

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2023

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

par

Mr LIMAM Bilal Islam

**Contribution à l'étude des perturbations EM conduites basses
fréquences produites par les ponts redresseurs**

Soutenu le / / 2023 devant le jury composé de :

Président :	Mr SOUAG	MCB	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr OMARI	MAA	Université de Mostaganem
Rapporteuse :	Mme REZINI	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire .

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mme REZINI**, que je remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire

Je remercie également les membres du jury qui nous ont honorés d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail;

Professeur SOUAG

De l'université des Sciences et de la Technologie Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem qui m'a fait le grand honneur d'accepter la présidence des jurys de mémoire, Qu'il reçoive ici l'expression de mes hommages respectueux;

Professeur OMARI

De l'université des Sciences et de la Technologie Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem qui m'a fait le grand honneur d'accepter de faire partie des jurys, Sincères remerciements.

Mes remerciements s'adresse également à tous mes professeurs pour leurs générosité et la grande patience dont ils ont fait preuve malgré leur charge académique, dont je cite notamment **Mme BECHIRI Fatiha** pour sa bienveillance et son accompagnement durant mon parcours universitaire.

Dédicaces

A ma grand mere

Douceur et amour, Gentillesse et tendresse

Délicatesse et sagesse

Un trésor de famille

....Affectueusement....

A mes parents

Pour votre soutien , votre confiance et votre amour incondtionnel.

Merci de m'avoir guidé dans toutes ces épreuves,

D'avoir combattu a mes cotés durant ces longues années,

De m'avoir guidé , soutenu et encouragé jusqu'au bout , de par votre présence si précieuse et votre amour.

Mes parrent chéris , je vous aime infiniment!

A mes freres

Pour voire soutien malgré le peu de temps que nous passons ensemble

Je vous adore!

A Mohamed Benkorich

Mon ami sur qui j'ai toujours pu compter,

Un meilleur ami et frère que la vie a oublié de me donner , tu me donnes toujours de l'espoir et le sens de la vie

mercii !

A mes amis

Vous comptez tous énormément a mes yeux et a mon cour.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Introduction Générale	7
Chapitre I : Généralités sur la compatibilité électromagnétique	2
I.1 Introduction	3
I.2 Définition de la compatibilité électromagnétique (C.E.M)	3
I.3 Niveau de perturbation et niveau d'immunité	4
I.4 Etude phénoménologique	4
I.5 Les sources de perturbation	4
I.5.1 Les sources naturelles	4
I.5.2 Les sources artificielles	5
I.6 Couplage électromagnétique	5
I.6.1 Perturbations conduites	5
I.6.1.1 Mode différentiel (mode symétrique)	5
I.6.1.2 Mode commun (ou asymétrie)	6
I.6.2 Couplage par rayonnement	7
I.6.2.1 Couplage capacitif	8
I.6.2.2 Couplage inductif	9
I.7 Les perturbations électromagnétiques	9
I.7.1 Perturbations à base fréquence	9
I.7.1.1 Perturbations BF en mode conduit	9
I.7.1.2 Perturbations BF en mode rayonné	10
I.7.2 Perturbations à hautes fréquences	10
I.7.2.1 Perturbations HF en mode conduit	10
I.7.2.2 Perturbations HF en mode rayonné	10
I.7.3 Perturbations permanentes	10
I.7.4 Perturbations transitoires	10
I.8 Types de C.E.M	11
I.8.1 C.E.M inter système	11
I.8.2 C.E.M intra système	11
I.8.3 C.E.M de matériel	11

