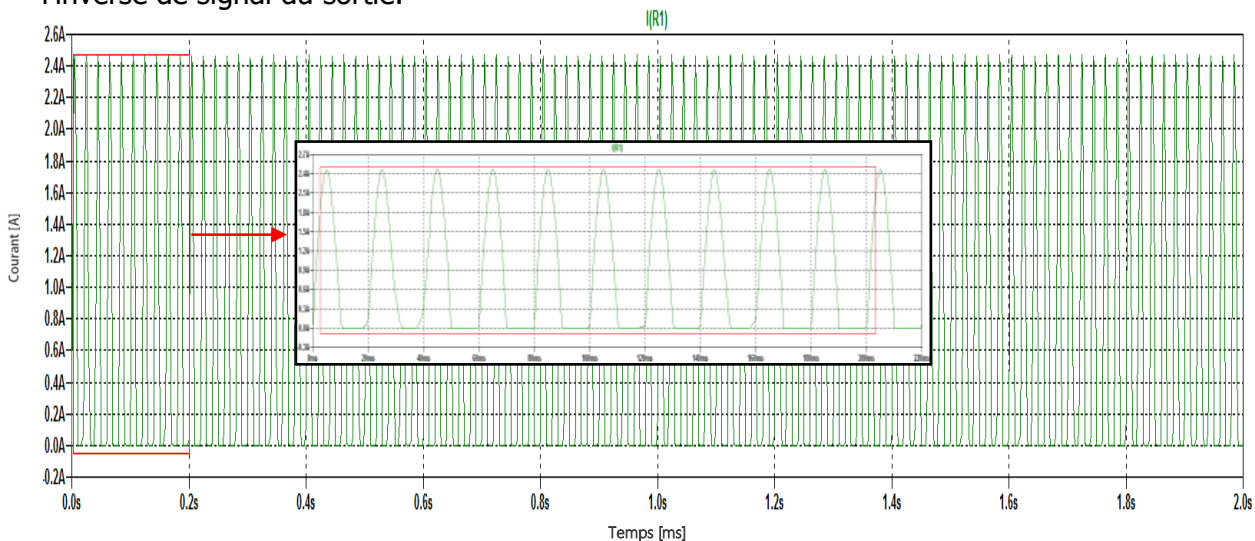


Figure III.5: réponse temporelle de courant de sortie

Le courant de sortie est parfaitement redressé à une amplitude de 2.47A, c'est le même principe de tension, la diode conserve une partie de l'alternance positive du signal d'entrée et coupe la partie négative.

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.6 montre la réponse fréquentielle du tension sans filtre (Fig. III.1) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « monophasé non commandé »

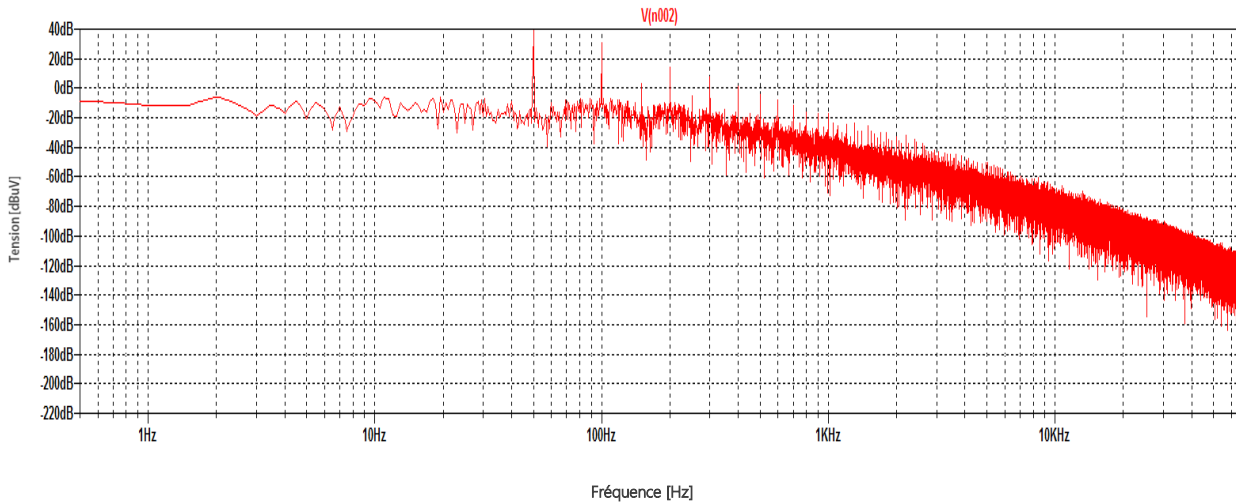


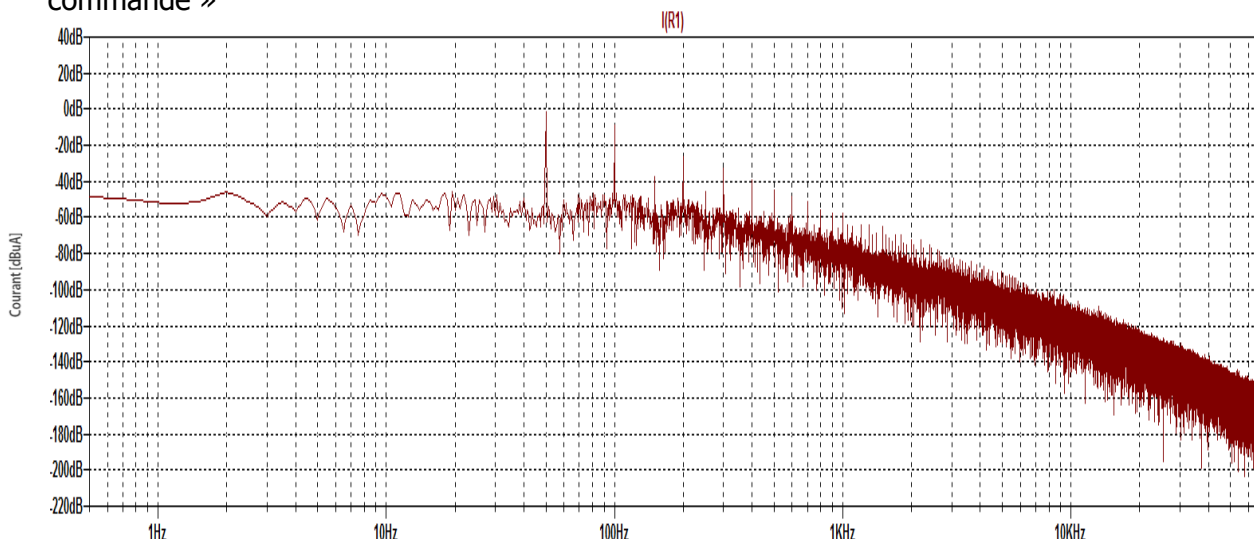
Figure III.6: réponse fréquentielle de tension du sortie

Nous constatons que le spectre dans le domaine fréquentiel présente des niveaux des perturbations importants est plus élevée d'amplitude de -6 dB à -14 dB aux environs de 10 Hz à 1KHz. A partir de cette dernière et jusqu'à 10 KHz et plus, on voit que le spectre d'amplitude de -37 dB à -123 dB présente des perturbations plus faibles.

L'analyse de cette réponse fréquentielle montre l'absence des perturbations en très basses fréquences de 500mHz à 50Hz aux environs de -6 dB, mais à partir de ce dernier on voit que le signal a commencé de faire des pics avec des variations rapides d'amplitude et d'oscillations, par ailleurs dans les hautes fréquences (à partir de 100 KHz et plus) nous remarquons une basse importante de perturbation. Ceci nous amène à conclure que les perturbations électromagnétiques sont clairement présentes dans les basses fréquences car en BF, à l'état passant, la diode est symbolisée par une tension continue de 0,7V en série avec une résistance, or, en HF, cette tension continue de 0,7 V n'est pas polluante car dénuée d'harmoniques.

❖ Le courant:

La figures III.7 montre la réponse fréquentielle du courant sans filtre (Fig. III.1) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « monophasé non commandé »



Fréquence [Hz]

Figure III.7: réponse fréquentielle de courant du sortie

La figure présente le spectre dans le domaine fréquentiel pour les niveaux des perturbations, l'analyse de la réponse fréquentielle montre toujours la présence des perturbations conduites dans les basses fréquences où on remarque l'absence de perturbation dans les amplitudes de -48dB à -46dB aux environs de 2 Hz à 50 Hz, puis on constate l'apparition des pics à partir de cette dernière jusqu'à 100 Hz. À haute fréquence les perturbations deviennent faibles.

En BF, lorsque la diode est ouverte, aucun courant ne circule, ce qui n'est pas le cas en HF. En effet, la diode ouverte à la capacité parasite à ses bornes. L'impédance de cette capacité est considérée infinie en BF et très faible en HF. Donc, les courants parasites peuvent traverser cette diode ouverte en HF.

B. Avec un filtre :

1) Montage :

Le convertisseur de l'étude, présenté dans la Figure III.8, est un redresseur monophasé simple alternance composée d'une diode D1N914 en série et un condensateur en parallèle avec une charge résistive.

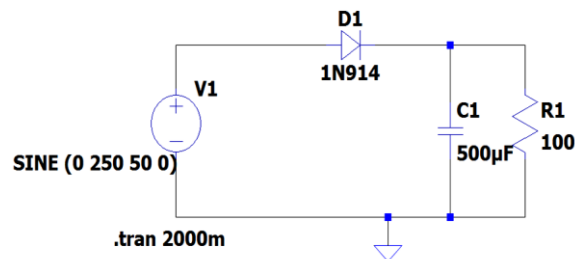


Figure III.8:redresseur monophasé simple alternance non commandé
« Avec un filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. Réponses temporelles :

❖ La tension :

La figure III.9 représente un signal de tension du sortie.

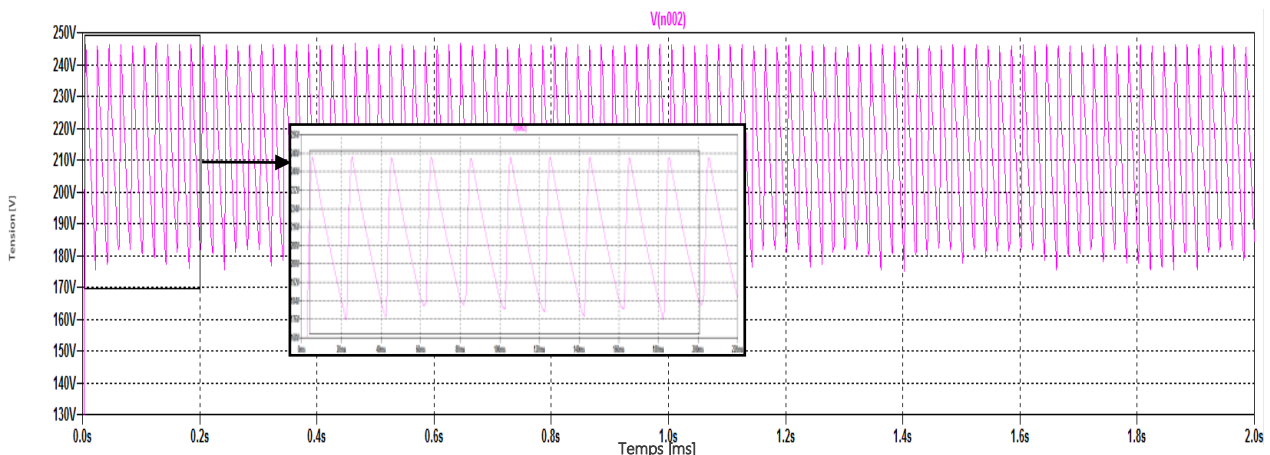
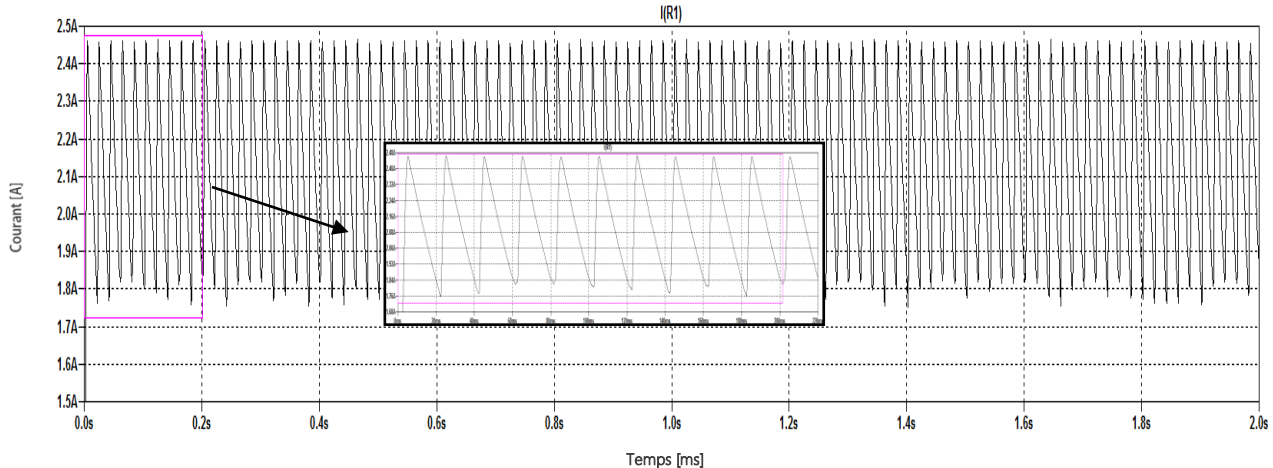


Figure III.9:réponse temporelle de tension du sortie

Le signal obtenu a une tension crête à crête inférieure par rapport au montage sans filtrage. Cependant, on peut obtenir un signal plus lisse en utilisant un condensateur filtre d'une grande capacité, le signal est d'amplitude de 247 V.

❖ Le courant:

La figure III.10 représente un signal de courant du sortie.

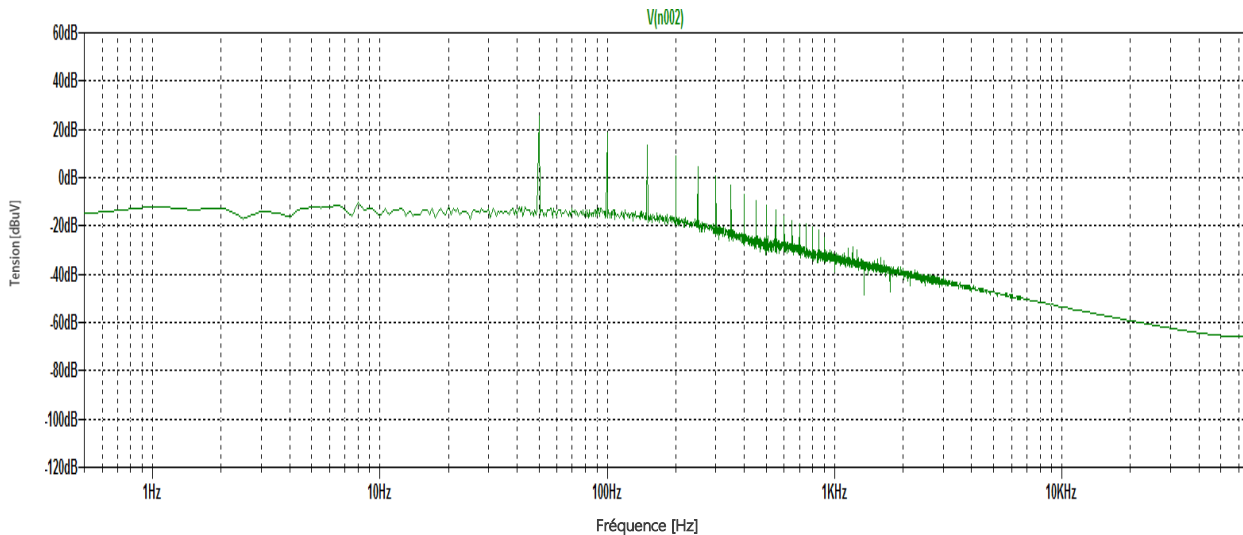
**Figure III.10:**réponse temporelle de courant du sortie

Le signal de courant du sortie est fortement ondulé, d'amplitude de 2.46A, il est donc nécessaire de limiter ces ondulations par un dispositif de filtrage.

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.11 montre la réponse fréquentielle du tension du circuit avec un filtre (Fig. III.7) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "monophasé non commandé".

**Figure III.11:**réponse fréquentielle de tension du sortie

On voit clairement que le spectre est globalement réduit, c'est l'impact de capacité de filtrage qui se trouve en parallèle à la charge. Il y a également l'apparition de quelques pics

de fréquence de résonance entre 80 Hz et 1KHz dû à la capacité de parasite de la diode. Les perturbations sont négligeables dans les hautes fréquences.

❖ Le courant:

La figure III.12 montre la réponse fréquentielle du courant du circuit avec un filtre (Fig. III.7) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "monophasé non commandé".

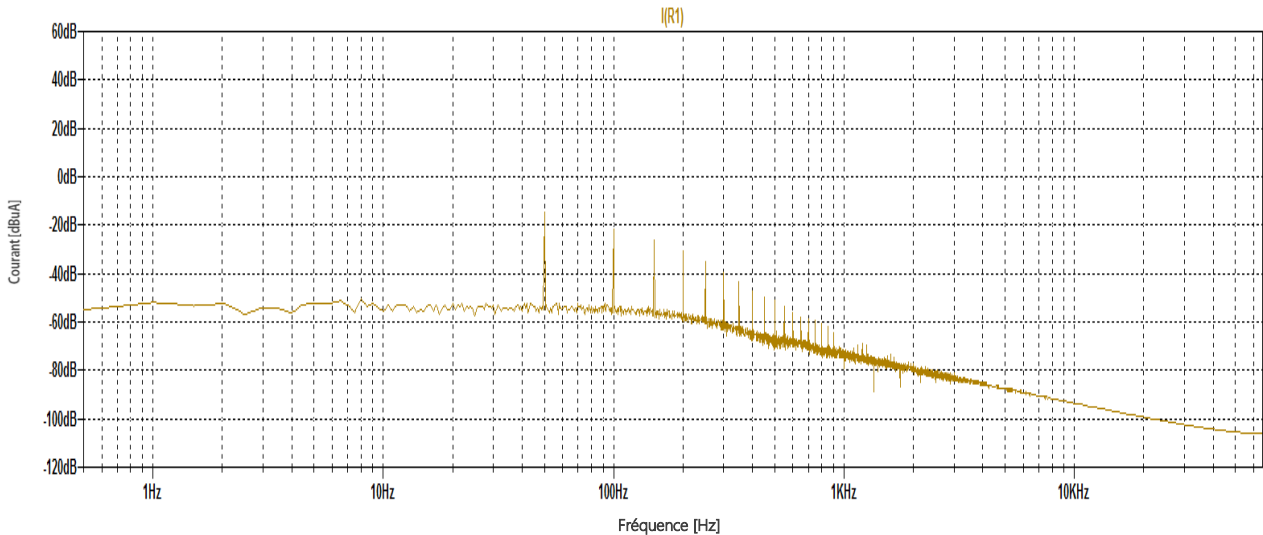


Figure III.12:réponse fréquentielle de courant du sortie

On observe nettement que les perturbations sont négligeables dont l'amplitude du spectre décroît à -54.8 dB, à la basse fréquence par rapport ce qu'on a vu pour le redresseur monophasé non commandé sans filtre.