I.9 Concept de la protection	11
I.9.1 Action sur l'élément perturbateur	11
I.9.2 Action sur l'élément perturbé.....	12
I.9.3 Action sur le moyen de couplage	12
I.10 CEM en électronique de puissance	12
I.10.1 Problématique de la C.E.M en électronique de puissance	12
I.10.2 Modélisation C.E.M en électronique de puissance	12
I.10.2.1 Méthodes indirect	12
I.11.2.2 Méthodes direct.....	12
I.11 Normalisation CEM en électronique de puissance.....	13
I.11.1 Normes basses fréquences.....	13
I.11.2 Normes hautes fréquences	15
I.12 Conclusion	16
Chapitre II : Synthèse sur conversion alternative continue.....	17
II.1 Introduction	18
II.2 Electronique de la puissance	18
II.3 Convertisseur statique	18
II.3.1 Classification de convertisseur statique	19
II.3.1.1 Convertisseur AC. DC	19
II.3.1.2 Convertisseur DC.AC	19
II.3.1.3 Convertisseur DC.DC	19
II.3.1.4 Convertisseur AC.AC	19
II.3.2 Reversibilité de convertisseur	20
II.3.3 Constitution d'un convertisseur :	20
II.3.3.1 Interupteur les plus utilese en electronique de puissance.....	20
II.4 convertisseur alternatif – continu (redresseur).....	22
II.4.1 Types de redresseurs	22
II.4.1.1 Redresseur non commandé	22
II.4.1.2. Redresseur commandé.....	25
Les chronogrammes des tensions :	25
La valeur moyenne de la tension U_c :	26
II.4.2 Autre types de montage redresseur	27
II.4.3 Utilisation.....	29
II.5 Conclusion.....	30

Chapitre III : Mise en évidence et simulation des perturbations BF générées par les ponts redresseurs.....	30
III.1 Introduction	32
III.2 Hypothèses liées aux dispositifs étudiés.....	32
III.3 Simulation d'un pont redresseur monophasé.....	32
III.3.1 Pont redresseur monophasé non commandé.....	32
III.3.1.1 Paramètres de simulation.....	33
III.3.1.2 Schéma de configuration étudiée.....	33
III.3.1.3 Influence de certains paramètres sur le comportement CEM du réseau	38
III.3.2 Pont redresseur monophasé commandé	51
III.3.1.1 Etude de l'influence de l'angle d'amorçage des thyristors sur les perturbations renvoyées au réseau électrique.....	55
III.4 Simulation d'un pont redresseur monophasé.....	61
III.4.1 Ponts redresseurs triphasés commandés tout thyristors et ponts mixtes	68
III.5 Conclusion	79
Conclusion Générale	80

Introduction Générale

Durant ces dernières années les dispositifs d'électronique de puissance ont été utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Ces dispositifs, basés sur des composants semi-conducteurs, mettent en jeu des rendements de plus en plus élevés. Par ailleurs, les composants semi-conducteurs sont en fait des interrupteurs qui s'amorcent et se bloquent soit par action d'une impulsion de commande, soit spontanément en fonction des grandeurs électriques extérieures.

Aujourd'hui, les performances atteintes sont telles qu'un semi-conducteur formé par quelques centimètres carrés de silicium peut conduire des courants de plusieurs centaines d'ampères et tenir des tensions dépassant le millier de volts. Le fonctionnement viable d'un dispositif électronique passe donc par une adéquation absolue entre les contraintes électriques du circuit de puissance et les limites physiques du semi-conducteur de puissance dans ce même circuit, à l'échelle de la microseconde.

Par ailleurs, l'usage des dispositifs d'électronique de puissance ne s'arrête pas à leurs utilisateurs, car nous en trouvons également sur le réseau électrique. Il est donc très important de s'assurer de leur bon fonctionnement dans des conditions qui peuvent parfois perdre un réseau complet. En effet, la prolifération de ces équipements qui fonctionnent à forts gradients de courant et de tension crée des perturbations électromagnétiques conduites ou rayonnées qui peuvent se propager et dégrader le bon fonctionnement des appareillages voisins, fait surgir un nouveau problème: leur compatibilité électromagnétique (CEM).

Dans le cadre de ce travail, notre objectif est d'étudier les problèmes de la compatibilité électromagnétique en mode conduit basses fréquences associés à des ponts redresseurs non commandés et commandés, en monophasé et en triphasé, en utilisant le logiciel PSPICE.

Le mémoire se divise en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale des concepts de base de la compatibilité électromagnétique et à l'origine et aux chemins de propagations des différentes perturbations électromagnétiques rencontrées en électronique de puissance.

Le second chapitre porte sur l'étude et la description généralisée des ponts redresseurs, des différentes topologies, du principe de fonctionnement de chaque topologie.

Le dernier chapitre est consacré à l'étude de la propagation des perturbations électromagnétiques conduites basses fréquences engendrées par les ponts redresseurs. Cette étude débute par l'identification des perturbations EM conduites basses fréquences générées par les ponts redresseurs non commandés et commandés, en monophasé et se termine par l'identification des perturbations EM conduites basses fréquences générées par les ponts redresseurs non commandés et commandés triphasé. Les résultats de simulation obtenus sont validés par rapport aux normes CEM basses fréquence en vigueur.

Nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale de ce travail.

Chapitre I : Généralités sur la compatibilité électromagnétique

I.1 Introduction

Tous les systèmes électriques et électroniques sont soumis à Cela vient de l'interférence de l'énergie parasite d'une croix Leurs frontières sont involontaires. Cette énergie parasite est perturbation électromagnétique. Si l'on s'intéresse à l'environnement électromagnétique d'un appareil, on peut faire la distinction entre les sources de perturbations d'origine naturelle et les sources de perturbations causées par les activités humaines [1].

L'objectif des recherches CEM est d'améliorer la coexistence entre les composants susceptibles d'émettre et/ou d'être sensibles aux perturbations électromagnétiques. Par conséquent, nous allons d'abord définir ce qu'est réellement EMC avec des exemples concrets. Nous verrons ensuite leurs aspects fondamentaux et leurs sources d'interférences. Enfin, nous couvrirons les activités liées à la compatibilité électromagnétique.

Ce domaine est particulièrement important à l'heure actuelle, car les équipements électriques et électroniques sont de plus en plus nombreux, complexes et stratégiques (comme ceux des avions) et donc sensibles aux pollutions électromagnétiques aux conséquences graves.

Dans ce chapitre On va délimiter trois principaux centres d'étude :la compatibilité électromagnétique, leur principe et objectif, la nature des sources de perturbation et leur mode de couplage et de propagation et les effets des perturbations sur les "victimes"

I.2 Définition de la compatibilité électromagnétique (C.E.M)

La compatibilité électromagnétique (CEM) est la capacité d'un équipement électronique ou électrique à fonctionner sans interférence électromagnétique (EM) indésirable et à ne pas émettre d'interférence EM qui pourrait interférer avec d'autres équipements dans son environnement électromagnétique.

En d'autres termes, la CEM est la capacité d'un appareil à coexister avec d'autres appareils électriques et électroniques sans provoquer d'interférences électromagnétiques indésirables ou être affecté par des interférences électromagnétiques provenant d'autres appareils.La CEM est très importante pour assurer le fonctionnement normal des équipements électroniques et électriques et pour assurer la sécurité des personnes et des biens. Il est réglementé par des normes et directives internationales, telles que la norme CISPR et la directive européenne CEM, qui imposent des limites d'émission et de sensibilité aux équipements électriques et électroniques.

I.3 Niveau de perturbation et niveau d'immunité

L'objectif de la compatibilité électromagnétique est d'assurer que [2] :

- Il y a toujours un certain niveau d'émission EMI par l'appareil ou l'environnement, il doit être inférieur à Seuils prédéfinis.
- L'appareil ou le système doit avoir un certain seuil L'immunité intrinsèque, c'est-à-dire la tolérance sans perturbation minimale de l'échec.
- Susceptibilité, c'est la capacité d'un dispositif d'être perturbé par l'extérieur.

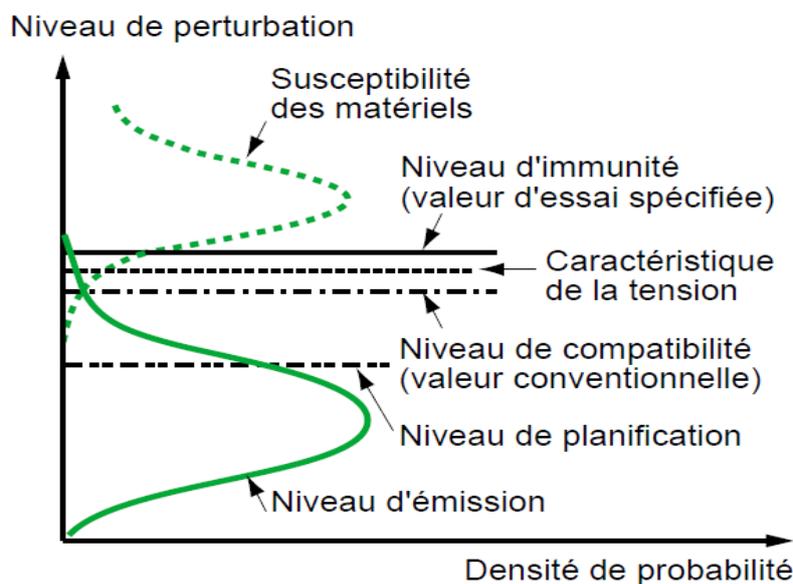


Figure I.1 : Limites d'émission, d'immunité et de compatibilité [2].