On constate des pics des résonances dans les fréquences de 50 Hz à 1 KHz, à cette dernière les perturbations diminuent jusqu'à sa disparition à haute fréquence.

III.5.1.2. Redresseur en pont de diode :

A. Sans filtre :

1) Montage :

Le convertisseur de l'étude, présenté dans la Figure III.13, est un redresseur en pont diode composée de quatre diodes 1N4148 avec une source et une charge résistive.

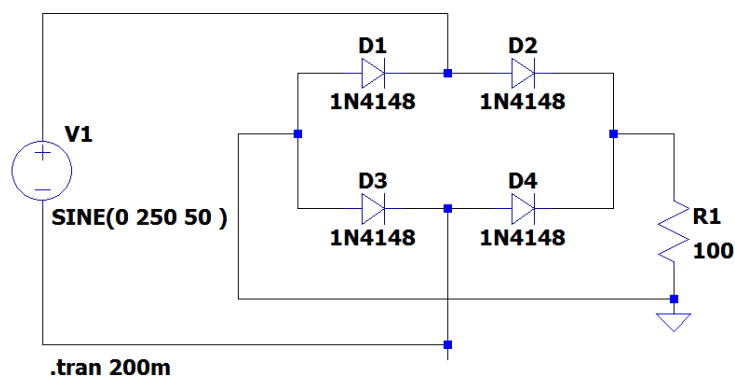


Figure III.13: redresseur en pont diode « sans filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

Les deux figures (III.14–III.15) représentent les deux tensions « entrée et sortie » respectivement .

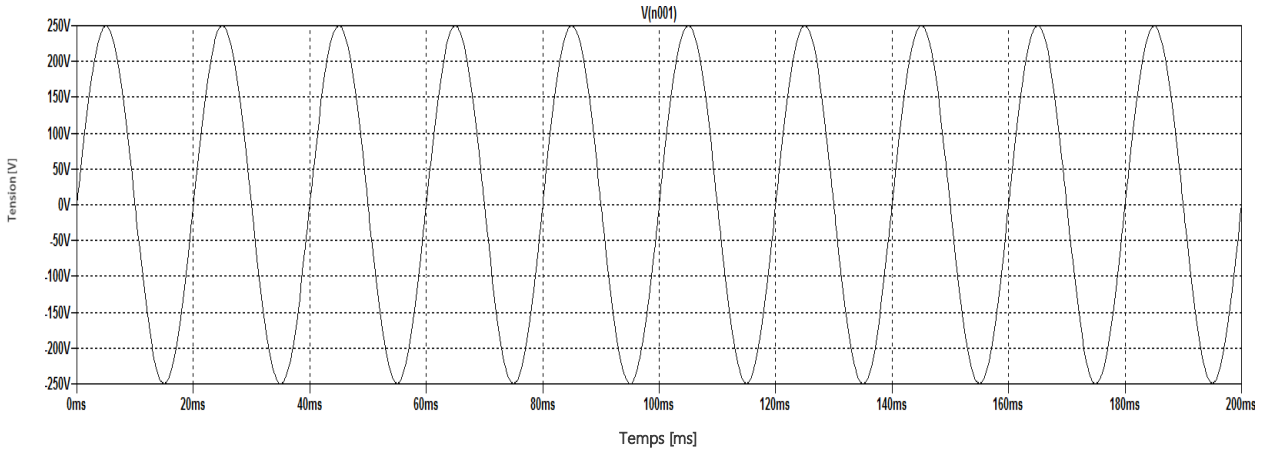


Figure III.14: réponse temporelle de tension d'entrée

Le signal de tension d'entrée est parfaitement sinusoïdal avec une amplitude de 244V

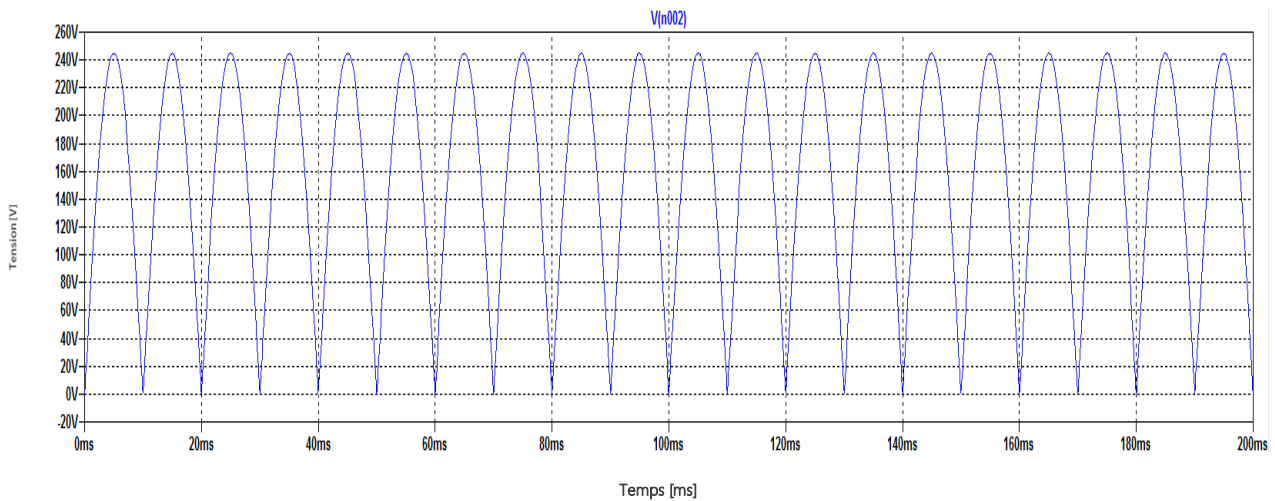
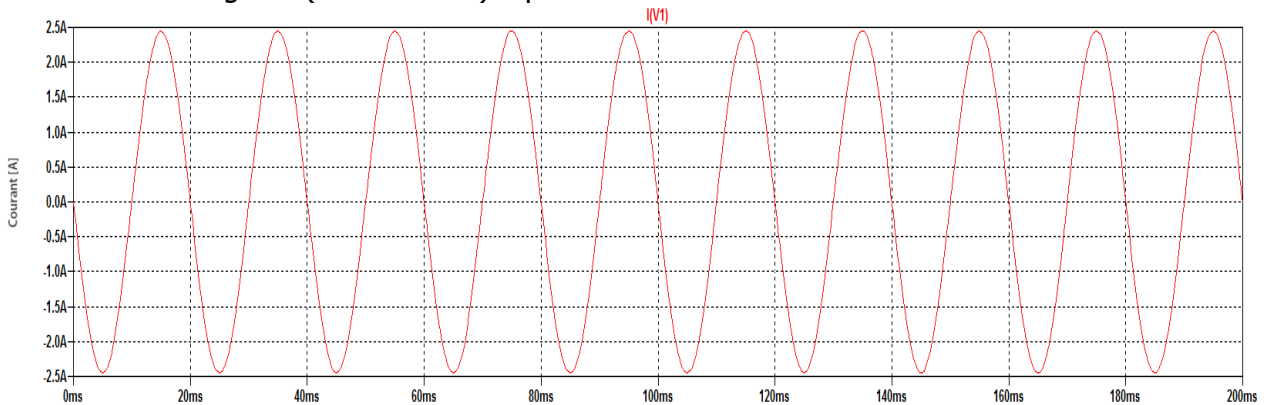


Figure III.15: réponse temporelle de tension du sortie

On constate les mêmes résultats à celui du redresseur monophasé simple alternance (fig. III.3).

❖ Le courant:

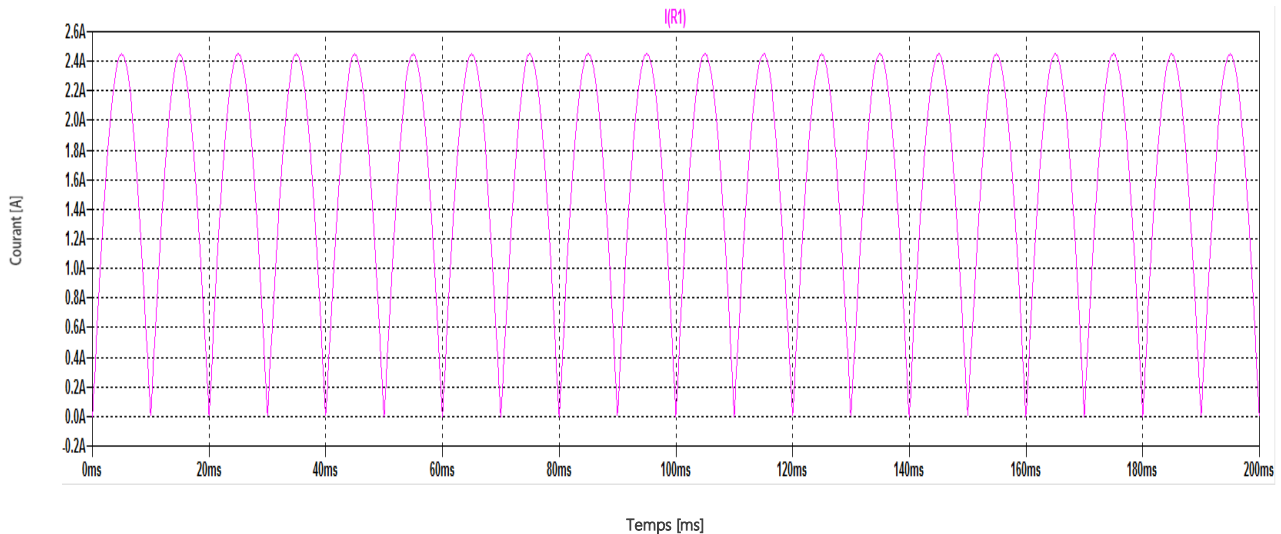
Les deux figures (III.16–III.17) représentent deux courants « entrée et sortie ».



Temps [ms]

Figure III.16: réponse temporelle de courant d'entrée

Le signal du courant d'entrée est parfaitement redressé à une amplitude de 2.47A.



Temps [ms]

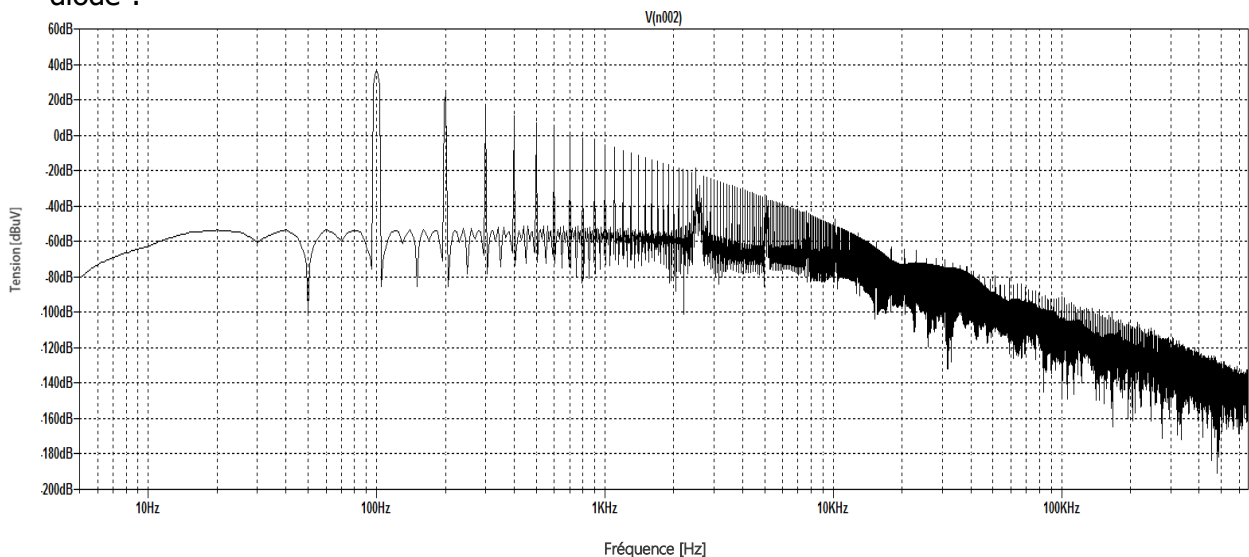
Figure III.17: réponse temporelle de courant du sortie

On constate les mêmes résultats à celui du redresseur monophasé simple alternance (fig. III.4).

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.18 montre la réponse fréquentielle de la tension du circuit sans filtre (Fig. III.13) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur " en pont de diode".

**Figure III.18:** réponse fréquentielle de tension du sortie

Le spectre dans le domaine fréquentiel nous montre une légère perturbation d'amplitude à -80 dB aux environs de 10 Hz, et du 30 Hz à 1 KHz le signal présente des pics de résonances d'amplitude de 36.96 dB à -63.4 dB et des variations rapides de perturbation à

cause des capacités de parasite des diodes, et au-delà à haute fréquence les perturbations sont négligeables.

On voit que le signal présente à basse fréquence des variations rapides d'amplitudes et d'oscillations, par ailleurs dans les hautes fréquences (à partir de 1 KHz et plus) nous remarquons une baisse importante de perturbations car la tension continue de 0,7 V n'est pas polluante car elle est dénuée d'harmoniques.

Ceci nous amène à conclure que les perturbations électromagnétiques sont clairement présentes dans les basses fréquences.

❖ Le courant:

La figure III.19 montre la réponse fréquentielle du courant du circuit sans filtre (Fig. III.13) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "en pont de diode".

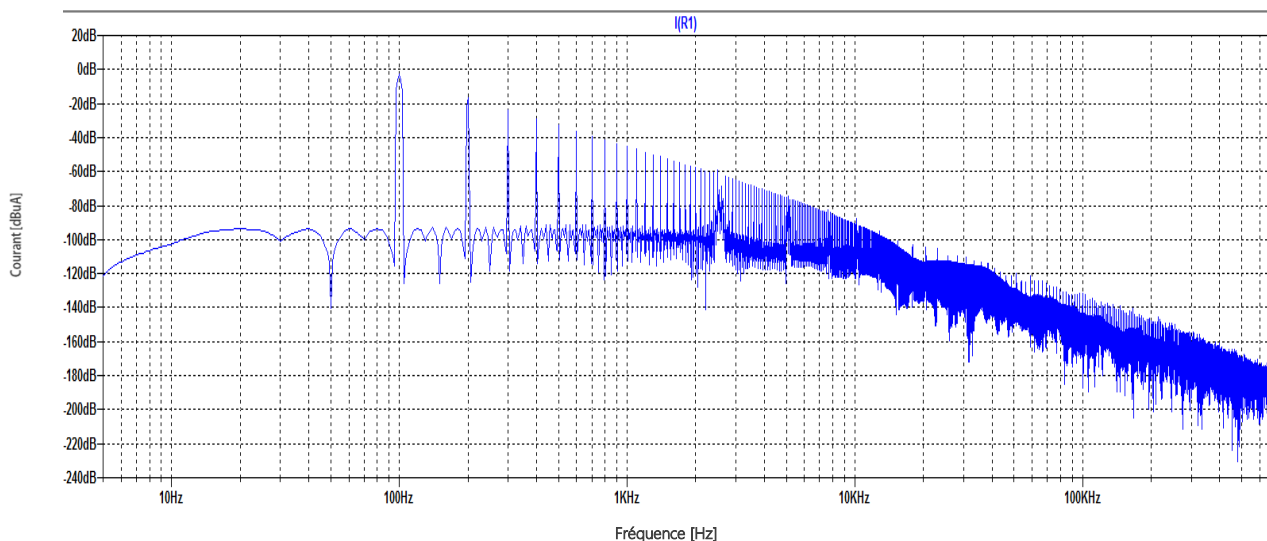


Figure III.19:réponse fréquentielle de courant du sortie

Le spectre dans le domaine fréquentiel nous montre une légère perturbation d'amplitude à -120 dB aux environs de 10 Hz, et du 30 Hz à 1 KHz le signal présente des pics de résonances d'amplitude de -3 dB et - 46 dB.

Pour les niveaux des perturbations, l'analyse de la réponse fréquentielle montre toujours la présence des perturbations conduites dans les basses fréquences d'amplitude entre -3 dB et - 46 dB aux environs de 30 Hz à 1 KHz, avec présence toujours des pics de résonance de fréquence qui sont dues à une capacité parasite dont son impédance est considérée infinie en BF et très faible en HF. À haute fréquence (à partir de 100 KHz et plus), on remarque une faible perturbation électromagnétiques.

B. Avec un filtre :

1) Montage :

Le convertisseur d'étude, présenté dans la Figure III.8, est un redresseur en pont de diode composée de quatre diodes de type 1N4148 et un condensateur de filtrage en parallèle avec une charge résistive.

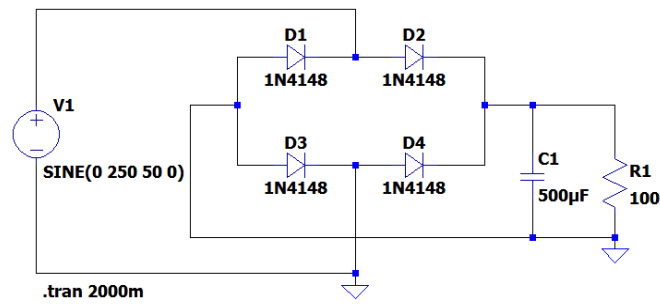


Figure III.20:redresseur en pont de diode
« Avec un filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

La figure III.21 représente un signal de courant du sortie.

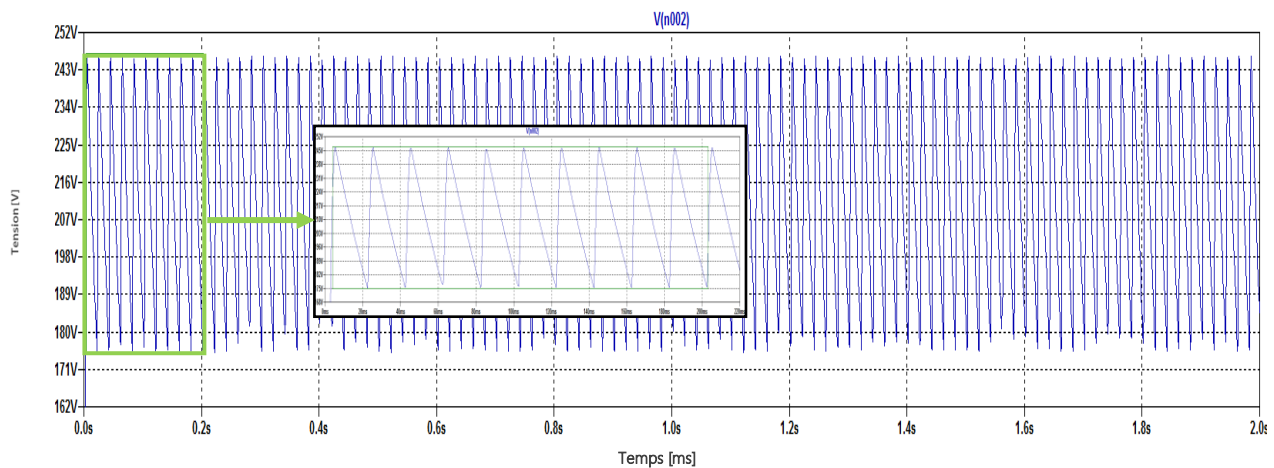


Figure III.21: réponse temporelle de tension du sortie

On constate les même résultats à celui du redresseur monophasé simple alternance (fig. III.8).

❖ Le courant:

La figure III.22 représente un signal de courant de la sortie.

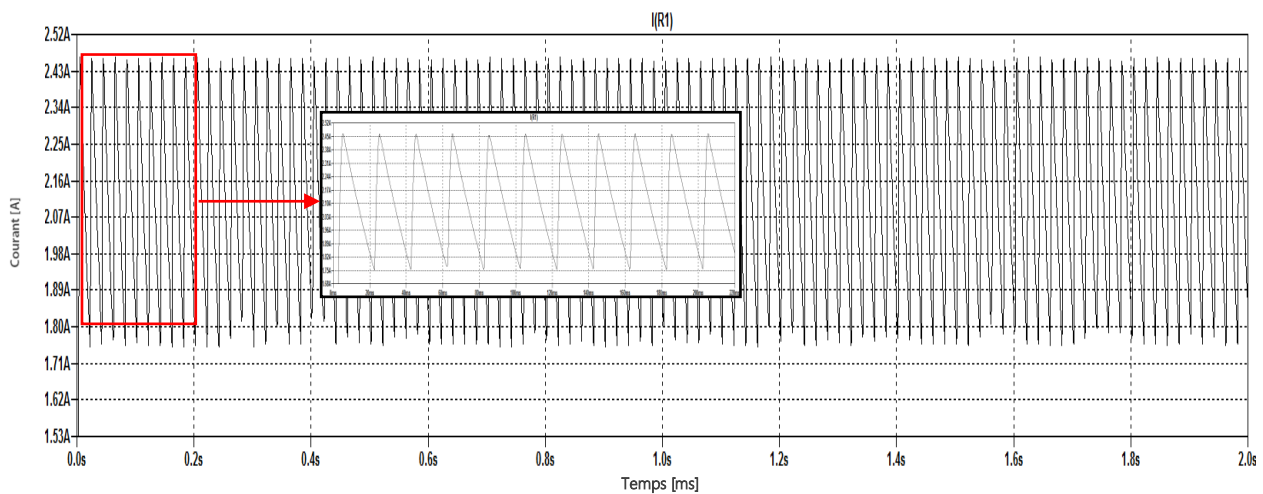


Figure III.22: réponse temporelle de courant du sortie

On constate les même résultats à celui du redresseur monophasé simple alternance (fig. III.9).

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.23 montre la réponse fréquentielle de la tension du circuit d'étude avec filtre (Fig. III.20) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "en pont de diode".

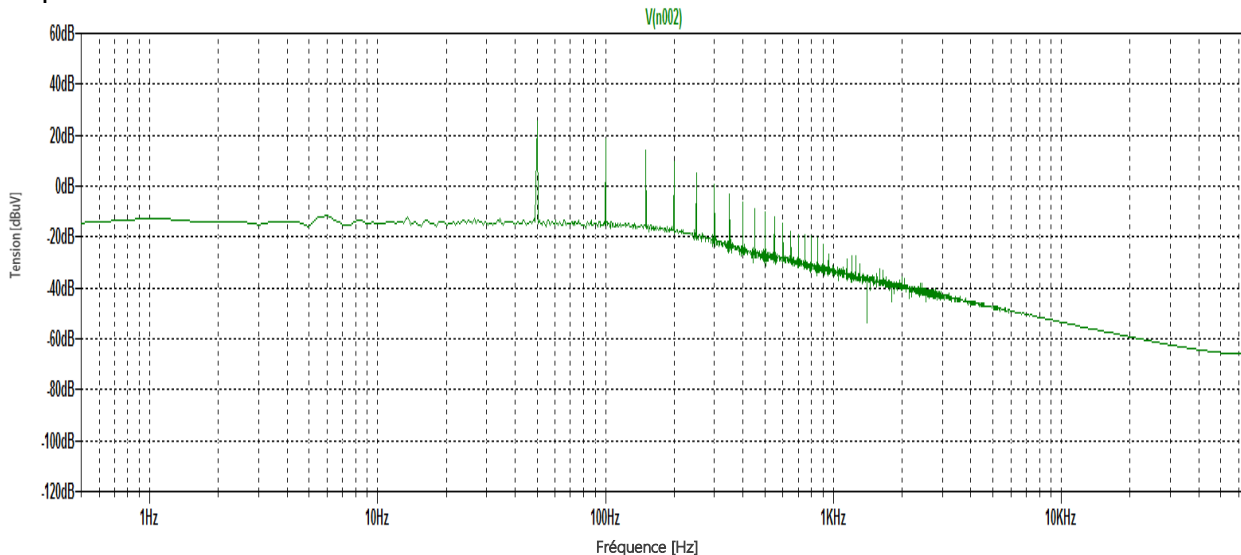


Figure III.23: réponse fréquentielle de tension du sortie

La figure représente le spectre dans le domaine fréquentiel de la tension de sortie, on remarque que le signal présente moins de perturbations électromagnétiques par rapport au spectre (fig. III.11) dont l'amplitude du signal varie de -14,4 dB à -50 dB jusqu'à la fréquence de 10Khz.

On voit clairement que le spectre est globalement réduit, c'est l'impact de capacité de filtrage. Il y a également l'apparition d'un pic de fréquence de résonance entre 80 Hz et 10 K Hz, dû à la capacité de parasite. Par contre, au de la de 10Khz et plus le signal est totalement lisse.

❖ Le courant:

La figure III.24 montre la réponse fréquentielle du courant du circuit d'étude avec un filtre (Fig. III.20) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "en pont de diode".

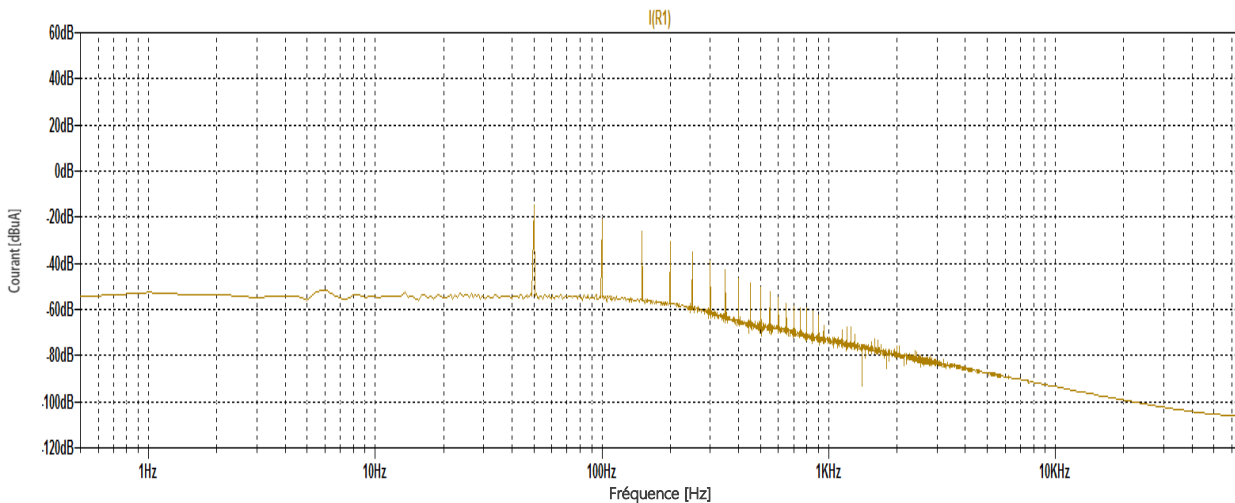


Figure III.24: réponse fréquentielle de courant du sortie

Dans ce spectre, on constate que le signal est moins perturbé d'amplitude de -59.4 dB par au spectre de la figure III.12.

On observe nettement les perturbations dont l'amplitude du spectre décroît par rapport au spectre sans filtre (fig. III.19).

De 80 Hz à 1KHz, nous remarquons des pics de résonance à cause de l'impédance de la capacité parasite qui est considérée infinie en BF et très faible en HF, puis à partir du 10KHz les perturbations diminuent puis s'annulent à la haute fréquence.

III.5.1.3. Redresseur triphasé PD3 :

A. Sans filtre :

1) montage :

La figure suivante donne le schéma électrique de montage PD3. Il est composé de trois sources et six diodes ainsi la charge résistive.

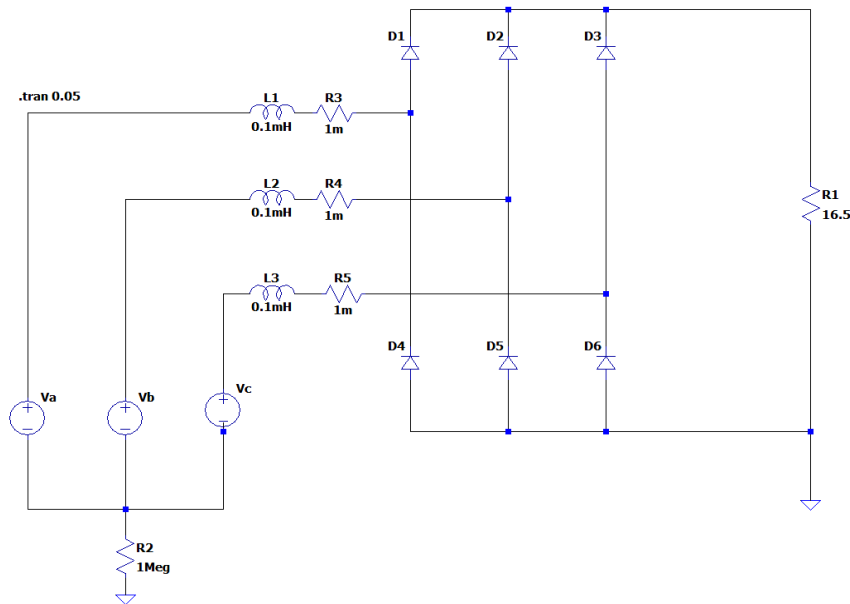


Figure III.25: montage redresseurPD3non commandé
«Sans filtre » [74]

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

Les figures (III.26-III.27) représentent les tensions d'entrée et les tensions de sortie respectivement entre les diodes.

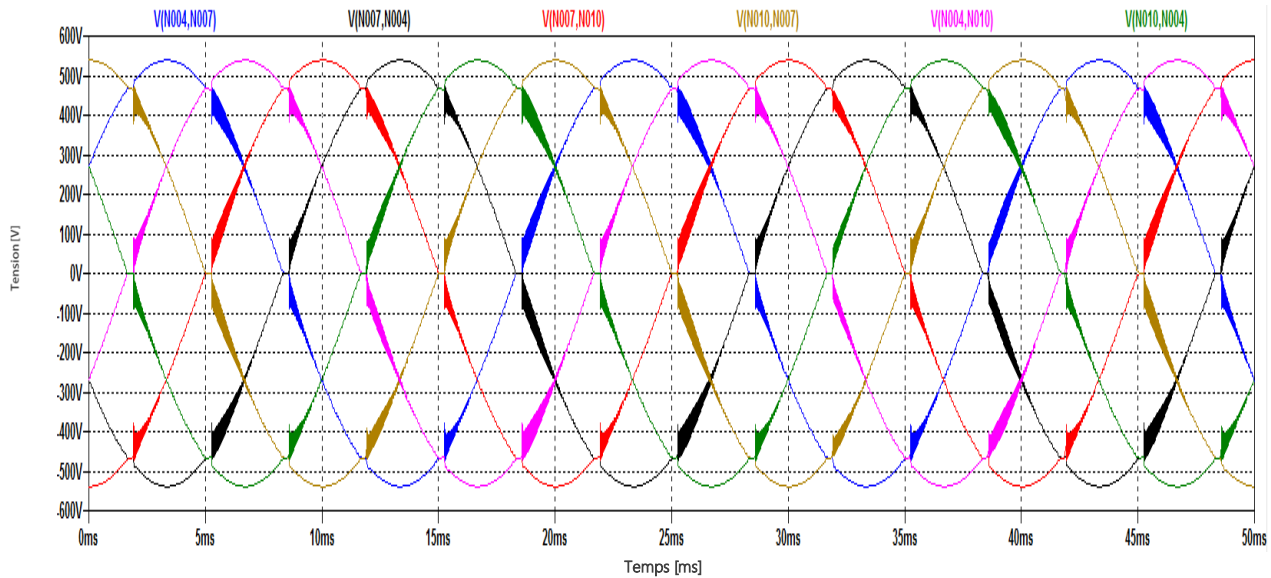


Figure III.26: les six signaux de tension d'entrée

Ce pont est composé de 6 diodes. Les diodes D1, D2 et D3 sont amorcés pendant l'alternance positive des tensions v_1 , v_2 et v_3 . Les diodes D4, D5 et D6 sont amorcés pendant l'alternance négative.

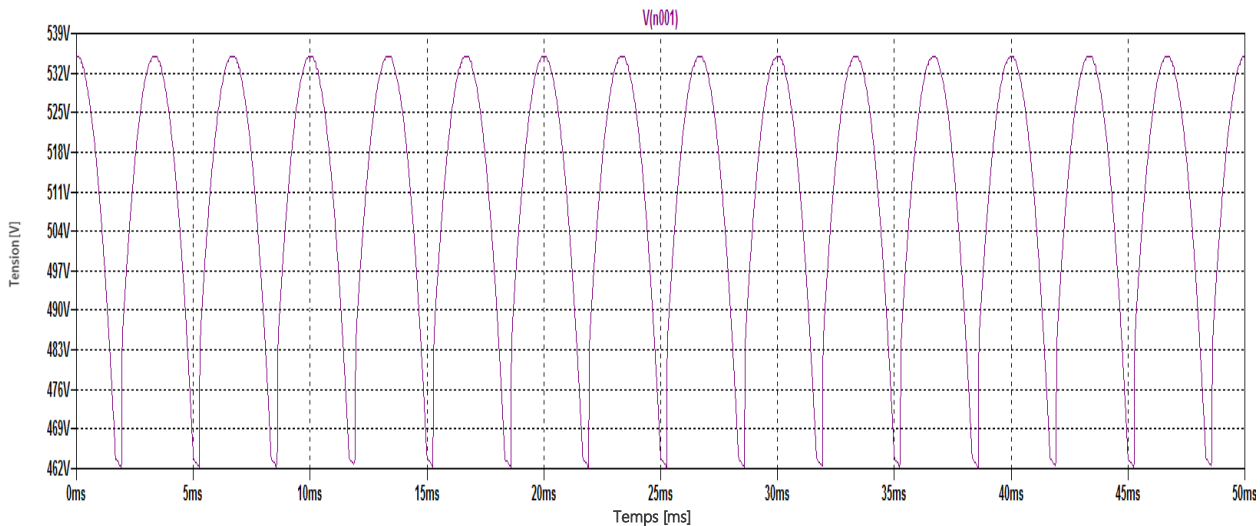


Figure III.27: réponse temporelle des tensions du sortie

La figure montre des signaux de tension du sortie qui sont parfaitement redressés d'amplitudes 535 V, dont le redresseur triphasé laisse à tout instant le passage de la plus grande des tensions soit positives ou négatives. Les diodes D₁, D₂ et D₃ forment un commutateur qui est le plus élevé « plus positif », et les diodes D₄, D₅ et D₆ forment un commutateur le plus faible « plus négatif ».

❖ Le courant:

La figure III.28 représente les courants de sortie entre les diodes.

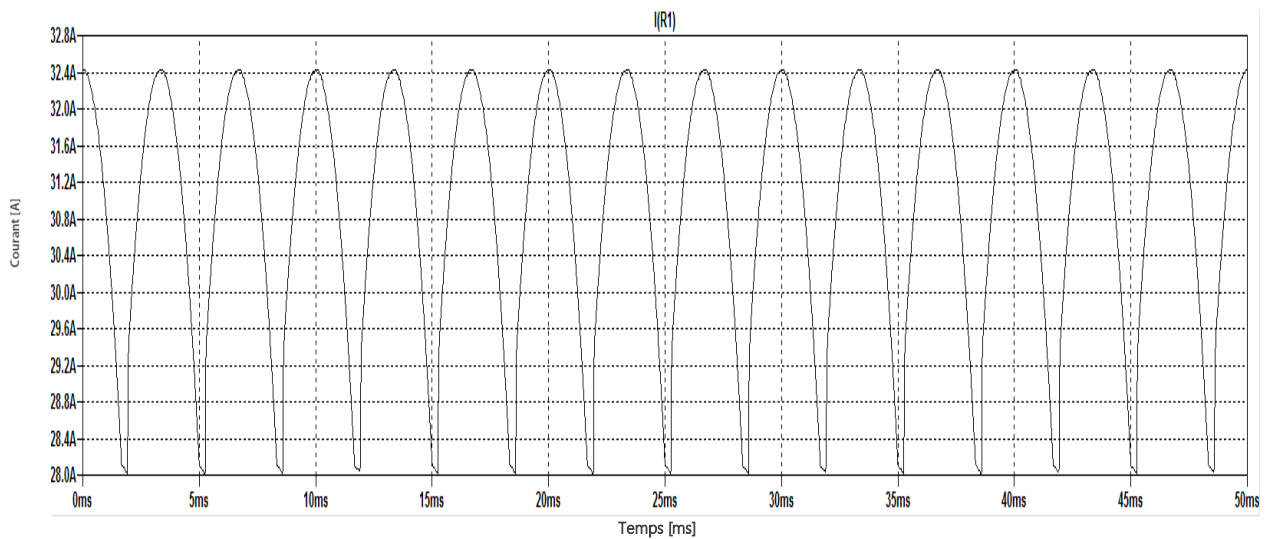


Figure III.28: réponse temporelle signal de courant du sortie

Le courant suit les mêmes évolutions que la tension de sortie d'amplitude de 32,4 A. Dès que la tension s'annule, la diode va se bloquer spontanément avant la fin de sa période de conduction prévue.

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.29 montre la réponse fréquentielle de la tension du circuit sans filtre (Fig. III.25) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « triphasé non commandé »

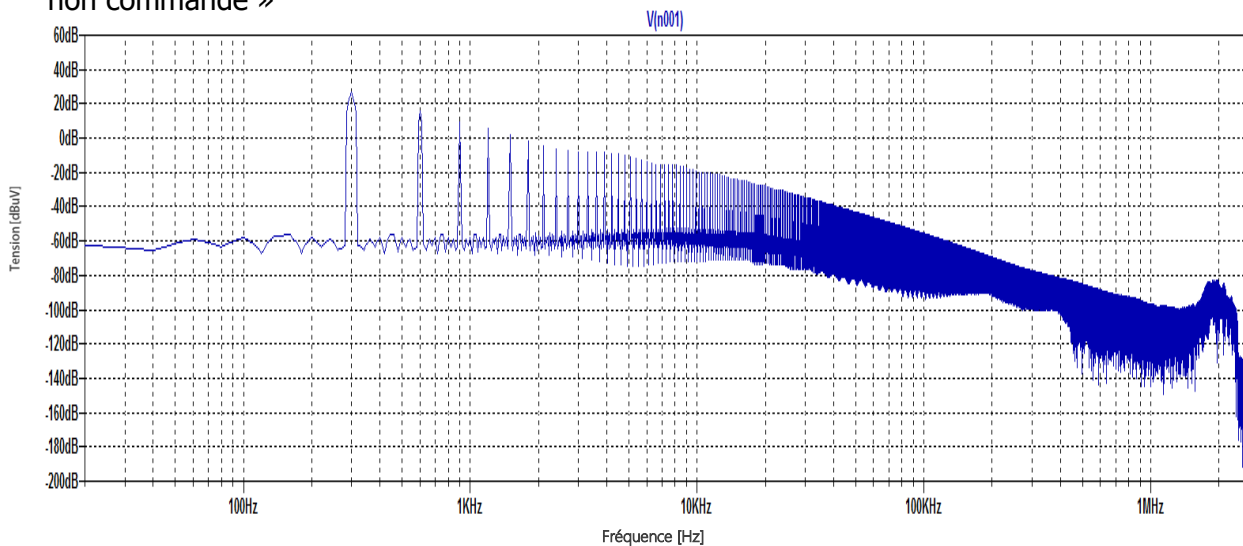


Figure III.29: réponse fréquentielle de tension de la sortie

La figure présente le spectre dans le domaine fréquentiel avec des faibles perturbations d'amplitude de -62 dB aux environs de 100 Hz, A partir de 150Hz jusqu'au 10KHz, il y a présence des pics de résonance avec variation rapide d'amplitude et d'oscillations-

Mais à partir au-delà de 1Mhz nous remarquons un pic de résonance, d'amplitude -80dB, qui est dû aux impédances des capacités de parasite des diodes. Ceci nous amène à conclure

que les perturbations électromagnétiques sont clairement présentes dans les basses fréquences.