I.4 Etude phénoménologique

Une étude très souvent utilisée pour mettre en évidence divers phénomènes est l'étude phénoménologique. Cela implique d'identifier le problème en trois parties : les sources d'interférence, les chemins ou canaux de propagation et la victime.

I.5 Les sources de perturbation

Deux catégories :

I.5.1 Les sources naturelles

Parmi les sources naturelles nous citons :

Phénomènes atmosphériques dont la foudre au sens habituel du terme.

Le bruit galactique.

L'effet des rayons ionisants.

Les impulsions électromagnétiques dues aux désintégrations nucléaires.

Les sources électrostatiques qui se constituent en particulier lors de la friction de matériaux en mouvement ou du corps humain sur des matériaux textiles [3].

I.5.2 Les sources artificielles

Il existe diverses sources de perturbations industrielles, notamment les installations électriques et les activités industrielles domestiques telles que les lignes électriques, les appareillages et les moteurs. Ces perturbations régulières sont généralement plus importantes que les perturbations d'origine naturelle. Elles peuvent se présenter sous forme continue lorsque les appareils fonctionnent en mode continu, ou sous forme impulsionnelle lorsque les appareils sont perturbés dans la zone de transition [4].

Les perturbations électromagnétiques peuvent être classées en fonction de la valeur de la fréquence du signal perturbateur. On distingue ainsi les perturbations de basses et moyennes fréquences (inférieures à 5 MHz) des perturbations de haute fréquence (supérieures à 30 MHz).

I.6 Couplage électromagnétique

Par couplage il faut comprendre liaison, passage ou transmission des perturbations électromagnétiques de la source vers la victime. Le couplage est caractérisé par un coefficient k_f dit de couplage, exprimé en dB (-75 dB par exemple), pouvant être défini comme l'efficacité de transmission d'une perturbation de la source à la victime

I.6.1 Perturbations conduites

Si la source et la victime sont adjacentes avec ou sans liaison galvanique, on parle de couplage serré et peut être capacitif, inductif ou résistif. Dans ce cas, le phénomène perturbateur est une variation brutale de courant ou de tension. Ce type de perturbation est appelé **perturbation conduite** et se produit dans les câbles ou les conducteurs qui se connectent aux réseaux, aux sources d'alimentation ou aux consommateurs.

Les signaux parasites, qui peuvent être directs ou issus d'un rayonnement, vont pouvoir transiter sur les câbles d'alimentation ou de commande. Selon leur sens de propagation, on définit alors deux modes : le mode différentiel ou le mode commun.

I.6.1.1 Mode différentiel (mode symétrique)

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.

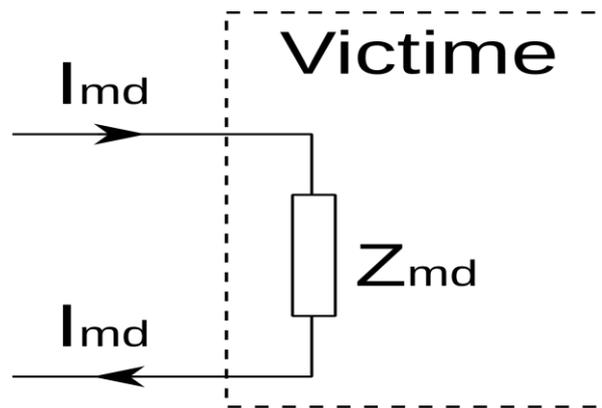


Figure I.2 : Mode différentiel

I.6.1.2 Mode commun (ou asymétrie)

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 les capacités parasites. Es 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 [5].