❖ Le courant:

La figure III.30 montre la réponse fréquentielle du courant du circuit sans filtre (Fig. III.25) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « triphasé non commandé »

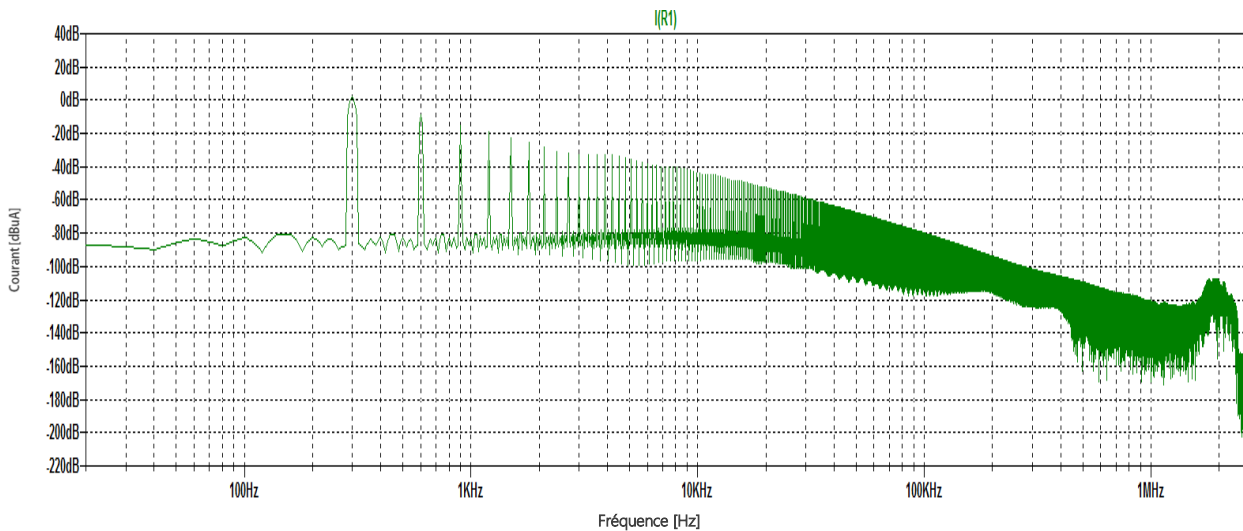


Figure III.30: réponse fréquentielle de courant de sortie

La figure présente le spectre dans le domaine fréquentiel avec des perturbations conduites d'amplitudes importantes de -87 dB aux environs de 100 Hz. A partir de 150 Hz jusqu'au 10 KHz, le spectre présente des pics de résonance avec variation rapide d'amplitude et d'oscillations, dus à la rapidité des commutations des diodes et les impédances parasites BF (résonances). Mais à partir au-delà de 1 MHz, nous avons un pic de résonance, d'amplitude -110 dB, qui est dû aux inductances des capacités de parasite des diodes.

B. Avec un filtre :

1) Montage :

La figure suivante donne le schéma électrique du montage PD3. Il est composé de trois sources et six diodes ainsi le condensateur et la charge résistive.

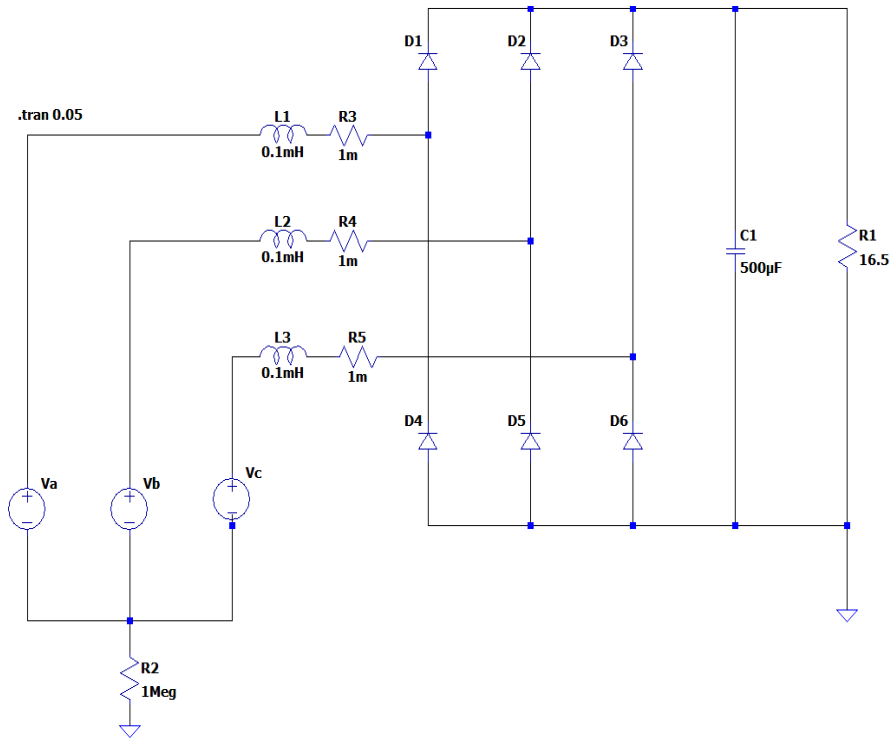


Figure III.31: schéma électrique de redresseur triphasé non commandé « Avec filtre» [74]

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ **La tension :**

Les deux figures (III.32-III.33) montrent la tension de phase et les combinaisons résultantes de tensions composées à partir d'une source triphasée équilibrée.

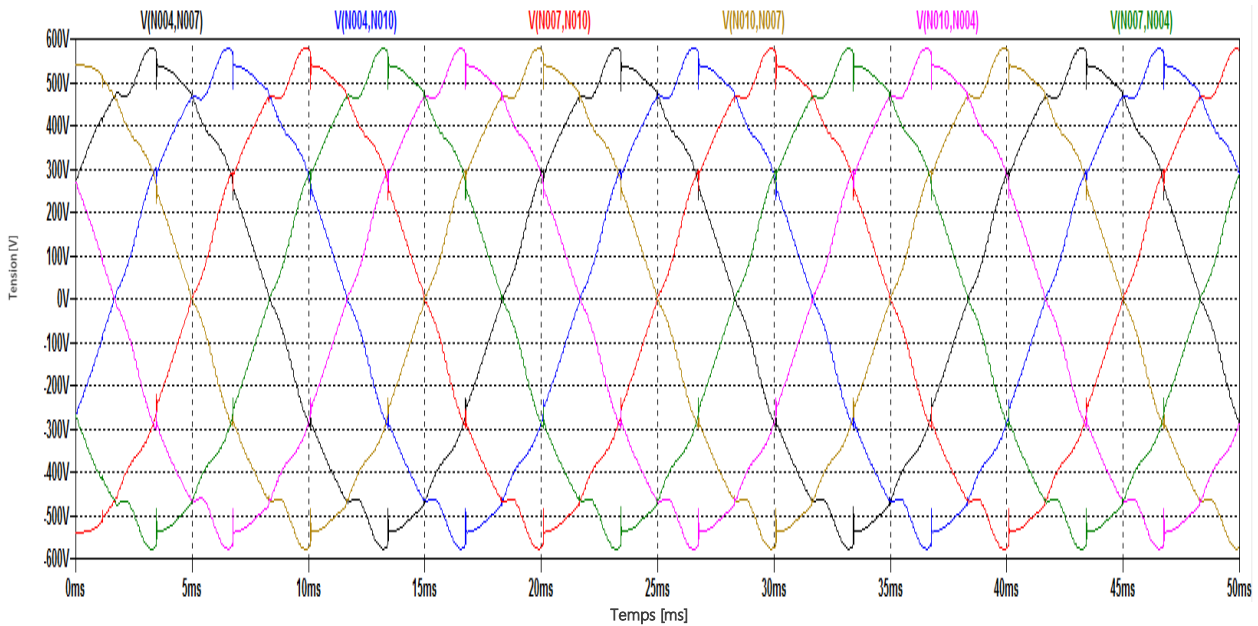


Figure III.32: les six signaux de tension d'entrée

La figure montre six signaux de tension, différents, chaque signal à son propre amplitude et perturbations avec diminution des perturbations causé par un filtre.

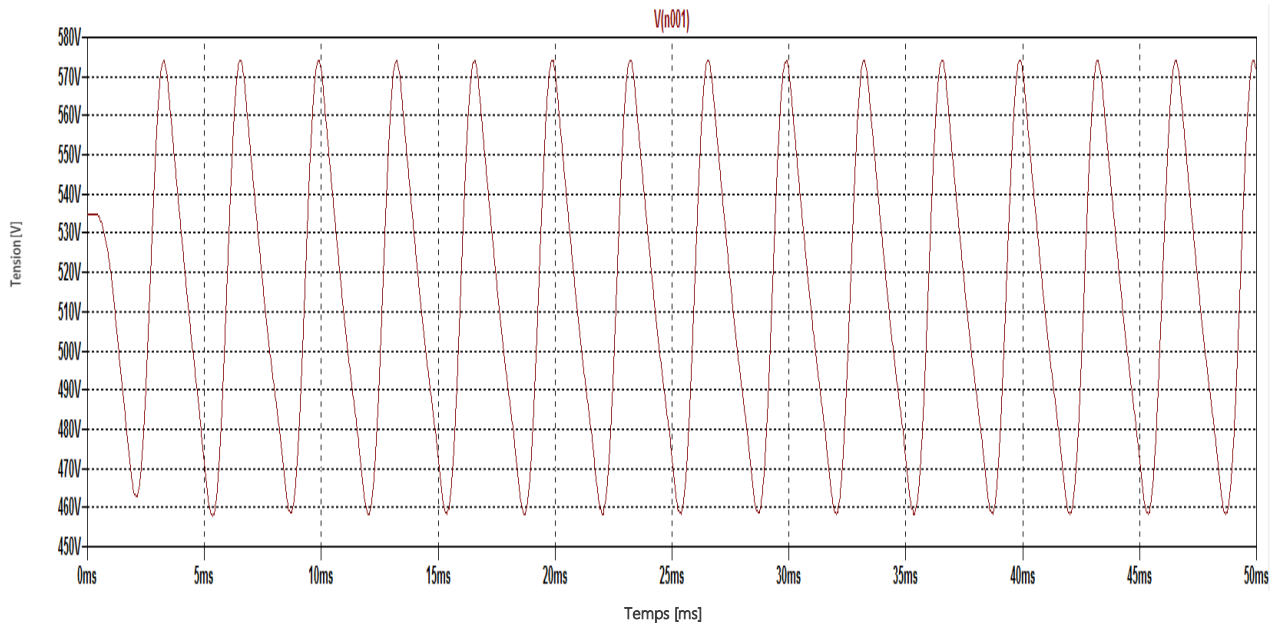


Figure III.33: réponse temporelle de tension du sortie

Ce signal présente des résultats des tensions d'entrée du circuit avec un filtre, le début du signal ce fait avec une amplitude de 535 V,

Il semble que ce signal est similaire à la courbe sinusoïdale à une unité de temps de 2ms à 5ms. A cette période le signal diminue jusqu'au point de 462V puis il augmente vers 573V.

❖ Le courant:

Le courant suit les mêmes évolutions que la tension de sortie...

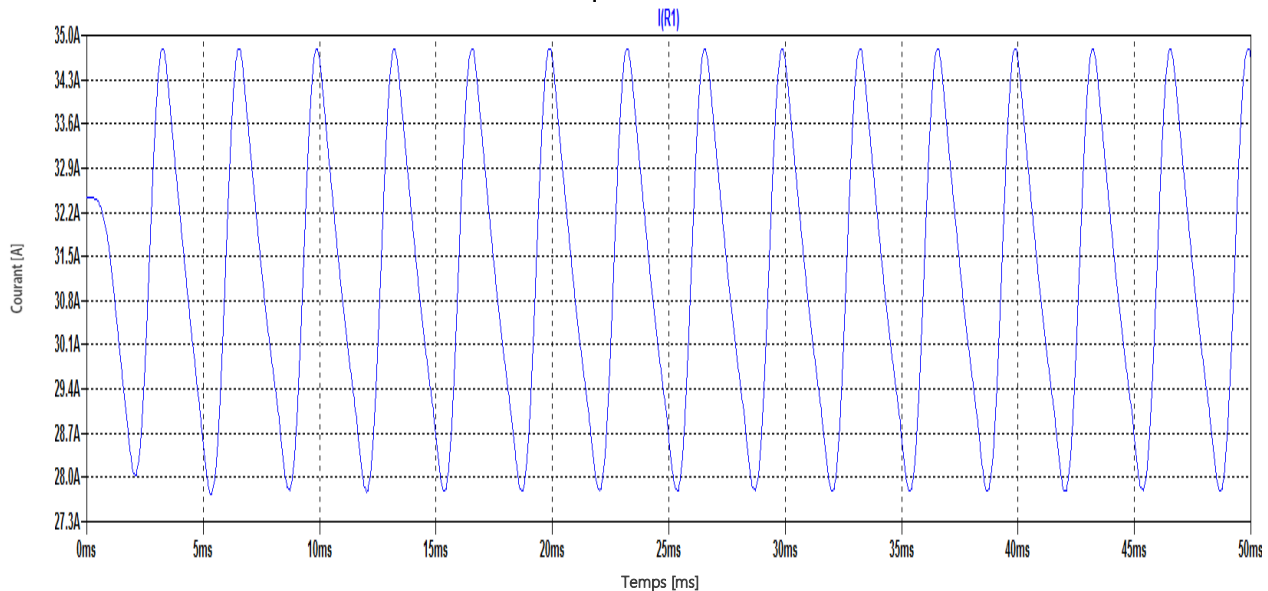


Figure III.34: réponse temporelle de courant du sortie

Le courant suit les mêmes évolutions que la tension de sortie avec une amplitude de 32.4A.

De 0ms à 5ms la courbe est similaire à la courbe sinusoïdale dont l'amplitude est respectivement de 28 A et 34.7 A.

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.35 montre la réponse fréquentielle du tension reliée par un filtre (Fig. III.31) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "triphasé non commandé".

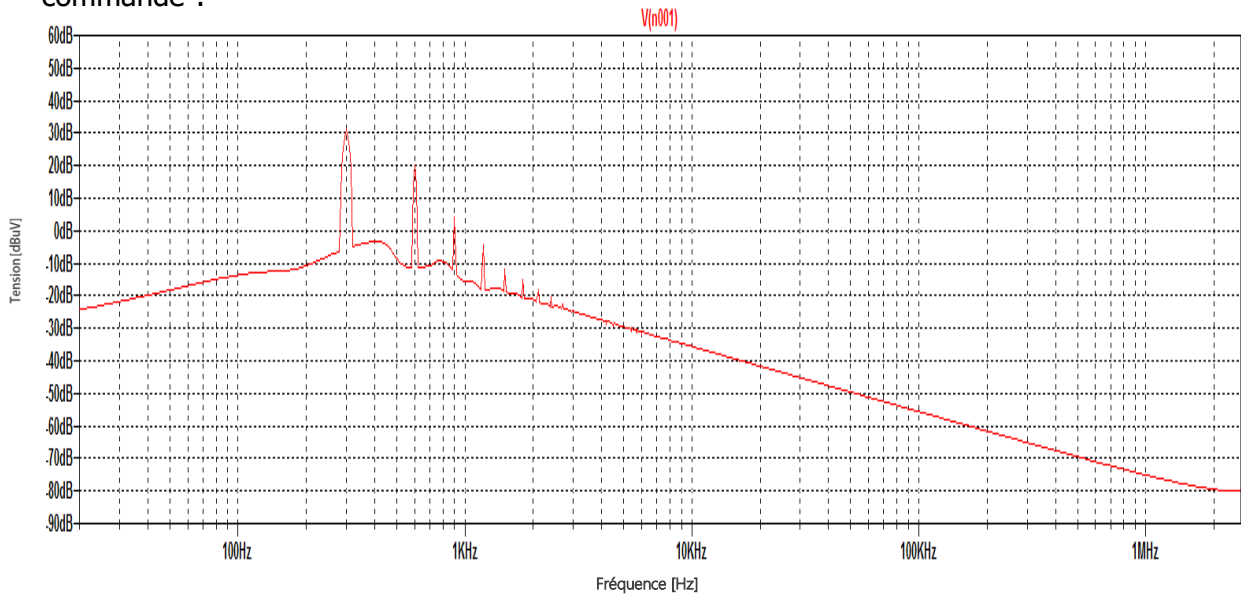


Figure III.35:réponse fréquentielle de tension du sortie

A partir des résultats fréquentielle illustrés dans la figure, nous remarquons que cette simulation permet de trouver des légers pics entre 200 Hz et 3 KHz dus à la capacité du filtrage et une minimisation de fréquence d'amplitude de -24 dB. Les perturbations sont nulles dans une haute fréquence.

❖ Le courant:

La figure III.36 montrent la réponse fréquentielle du le courant du circuit avec un filtre (Fig. III.31) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "triphasé non commandé".

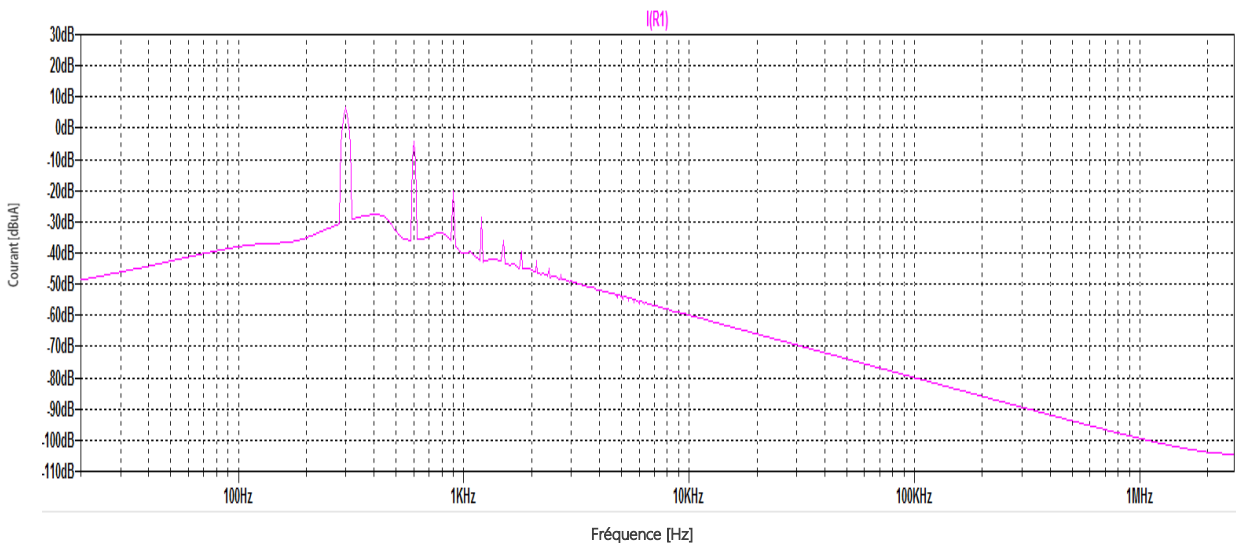


Figure III.36:réponse fréquentielle de courant du sortie

A partir des résultats fréquentielle illustrés dans la figure, on constate des pics de résonance entre 200 Hz et 3 KHz, qui sont dus à la capacité de parasite de la diode. Les perturbations sont amorties à haute fréquences.

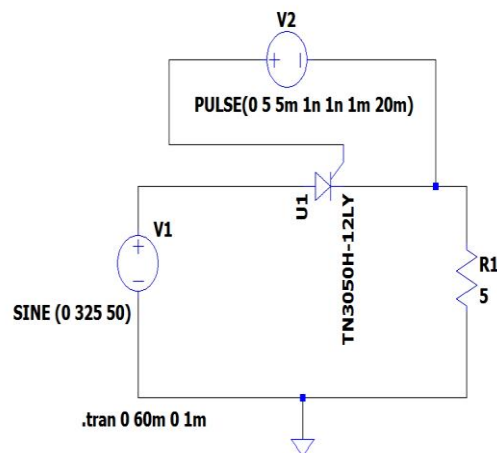
III.5.2. Modèle de redresseur commandé :

III.5.2.1. Redresseur monophasé simple alternance :

A. Sans filtre :

1) montage :

Le convertisseur de l'étude, présenté dans la Figure III.37, est un redresseur monophasé simple alternance composé d'une source, thyristor TN3050H-12LY en série et une charge résistive de 5Ω.



.inc C:\Users\SPLendid\Documents\LTspiceXVII\lib\high-temperature_scr_pspice\st_high-temperature_scr.lib

Figure III.37: schéma électrique de redresseur monophasé simple alternance commandé
« Sans filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

Les deux figures (III.38-III.39) représentent deux tensions « entrée et sortie ».

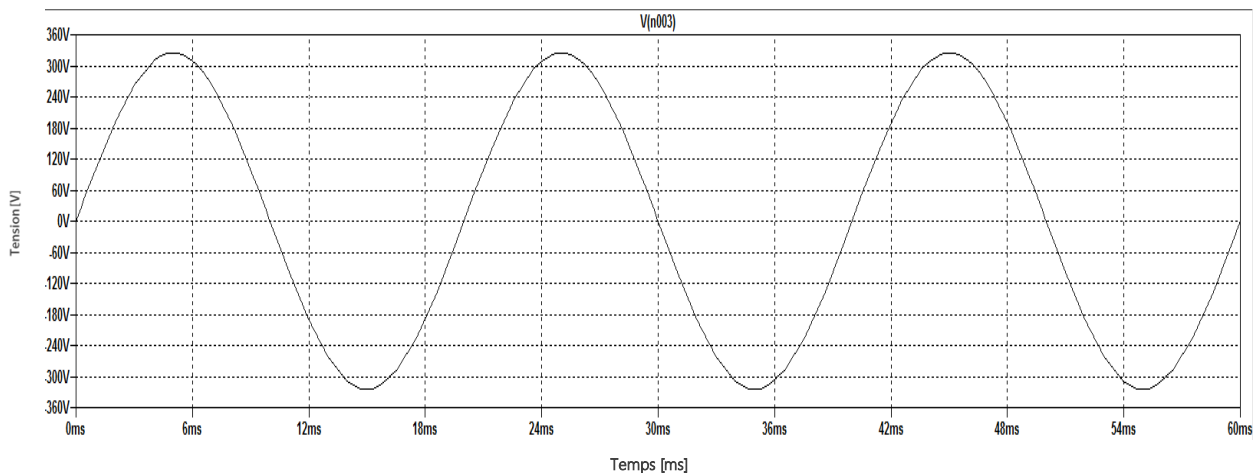


Figure III.38: réponse temporelle de tension d'entrée

Le signal de tension d'entrée est parfaite, sinusoïdale, avec une amplitude de 325 V.

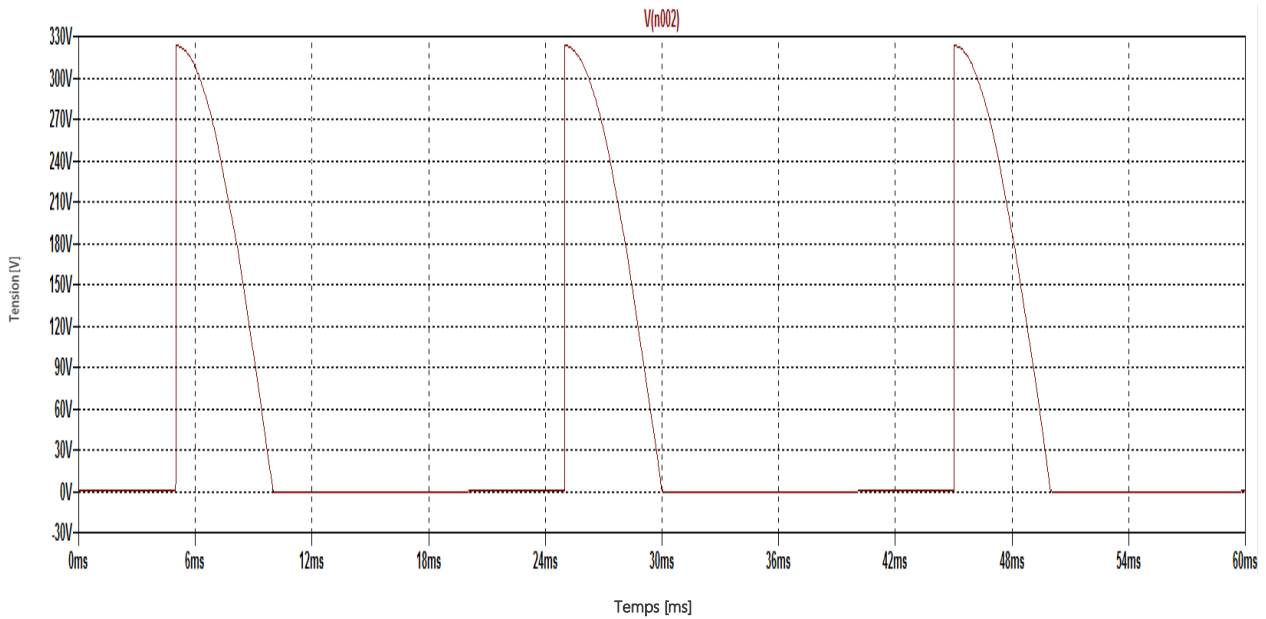


Figure III.39: réponse temporelle signal de tension du sortie

La tension de la sortie est parfaitement redressée d'amplitude de 323 V. Le retard à l'amorçage est imposé par un générateur de commande. Dès que le thyristor est amorcé, il se comporte comme une diode. On appelle " α " le retard à l'amorçage du thyristor.

❖ Le courant:

Les deux figures (III.40-III.41) représentent deux courants « entrée et sortie ».

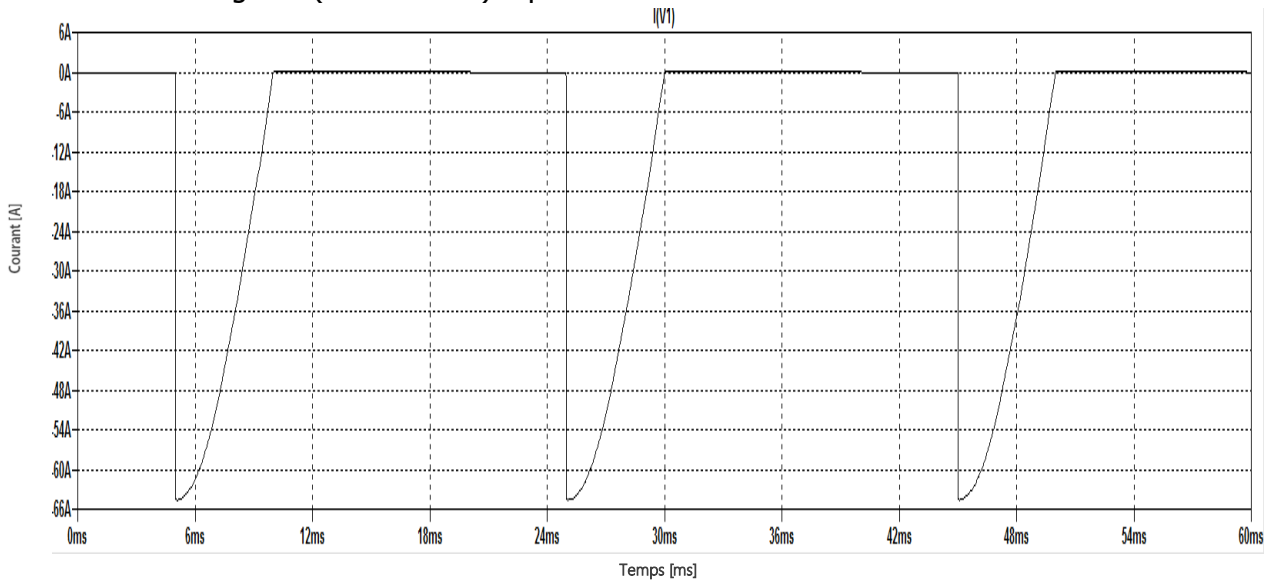


Figure III.40: réponse temporelle de courant du sortie

Le signal courant d'entrée est parfaitement redressé à une amplitude de -64 A.

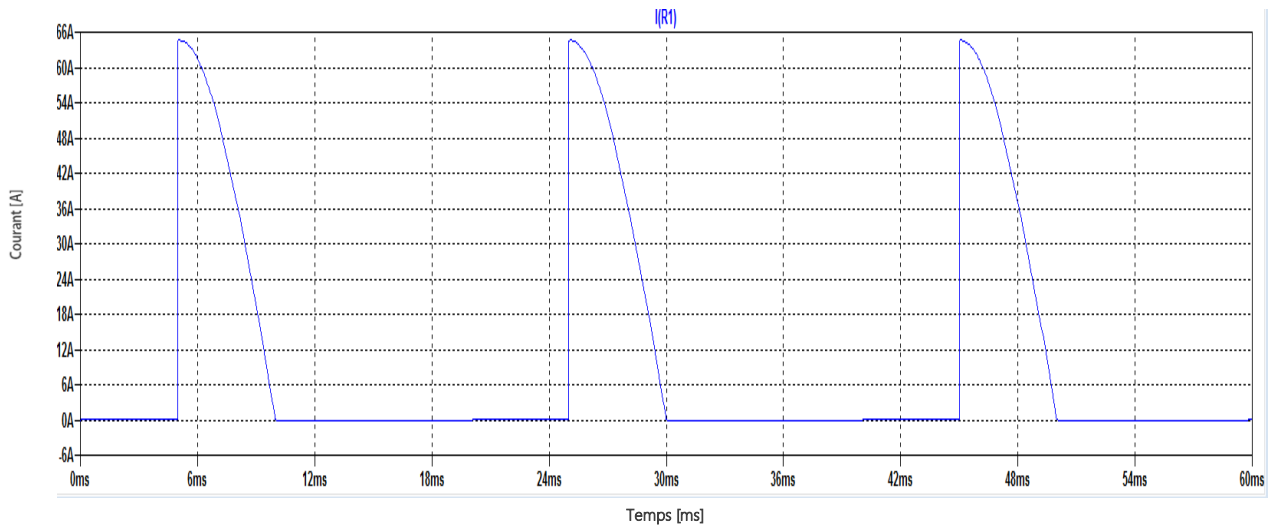


Figure III.41: réponse temporelle de courant du sortie

Le signal est parfaitement redressé d'amplitude de 64 A, le thyristor est caractérisé par un courant de gâchette. Cette caractéristique est mise à profit pour faire varier les grandeurs électriques du sortie et ainsi régler les valeurs moyennes du tension aux bornes du charge et du courant traversé.

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.42 montre la réponse fréquentielle de la tension du circuit sans filtre (Fig. III.37) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « monophasé commandé »

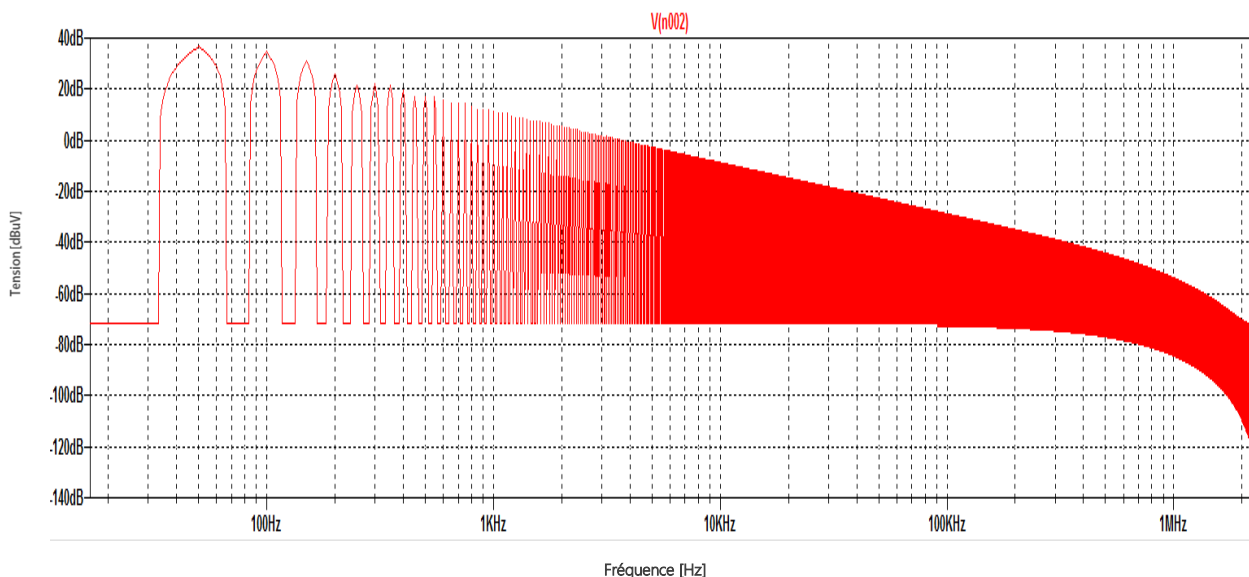


Figure III.42:réponse fréquentielle de tension du sortie

La figure présente le spectre dans le domaine fréquentiel avec des perturbations importantes d'amplitude de 30 dB aux environs de 33 Hz. A partir de cette dernière on voit que le signal a commencé de faire des pics de résonance jusqu'à 10 KHz.les perturbations diminuent dans les hautes fréquences.

L'analyse de cette réponse fréquentielle montre des perturbations en basses fréquences, nous remarquons une variation rapide d'amplitude et d'oscillation. À haute fréquence les perturbations électromagnétiques sont moins parasitées.

❖ Le courant:

La figure III.43 montre la réponse fréquentielle du courant du circuit sans filtre (Fig. III.37) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « monophasé commandé »

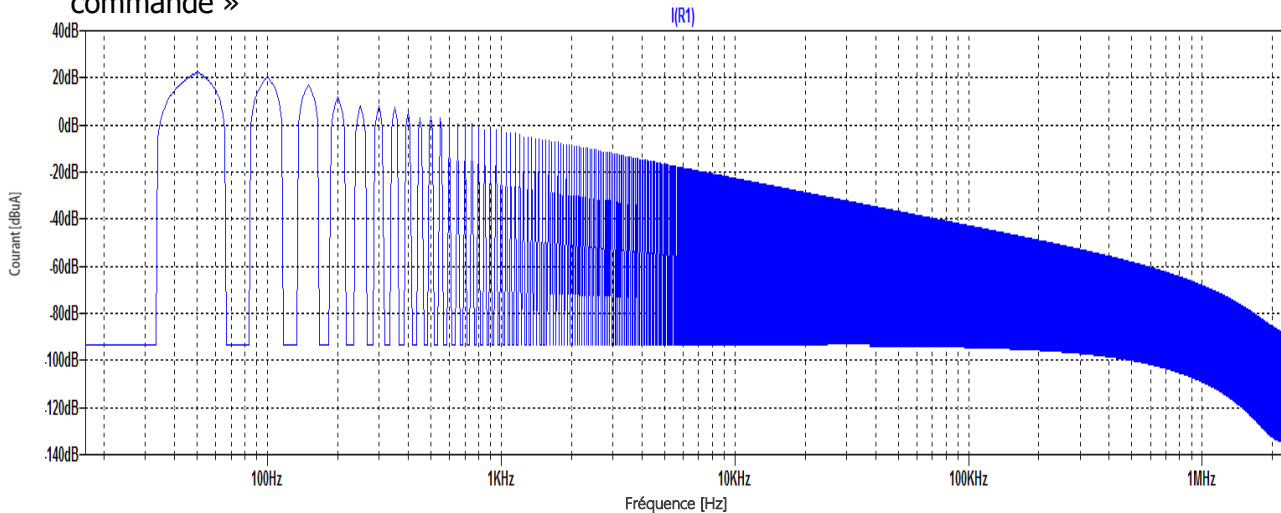


Figure III.43:réponse fréquentielle de courant du sortie

La figure présente le spectre dans le domaine avec des perturbations importants d'amplitude de -93 dB aux environs de 33 Hz. A partir de cette fréquence et jusqu'à 1 kHz, le spectre présente des perturbations plus élevées,

L'analyse de la réponse fréquentielle montre toujours la présence des perturbations conduites dans les basses fréquences avec des pics d'amplitude de 22 dB à -20 dB aux environs de 50 Hz à 1 KHZ. Dans les hautes fréquences les perturbations électromagnétiques sont faibles.

B. Avec un filtre :

1) Montage :

Le convertisseur de l'étude, présenté dans la Figure III.44, est un redresseur monophasé simple alternance composé d'un thyristor TN3050H-12LY en série et un condensateur de $500\mu f$ en parallèle avec une charge résistive de 5Ω .