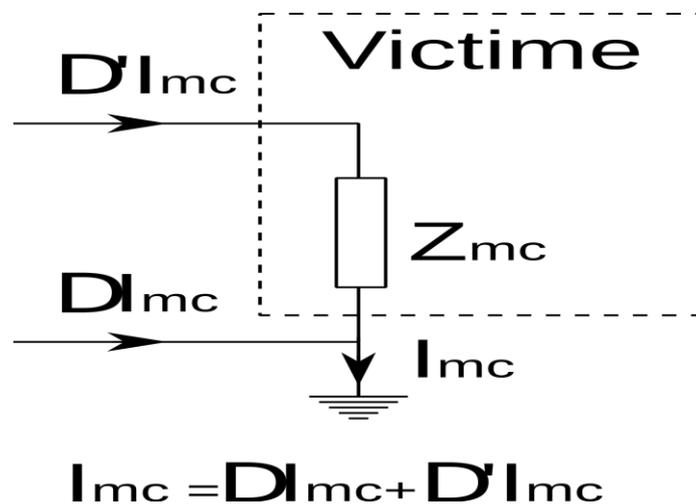


Figure I.3 : mode commun

I.6.1.2.1 Le couplage par impédance commune :

Comme son nom l'indique, le couplage d'impédance commune résulte de la présence d'une impédance commune dans deux ou plusieurs circuits. Cette impédance commune peut être une connexion à la terre, une grille de mise à la terre, un réseau de distribution

électrique, plusieurs conducteurs de retour de signal sur la même liaison basse puissance, etc [6].

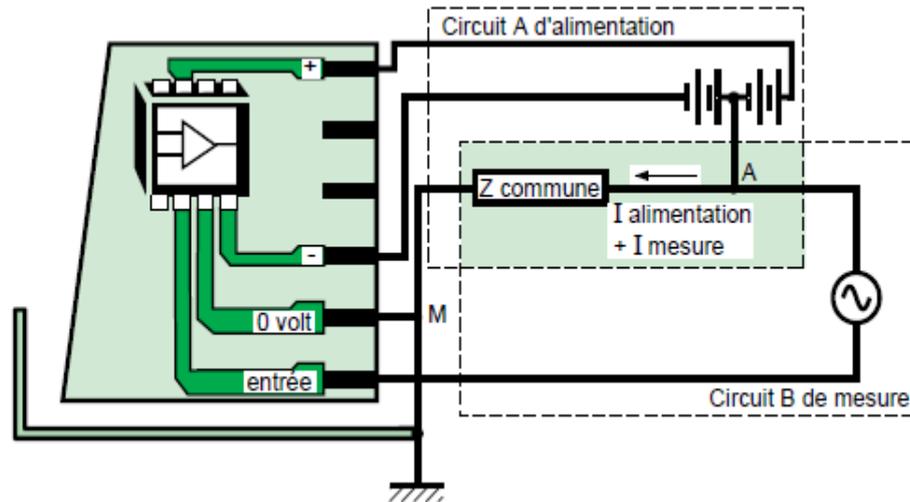


Figure I.4 : Le couplage par impédance commune

1.6.2 Couplage par rayonnement

Si la source et la victime sont éloignées et qu'il n'y a pas de connexion galvanique, les interférences seront transmises par des ondes électromagnétiques. Parlez des perturbations rayonnées ou propagées. Ce phénomène est expliqué à l'aide d'outils théoriques et expérimentaux spécifiques au domaine (équations de Maxwell et antennes de mesure).

- Le champ électrique est exprimé en V/m. Son rayonnement est produit par un circuit à haute impédance soumis à une forte différence de potentiel v (figure B).
- Les champs magnétiques sont exprimés en A/m. Son rayonnement est produit par un circuit à basse impédance avec un courant i (Figure A).

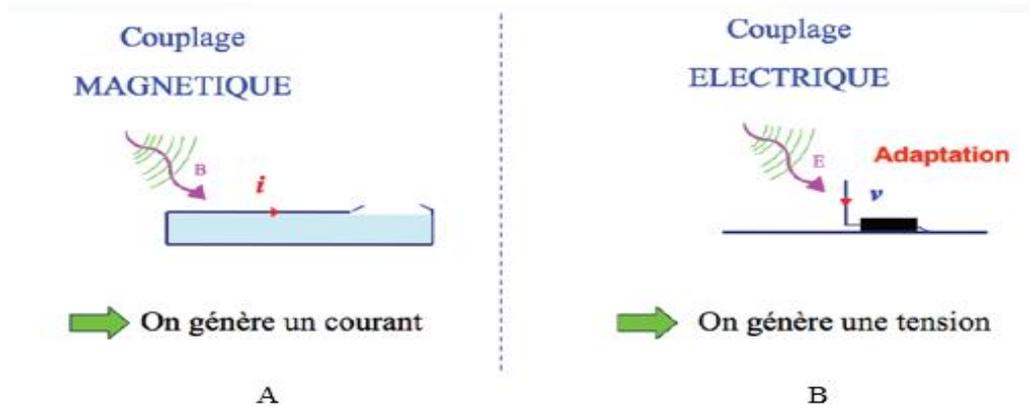


Figure I.5 : Emissions en champ magnétique (A) et en champ électrique (B)