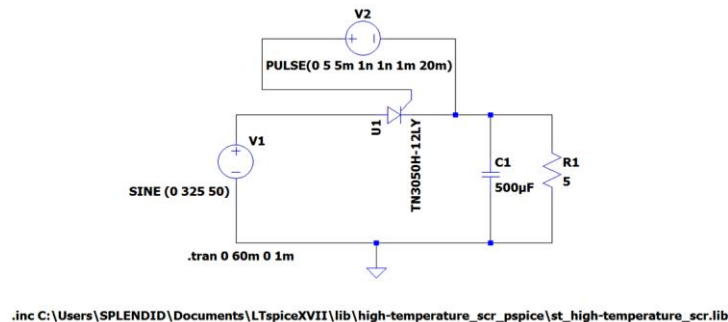


Figure III.44: schéma électrique de redresseur monophasé simple alternance commandé
« Avec un filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

La figure III.45 représente la tension de sortie :

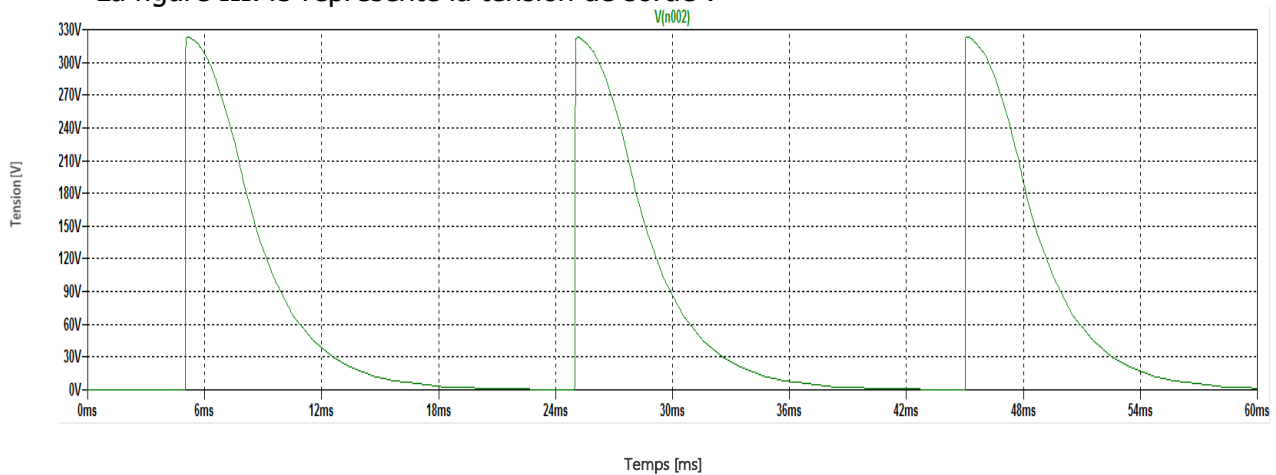


Figure III.45: réponse temporelle de la tension du sortie

La tension du sortie est parfaitement redressée d'amplitude de 322.5 V, Lorsque le filtre "condensateur" décharge, le signal de tension change par rapport au signal sans filtre, et il diminue.

❖ Le courant:

La figure III.46 représente le courant de sortie :

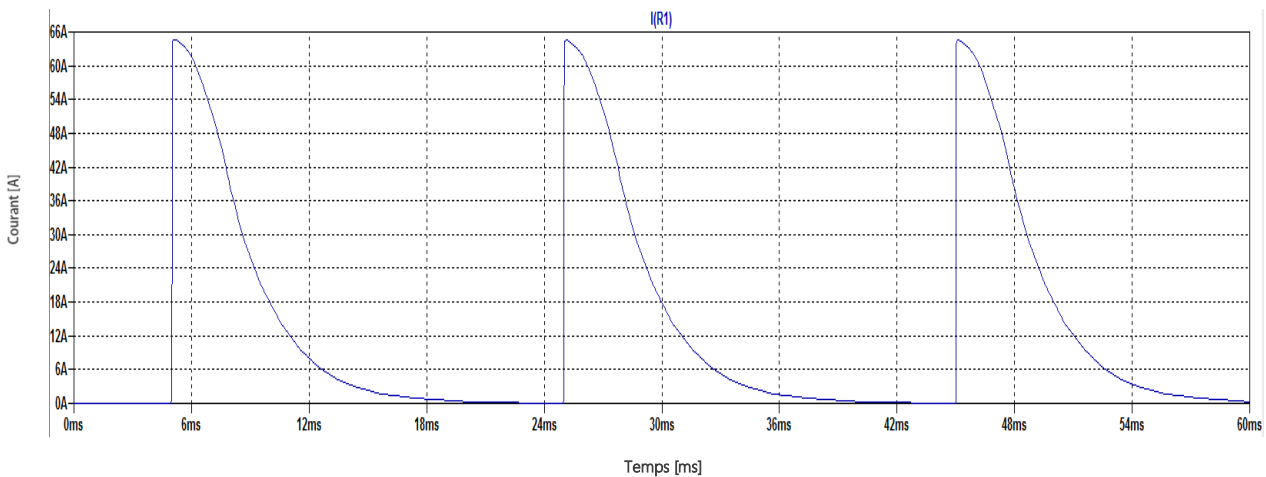


Figure III.46: réponse temporelle de courant du sortie

Le courant du sortie est parfaitement redressé à une amplitude de 64.4 A. de même principe du tension, le signal de courant va changer par rapport au signal sans filtre, Et va diminuer lorsque le filtre "condensateur" est déchargé...

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.47 montre la réponse fréquentielle de la tension du circuit avec par un filtre (Fig. III.44) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « monophasé commandé »

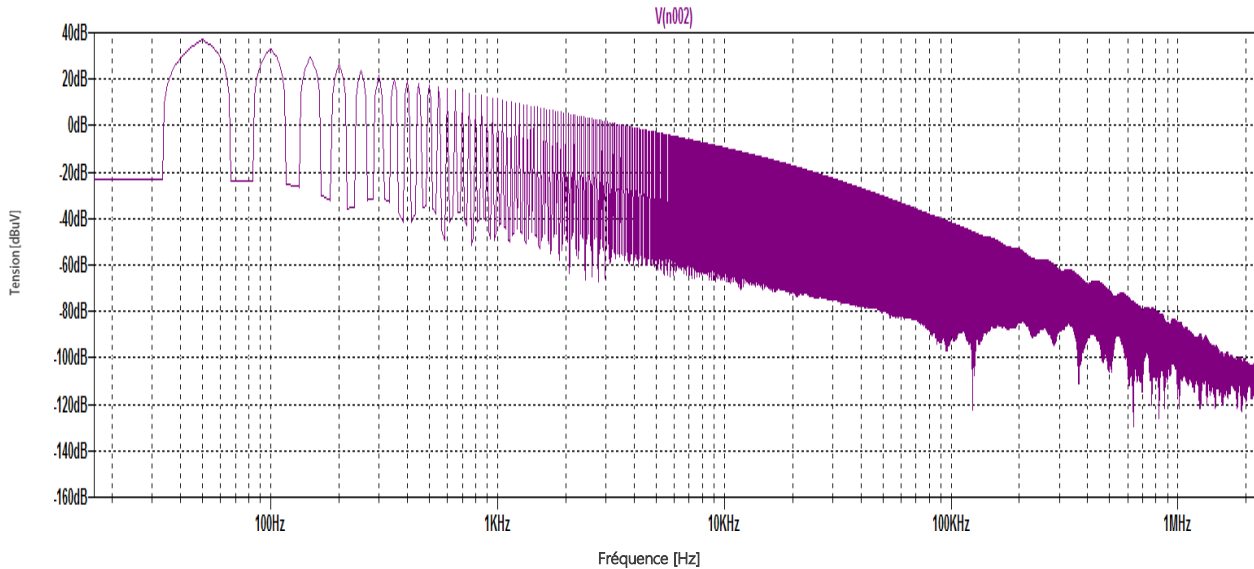


Figure III.47:réponse fréquentielle de tension du sortie

On voit clairement que le spectre est globalement réduit d'amplitude -23 dB, c'est l'impact de capacité.

L'analyse de cette réponse fréquentielle montre des perturbations en basses fréquences, nous remarquons une variation rapide d'amplitude et d'oscillation et une richesse en fréquences, avec des pics aux environs de 33 Hz à 2 KHz qui sont dues aux capacités de parasite de la diode. À haute fréquence les perturbations sont moins parasitées.

❖ Le courant:

La figure III.48montrent la réponse fréquentielle du courant du circuit avec un filtre (Fig. III.44) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « monophasé commandé »

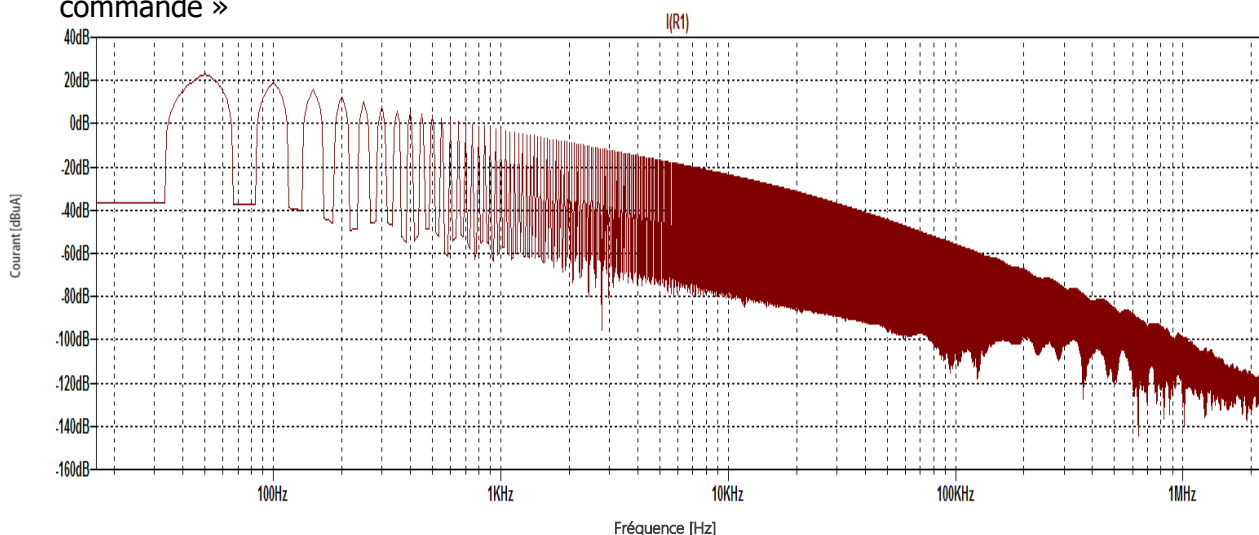


Figure III.48:réponse fréquentielle de courant du sortie

On observe nettement la pulsation dont l'amplitude du spectre décroît à -36.6 dB et à chaque commutation des oscillations élevées qui se traduisent par des pics à basse fréquence qui sont dues aux impédances des capacités de parasite de la diode.

La commutation de semi-conducteur à haute fréquence représente des parasites qui sont illustrées par des pics de résonances aux environs de 1 MHz.

III.5.2.2. Redresseur triphasé PD3:

A. Sans filtre :

1) montage :

La figure suivante donne le schéma électrique du montage PD3. Il est composé de trois sources et six thyristors relai en série avec une charge résistive.

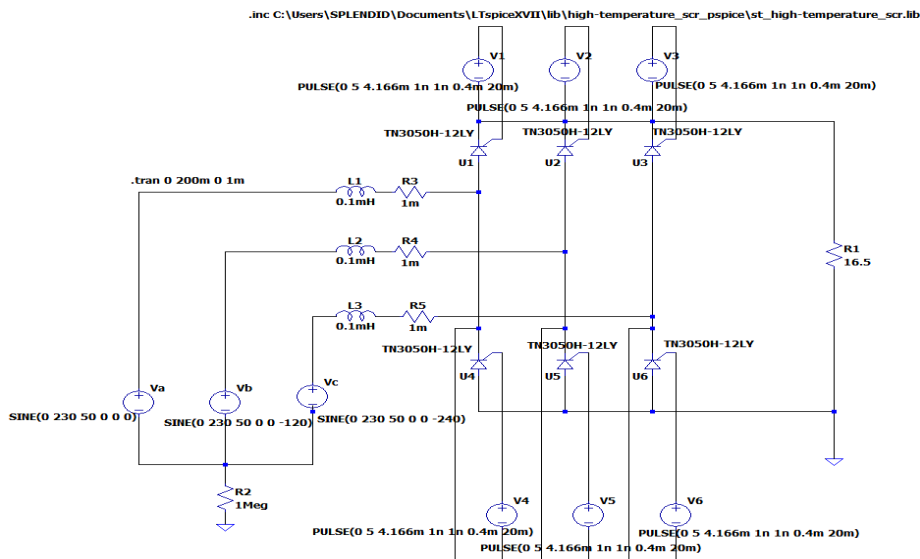


Figure III.49: montage de redresseur PD3 commandé
« Sans filtre »

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

Les figures (III.50-III.51) représentent les tensions d'entrée et les tensions de sortie entre les diodes.

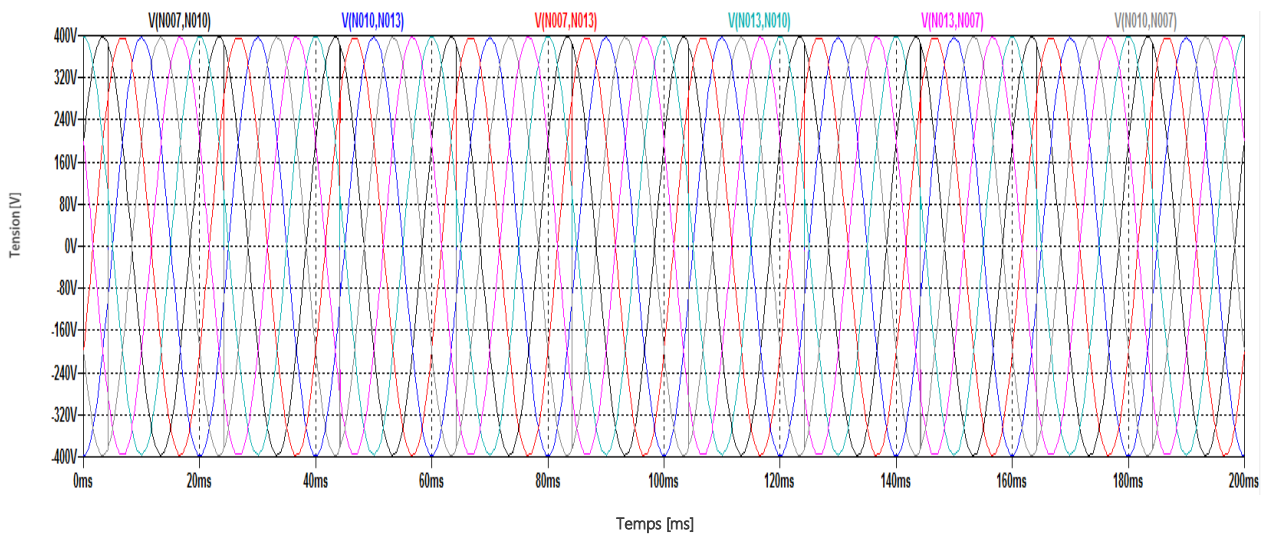


Figure III.50: réponse temporelle de tensions d'entrée

Ce pont est composé de 6 thyristors. Les thyristors T1, T3 et T5 sont amorcés pendant l'alternance positive des tensions v_1 , v_2 et v_3 . Les thyristors T2, T4 et T6 sont amorcés pendant l'alternance négative. La référence des angles d'amorçage est toujours l'angle d'amorçage naturel.

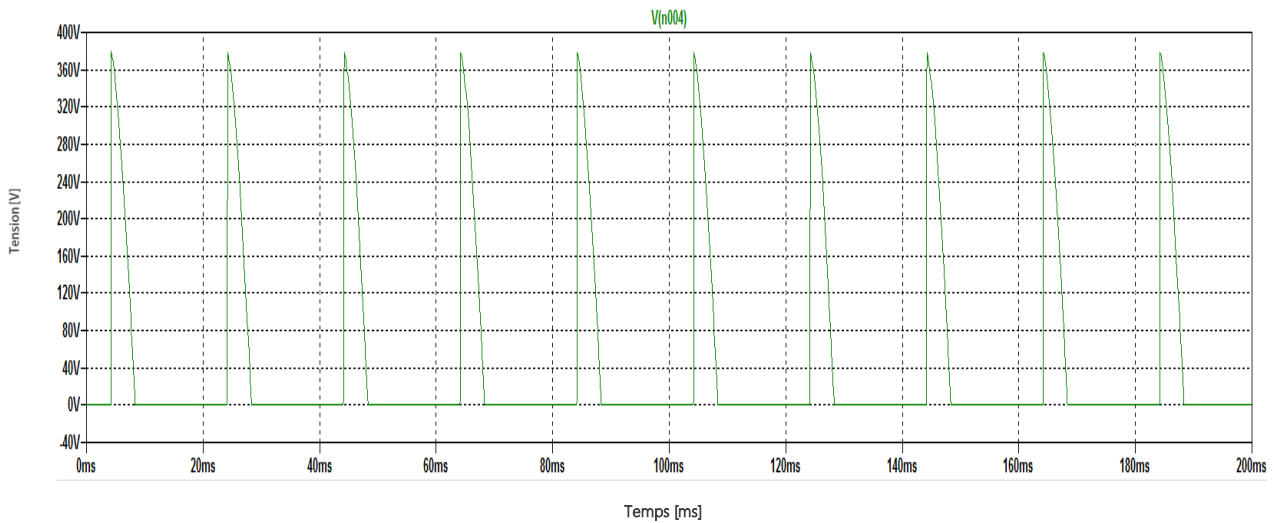


Figure III.51: réponse temporelle de tensions du sortie

La tension du sortie est parfaitement redressée d'amplitude de 380 V, Le retard d'amorçage est " α ", le signal obtenu est positif, le redresseur laisse passage que des thyristors les plus élevée.

❖ Le courant:

La figure III.52 représente le courant de sortie :

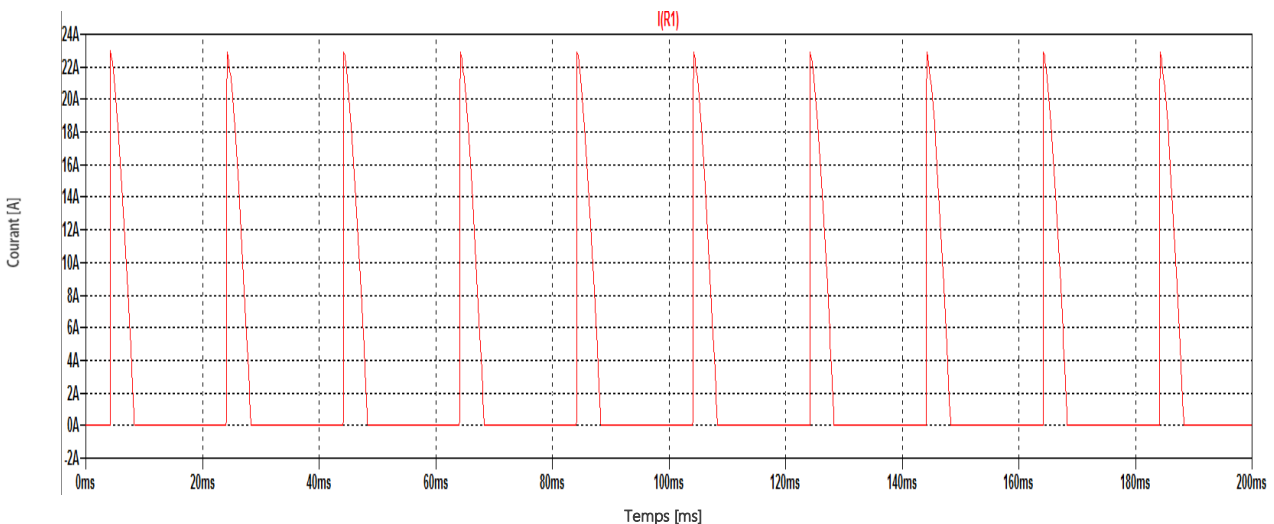


Figure III.52: réponse temporelle de courant du sortie

Le courant suit les mêmes évolutions que la tension de sortie d'amplitude 23 A. Dès que la tension s'annule, le thyristor va se bloquer spontanément avant la fin de sa période de conduction prévue.

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.53 montre la réponse fréquentielle de la tension du circuit avec filtre (Fig. III.49) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « triphasé commandé »

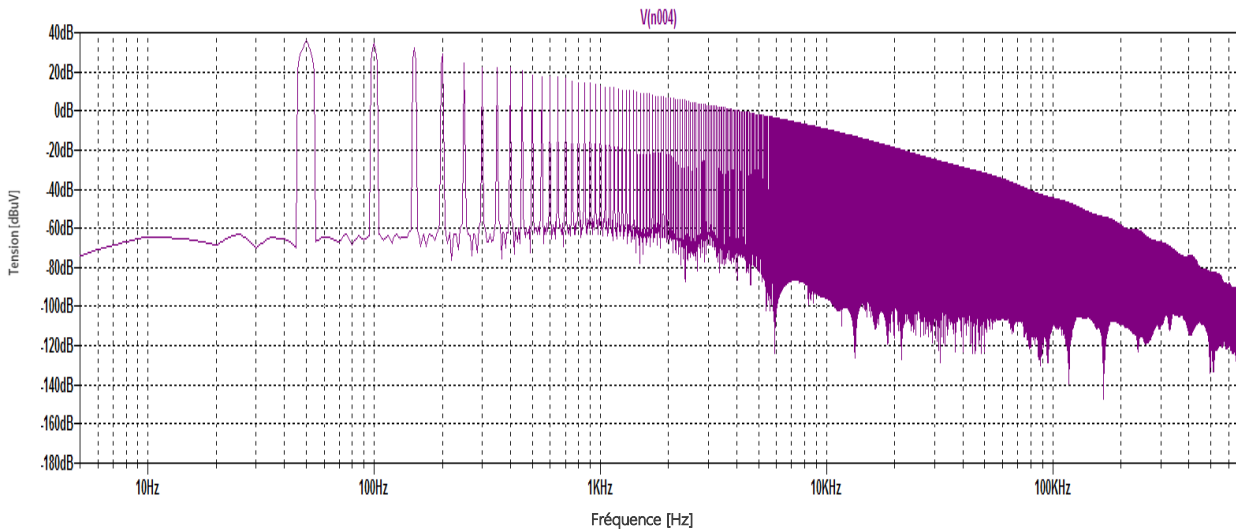


Figure III.53:réponse fréquentielle de tension du sortie

La figure présente le spectre dans le domaine fréquentiel avec des perturbations importantes d'amplitude de -72 dB. A partir de 10 Hz à 1 KHz le spectre présente des perturbations plus élevées d'amplitude -64 dB aux environs. Mais au-delà de 10KHz et jusqu'à 1 MHz (haute fréquence), le spectre présente des pics de résonance dont la cause est les commutations des Thyristors.

L'analyse de cette réponse fréquentielle montre des perturbations en basses fréquences avec une variation rapide de l'amplitude, des oscillations et une richesse en fréquences où on remarque des pics qui commencent aux environs de 10 Hz d'amplitude -64 dB et augmentent jusqu'à 1 KHz, par ailleurs dans les hautes fréquences nous remarquons peu de pollutions.

❖ Le courant:

La figure III.54 montre la réponse fréquentielle du courant sans filtre (Fig. III.49) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur « triphasé commandé »

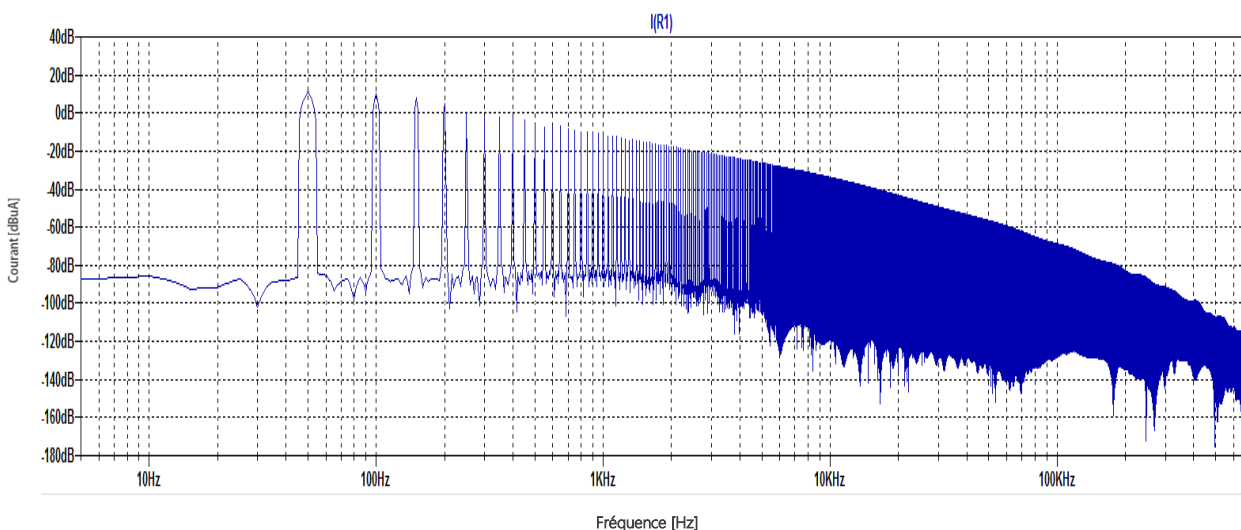


Figure III.54:réponse fréquentielle de courant du sortie

La figure présente le spectre dans le domaine fréquentiel avec des perturbations importantes d'amplitude de -87 dB. Le spectre présente des pics à partir d'une fréquence de 10 Hz à 1 KHz ce d'où des perturbations plus élevée. A partir de cette dernière fréquence et jusqu'à 1MHz, l'analyse de la réponse fréquentielle montre toujours une faible perturbation conduite dans les hautes fréquences.

B. Avec un filtre :

1) Montage :

La figure suivante donne le schéma électrique du montage PD3. Il est composé de trois sources et six thyristors ainsi le condensateur et la charge résistive.

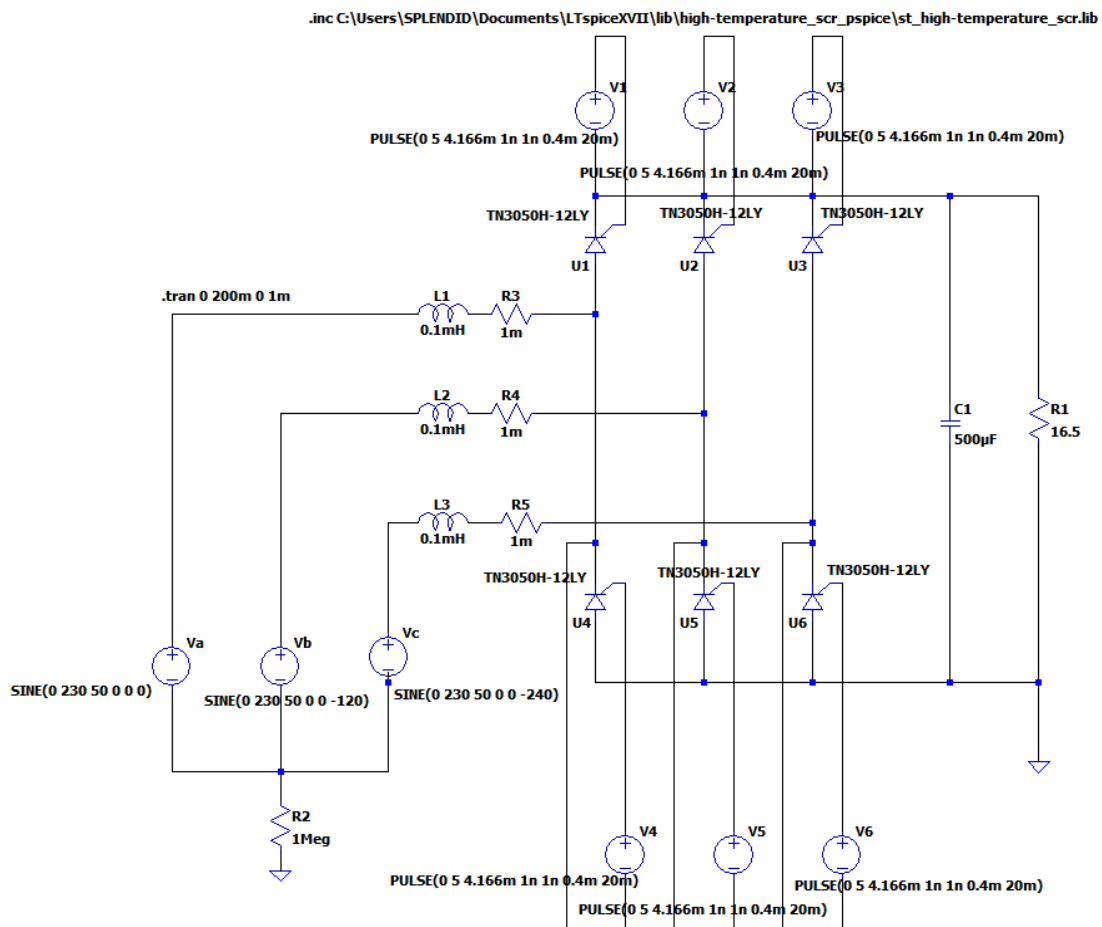


Figure III.55: schéma électrique de redresseur triphasé commandé
« Avec filtre»

2) RESULTATS ET INTERPRETATIONS :

a. réponses temporelles :

❖ La tension :

La figure III.56 représente le signal de tension du sortie :

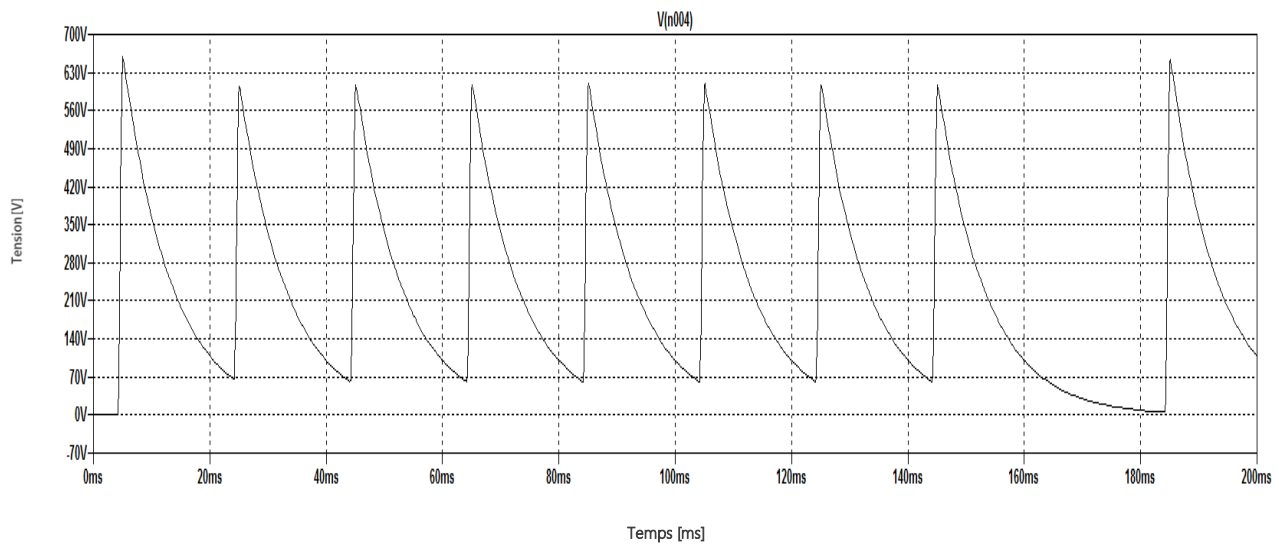


Figure III.56: réponse temporelle de tensions du sortie

La tension du sortie est parfaitement redressée d'amplitude de 660 V .Lorsqu'on ajoute un condensateur de capacité très élevée le signal de tension du sortie décharge et on obtient un signal de tension décroissante.

❖ Le courant:

La figure III.56 représente le signal de courant du sortie :

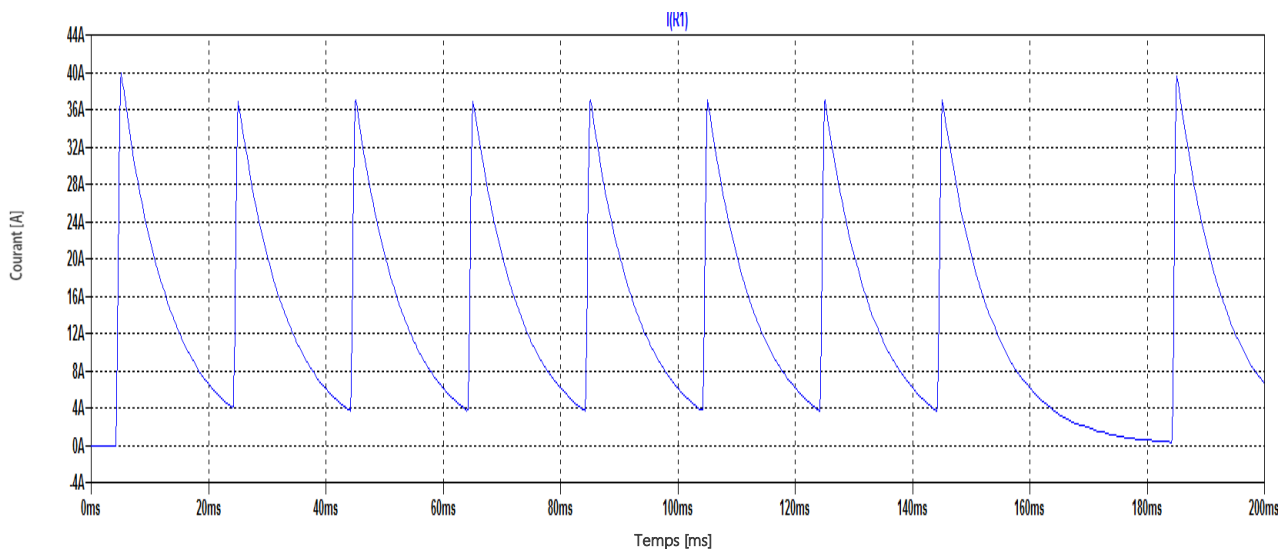


Figure III.57: réponse temporelle de courant du sortie

Le courant suit les mêmes évolutions que la tension de sortie d'amplitude 40 A, Dès que la tension s'annule. IL décharge avec filtrage « condensateur ».

b. Réponses fréquentielles :

❖ La tension :

La figure III.58 montre la réponse fréquentielle du tension reliée par un filtre (Fig. III.55) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "triphase commandé".

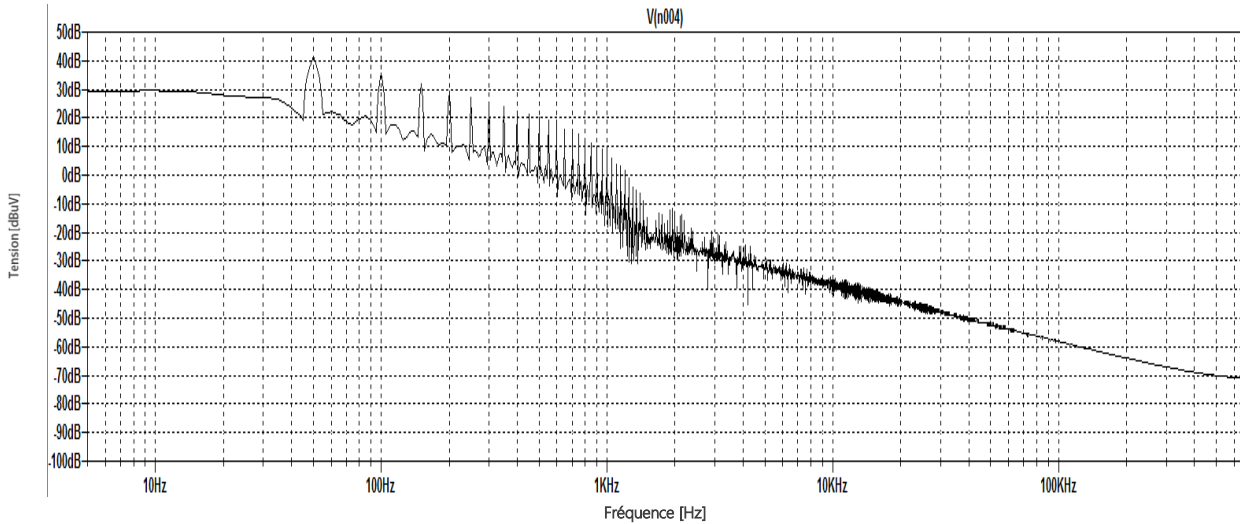


Figure III.58:réponse fréquentielle de tension du sortie

A partir des résultats fréquentielle illustrés dans la figure, nous remarquons que cette simulation permet de trouver très rapidement les fréquences qui risquent de poser du problème [45 Hz à 1 KHz], dus à la capacité, on remarque aussi que les perturbations diminuent jusqu'à ce qu'elles deviennent nulles à haute fréquence.

❖ Le courant:

La figure III.59 montre la réponse fréquentielle du courant reliée par un filtre (Fig. III.55) en fonction de l'influence des perturbations générées par un redresseur "triphase commandé".

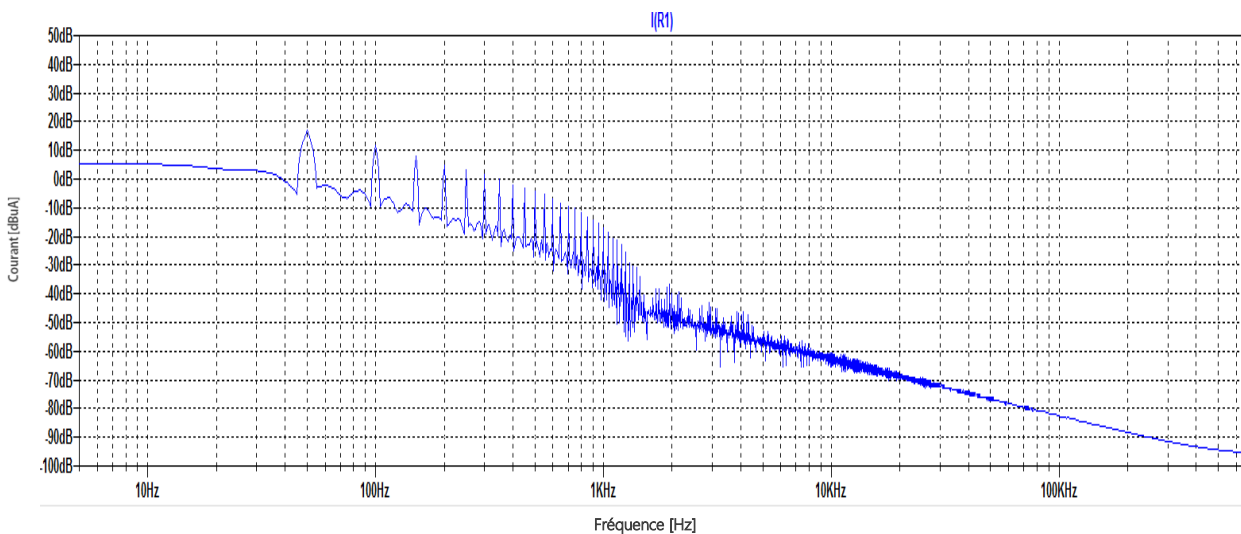


Figure III.59:réponse fréquentielle de courant du sortie

Cette figure montre les mêmes remarques cités dans la réponse fréquentielle du tension reliée par un filtre (fig. III.58).

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre on met à votre disposition les notions de bases de conversion d'énergie électrique alternative-continue par le biais des montages redresseurs monophasés simples alternances et triphasés commandés et non commandés alimentant des charges résistives avec et sans filtres.

L'étude faite tente de développer une méthodologie d'analyse des montages redresseurs allant de la simple alternance au triphasé PD3.

Les redresseurs non commandés, constitués d'une diode en série avec la charge, avec lesquels il est impossible de faire varier les grandeurs électriques en sortie du convertisseur.

Les redresseurs commandés, constitués d'un thyristor en série avec la charge, qui permettent de faire varier les grandeurs électriques en sortie du convertisseur, notamment les valeurs moyennes de tension aux bornes du charge et du courant traversé.

Si on relie un condensateur (filtrage) à un générateur continu, on observe le passage d'un courant dont l'intensité diminue rapidement et s'annule après un temps en général assez bref. Le condensateur se charge. C'est-à-dire il est nécessaire de filtrer le signal en sortie du redresseur pour obtenir une sortie continue,

À partir des signaux fréquentielles on peut conclure que le rôle de filtrage est de diminuer les perturbations dans les réseaux.



CONCLUSION GENERALE

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. [2]

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. [73]

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. [73]

Dans ce travail et dans le chapitre I, nous avons étudié la compatibilité électromagnétique en général, et en particulier les perturbations et les modes de transmissions.

Par la suite, le chapitre II nous a permis de voir de près quelques convertisseurs statiques AC/DC et leurs modélisations.

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 redresseur élévateur de type monophasé et triphasé « commandé et non commandé » avec et sans filtre, La simulation sous LTSPICE permet d'obtenir rapidement une estimation réaliste des perturbations émises par le convertisseur.

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 dans un réseau AC/DC à base de deux types sans filtre et avec un filtre.

On a utilisé une étude fréquentielle du tension et du courant avec et sans filtre, tout en représentant le plus fidèlement possible l'environnement des semi-conducteurs, tous les éléments parasites et les couplages étant décrits le plus précisément possible.

On a pu comparer les perturbations conduites générées avec le modèle AC/DC,

Les résultats de la validation d'identification montrent une concordance plutôt bonne au niveau de haute fréquence, mais pas parfaite à la basse fréquence.

Pour terminer, on espère que ce projet de fin d'étude a contribué à l'importance et la place stratégique qu'occupe la CEM dans l'électronique de puissance en cas générale et dans les convertisseurs statiques en cas particulier et plus précisément les redresseurs .Nous souhaitons que ce travail d'étude sera développé et intégré dans les programmes de recherche et les programmes industriels.



Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] H. Slimani, « Estimation des Perturbations Conduites et Rayonnées dans les Câbles de Puissance », Thèse de doctorat en Electrotechnique, Université de Sidi Bel-Abbès, 2016.
- [2] LARBI Wassila Nesrine, SAYAH Soumia, « Etude Sur Les Perturbations Electromagnétiques des signaux », projet fin d'étude , 2015/2016, CUAT, Algérie.
- [3] KANANE Hocine, « Etude des couplages en compatibilité électromagnétique des systèmes électroniques », Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2010
- [4] mémoire de magister « Etude Expérimental d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Présenté par ZEMOURI AZEDDINE, 26 juin 2014 université de Batna.
- [5] F. Lafon, F. De Daran, M. Ramdani, R. Perdriau, et M. Drissi, Modélisation de l'immunité de circuits integres en contexte industriel, 15e Colloque Int. Et Exposition sur la Compatibilité Électromagnétique (CEM 2010), papier no. 31, Limoges, France, Avril 2010.
- [6] P. Fernandez-Lopez. « Modélisation du rayonnement électromagnétique des dispositifs électroniques pour des applications CEM. Electronique ». Université de Rouen, 2011. Français.
- [7] « Etude des problèmes de la compatibilité électromagnétique dans un circuit imprimé » Mémoire Magister, Université Mouloud Mummeri de Tizi-Ouzou, 23 Octobre 2014.
- [8] J.L. BOIZARD « Notions de Compatibilité Electro Magnétique », Maître de conférences, IUFM Midi Pyrénées- Toulouse II.
- [9] KANANE Hocine, « Etude des couplages en compatibilité électromagnétique des systèmes électroniques », Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2010.
- [10] Les photos ; ECOLE SUPERIEURE de PLASTURGIE «CEM : Couplages des Perturbations»
- [11] F.Rachidi « introduction a la CEM » école polytechnique fédérale de Lausanne, été 2004, Notes de cours.
- [12] KANANE Hocine, « Etude de la compatibilité électromagnétique des circuits électroniques », UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2012
- [13] Guy-gérard Champiot « Compatibilité électromagnétique Normalisation, réglementation et mesure» Technique de l'ingénieur D1310.
- [14] Chapitre 4 « compatibilité électromagnétique » Révision février 2006.
- [15] F. Rachidi, Blindage, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL-DE-LRE CH1015 Lausanne, 2006
- [16] [YOUTUBE](#) : « cour 1 compatibilité électromagnétique »
- [17] « [Introduction à la compatibilité électromagnétique](#) »

[18] SLIMANI, H. (2010). « Comportement et calcul du champ électromagnétique Engendré à proximité de lignes d'énergie transportant des signaux HF » MAGISTER en Électrotechnique, Djilali LiabesUniversity, Sidi Bel Abbès, Algeria.

[19] G. G. Champiot, « Compatibilité électromagnétique : Normalisation, réglementation et mesure », Techniques d'ingénieurs, D1310.

[20] F. Rachidi, Blindage, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL-DE-LRE CH1015 Lausanne, 2006

[21] Mohamed Miloudi, Abdelber Bendaoud, Houcine Miloudi, "Characterization of Conducted Electromagnetic Interference (EMI) Generated by Switch Mode Power Supply (SMPS)", Revue des Sciences et de la Technologies, RST, Volume 5 N°1, Janvier 2014.

[22] Chahine, "Caractérisation et Modélisation de la susceptibilité conduite des circuits intégrés aux perturbations électromagnétique", Thèse de doctorat, Université de Rouen, Décembre 2007.

[23] Cerge, "compatibilité électromagnétique", Note de cours Académie de Paris, Créteil, Versailles, France, 2003.

[24] CEM.doc Terminale BEP électronique

<http://www.google.dz/search?newwindow=1&site=&source=hp&q=CEM.doc+Terminale+BEP+%C3%9C>

[25] Pr FETHA CHERIF, « Qualité d'énergie et compatibilité électromagnétique », UNIVERSITE MOSTAPHA BENBOULAID BATNA 2 FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE, 2021

[26] DOORGAH, NARAINDRANATH, Contribution à la modélisation prédictive CEM d'une chaîne d'entraînement, 2012, Thèse de doctorat, Ecully, Ecole centrale de Lyon.

[27] MAMMAD, RABIA , Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique, 2017, Thèse de doctorat. Université de Tlemcen, Algérie.

[28] BOUMENAD, M (2010). « Détermination du champ magnétique proche Rayonné en utilisant les réseaux de neurones MLP » MAGISTER en Électrotechnique, Université Djilali Liabes, Sidi Bel Abbès Algérie, 123 p.

[29] H. DENFIR, T. CHAIB " étude de rayonnement d'un circuit d'électronique de puissance". Mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'état EMP 2008.

[30] PIERRE Degauque, JOEL Hamelin (1990). «Compatibilité électromagnétique : bruits et perturbations radioélectriques» Collection technique et scientifique des télécommunications, 654 p. Disponible sur :

http://books.google.fr/books/about/Compatibilit%C3%A9_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.html?id=CTsCHAAACAAJ

- [31] C. Girard, « Contribution à la modélisation des structures filaires en régime transitoire – Application en Compatibilité Électromagnétique », Thèse de doctorat, UER des Sciences de Limoges, France, Décembre 1997.
- [32] Abdelghafour BOUTAR, « Contribution au développement de modèles circuits pour l'étude de couplages électromagnétiques à l'intérieur d'enceintes métalliques », DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LIMOGES(2014)
- [33] F. Rachidi, "Blindage", Notes de cours, École Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFLDE-LRE CH- 1015 Lausanne, 12 Mai 2014.
- [34] « Les convertisseurs statiques », communication technique, L. P. La Chauvinière
<http://electrotech1el2.blogspot.com/files/07%20Convertisseurs>
- [35] E. R. Pinilla, « Conception de convertisseurs électroniques de puissance à faible impact électromagnétique intégrant de nouvelles technologies d'interrupteurs à semi-conducteurs », Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, 2014
- [36] BEGAG Souhila, « Commande en Courant par Hystérésis Numérique pour les Systèmes de l'électronique de Puissance », magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF UFAS (ALGERIE), 2008.
- [37] Michel Pinard « Convertisseurs et électronique de puissance Commande • Description Mise en œuvre » Imprimerie CHIRAT – 42540. Saint-Just-la-Pendue, Dépôt légal : avril 2007, N° 4300, Imprimé en France.
- [38] Ourabi Lassaad, INTRODUCTION A L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE, I.S.E.T de Bizerte
- [39] Communication technique Convertisseurs statiques
<http://fr.scribd.com/doc/111726423/07-Convertisseurs-statiques-eleve-pdf>
- [40] Convertisseurs statiques d'énergie
<file:///G:/Nouveau%20dossier/les%20sources/conversionstatique.pdf>
- [41] <https://elec13.wordpress.com/2016/03/05/les-convertisseurs-statiques/>
- [42] SOLAZ Philippe, « GRADATEUR », cours d'Electronique de Puissance.
http://pedagogie.ac-toulouse.fr/BTS_electrotechnique-tarbes/download/GRADATEUR.pdf
- [43] Dr. AMAR MEZACHE Electronique de puissance Conversion de l'énergie électrique UNIVERSITE DE M'SILA
- [44] <file:///C:/Users/Mh/Downloads/Rappels%20MCC%20et%20hacheur%20profs%20.pdf>
- [45] mémoire de magister «Etude Expérimental d'un convertisseur DC/DC contrôler par une commande robuste », Présenté par ZEMOURI AZEDDINE, 26 juin 2014 université de Batna.
- [46] M. Bourahla Mohamed, « SYNTHÈSE DES CONVERTISSEURS STATIQUES DC/DC/AC POUR LES SYSTEMES PHOTO VOLTAÏQUES: ETUDE ET SIMULATION », Magister, ECOLE DOCTORALE COMMANDE INDUSTRIEL DES ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES ET DIAGNOSTIQUES.

[47] MENASRIA Azzeddine, «D'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE», université de Guelma, 2021

[48]<http://pamelard.electro.pagespersoorange.fr/fichier%20pdf/electro%20teleec/chap2%20es%20convertisseurs%20.pdf>

[49] Mémoire de Magister en électrotechnique thème : ETUDE EXPERIMENTALE D'UN CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUST

[50] MEGHERBI Hicham, HAMRI Sofiane, « étude et modélisation des convertisseurs statiques destinés à améliorer la qualité de l'énergie électrique », Master, université Dr.Taher Moulay de Saida; 2017

[51] M.L.LOUAZENE, « électronique de puissance "non commandé" », UNIVERSITE DE OUARGLA

[52] Michel Pinard « Convertisseurs et électronique de puissance : commande, description et mise en œuvre» Edition Dunod, Paris, 2007.

[53] M.L.LOUAZENE, « électronique de puissance "commandé" », UNIVERSITE D'OUARGLA, 2011

[54] Saint-Nazaire, « CEM des convertisseurs de puissance », Polytech St Nazaire – 12 Juin 2014

[55] Batard, C. et al., 2012, "Simulation of Power Converters Using Matlab-Simulin", in V. N. Katsikis (ed.), MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications - Volume 1, Intech Open, London

[56] Christophe Batard. « MODELISATION DES SYSTEMES DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE DANS UN CONTEXTE PLURIDISCIPLINAIRE ». Electronique. UNIVERSITE DE NANTES, 2015.

[57] H. DENFIR, T. CHAIB « étude de rayonnement d'un circuit d'électronique de puissance ». Mémoire de fin d'étude d'ingénieur d'état EMP 2008.

[58] Eliana Rondon-Pinilla, « Conception de convertisseurs électroniques de puissance à faible impact électromagnétique intégrant de nouvelles technologies d'interrupteurs à semi-conducteurs », Thèse de doctorat de l'école centrale de Lyon, France, 18 juin 2014.

[59] F. Costa, C. Vollaie, "Caractéristiques et évolution du bruit électromagnétique dans les dispositifs d'alimentation embarqués sur aéronef", CEM 2008, Paris, France, 9-11 juillet,

[60] ADEL BOUA TIT, « CONCEPTION D'UN REDRESSEUR TRIPHASÉ À FAIBLE TAUX DE DISTORSION HARMONIQUE ET À FACTEUR DE PUISSANCE ÉLEVÉ », UNIVERSITÉ DU QUÉBEC ,2012

[61] GUETTICHE Nabil, AKLIOUCHE Imed, « Développement des modèles CEM de composants d'électronique de puissance pour la caractérisation des perturbations en mode rayonné », UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ BOUIRA, master, 2017

[62] Thèse «Etude des perturbations dans les convertisseurs de l'électronique de puissance», présenté par Mohammed MELIT, université de Jijel, 19 avril 2008

[63] RONDON-PINILLA, Eliana. Conception de convertisseurs électroniques de puissance à faible impact électromagnétique intégrant de nouvelles technologies d'interrupteurs à semi-conducteurs. 2014. Thèse de doctorat. , l'Ecole Centrale de Lyon.

[64] « CHAPITRE 3 : REDRESSEURS », Université de Savoie, Licence EEA Module U6,

<file:///C:/Users/Mh/Downloads/Telegram%20Desktop/Redresseurs.pdf>

[65] <https://studylibfr.com/doc/1736812/synth%C3%A8se-sur-les-harmoniques>

[66] Jean-Christophe Crébier, « CONTRIBUTION A L'ETUDE DES PERTURBATIONS CONDUITES DANS LES REDRESSEURS COMMANDES », doctorat, Submitted on 30 Jan 2013

[67] <https://fr.techtribune.net/smartphones/le-geant-du-smartphone-xiaomi-declare-que-la-recharge-sans-fil-longue-portee-revolutionnaire-est-arrivee/89443/>

[68] CHARIAG, Dhia, GUEZGOUZ, Djamel, LE BUNETEL, Jean-Charles, et al. Modélisation et simulation fréquentielle d'un convertisseur statique sous SPICE. Université de Tours, LMP, Avenue Marcel Dassault, 37200 Tours 2, March 2015.

[69] Gwenaël Cléon, simulation numérique en électronique le logiciel LTSPICE, Lycée Camille Guérin, France.

[70] S.POUJOULY, Découverte de SPICE avec le logiciel Switcher CAD III, IUT CACHAN - Oct 03 - ver 1.0, France.

[71] « Introduction à LTspice IV» Université de liège, Février 2010

www.montefiore.ulg.ac.be/-vdh/...1/presentation-LTspiceIV.pdf

[72] CARLOS, V (2009). « LTspice IV version 2.17 » Département génie Electrique et informatique industrielle 19100 Brive-la-Gaillarde France, Version document du 07/04/2009, 22 p

[73] MOULKHALOUA AZZEDDINE, BELHADJ ILIES DJAMEL, « Etude Sur Les Perturbations Electromagnétiques A Haute Fréquence Dans Les Convertisseurs Statiques », projet fin d'étude ,2013/2014, CUAT, Algérie.

[74] Ravi Shankar Singh, Byaktiranjana Pattanayak, Shankar Kumar, PROJECT REPORT "POWER ELECTRONICS: COMPUTER SIMULATION AND ANALYSIS", Electrical Engineering at the National Institute of Technology, Rourkela (Deemed University)

Résumé :

Le principe de la compatibilité électromagnétique (CEM) consiste à permettre le fonctionnement correct et optimal de tout dispositif électrique en présence d'autres, chacun étant en fonctionnement nominal. 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», domaine de la susceptibilité électromagnétique. Ce travail nous a permis de faire l'étude des sources des perturbations électromagnétiques et leurs générations par les convertisseurs AC/DC.

Après modélisation et simulation à l'aide de logiciel LTspice, les résultats obtenus permettent de confirmer la réalité de la pollution électromagnétique du convertisseur statique AC/DC. Et en fin, a fin de minimiser les perturbations électromagnétiques (PEM) ; nous avons utilisés des solutions comme des filtresEtc.

Mots clés: comptabilité Electromagnétique(CEM), des couplages, victime, la susceptibilité électromagnétique, redresseur AC/DC, PEM, logiciel LTspice.

Abstract :

The principle of electromagnetic compatibility (EMC) is the correct and optimal operation of any electrical device in the presence of others, each in nominal operation. This definition leads to three areas of interest: the study of sources of interference, the study of couplings, and finally the study of the impact of disturbance on a "victim field of electromagnetic susceptibility. This work allowed us to study the sources of disturbances and their generations by AC/DC converters.

After modeling and simulation using LTspice software, the results obtained make it possible to confirm the reality of the electromagnetic pollution of the static AC / DC converter. And finally, a late minimized electromagnetic interference; we used solutions such as filters..... Etc.

Keywords: Electromagnetic compatibility (EMC), couplings, victim, electromagnetic susceptibility, AC/DC rectifier, PEM, LTspice software.

ملخص:

يتمثل مبدأ التوافق الكهرومغناطيسي CEM في السماح بالتشغيل الصحيح والأمثل لأي جهاز كهربائي في وجود أجهزة أخرى ، كل منها قيد التشغيل الاسمي. هذا التعريف يؤدي إلى ثلاثة مجالات من اهتمام: دراسة مصادر الاضطرابات ، ودراسة الروابط ، وأخيراً دراسة تأثير الاضطرابات على "الضحية" مجال حساسية الكهرومغناطيسية. سمح لنا هذا العمل بدراسة مصادر الاضطرابات الكهرومغناطيسية وتوليدها بواسطة محولات (التيار المتردد / التيار المستمر). بعد النمذجة والمحاكاة باستخدام برنامج LTspice ، نتيج النتائج التي تم الحصول علىها تأكيد حقيقة التلوث الكهرومغناطيسي لمحول(التيار المتردد / التيار المستمر). وأخيراً، في نهاية التقليل من الاضطرابات الكهرومغناطيسية؛ استعملنا حلول مثل المرشحات.....الخ.

الكلمات الدالة : التوافق الكهرومغناطيسي ،الروابط،الضحية،حساسية الكهرومغناطيسية،محول (التيار المتردد / التيار برنامج LTspice ،المستمر)،الاضطرابات الكهرومغناطيسي