- Un champ électromagnétique est créé chaque fois qu'une charge électrique est en mouvement. Ce champ résulte de la combinaison de deux ondes (une électrique et une magnétique) se propageant à la vitesse de la lumière.
- Pour des distances à la source inférieure à $\lambda / 2\pi$ nous considérerons que nous sommes en champs proches.
- Pour des distances à la source supérieure à $\lambda / 2\pi$ nous considérerons que nous sommes en champs lointains.
- Avec λ c'est La longueur d'onde égale à le rapport de la vitesse de propagation de L'onde sur la fréquence des signaux constituant cette onde électromagnétique

I.6.2.1 Couplage capacitif

Dans ce cas, il existe sur un circuit perturbateur une tension susceptible de produire des perturbations. Il existe aussi une capacité entre ce circuit perturbateur et un autre circuit, qui sera la victime. Par cette capacité, de l'énergie électrique perturbatrice atteint le circuit victime

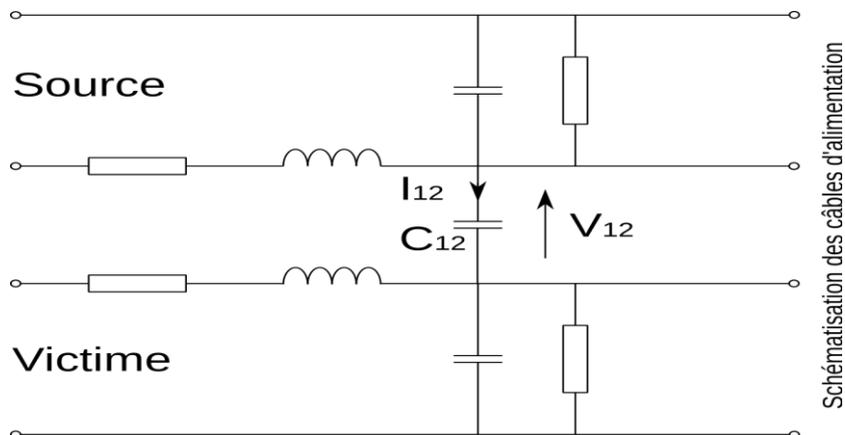


Figure I.6 : Diaphonie capacitive

I.6.2.2 Couplage inductif

Dans ce cas, un courant circulant dans le circuit perturbateur peut provoquer des interférences. Il y a un circuit victime près de ce circuit. Un courant provenant d'un conducteur dans un circuit interférant crée un champ magnétique autour de lui. Ce champ magnétique induit des courants dans le circuit victime.

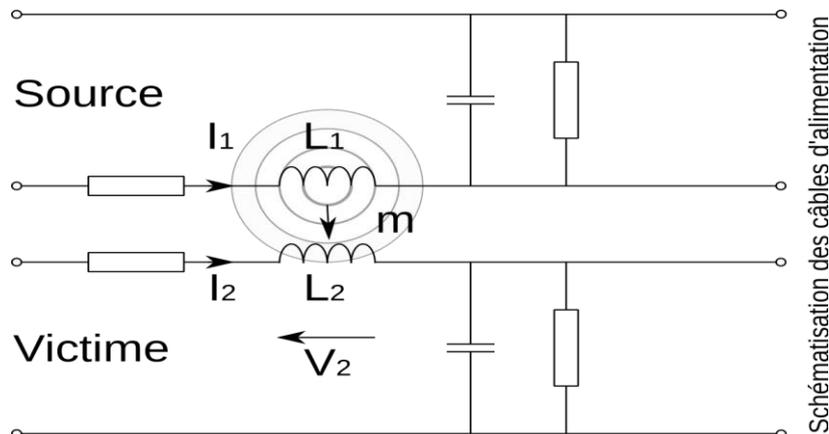


Figure I.7 : Diaphonie Inductive

I.7 Les perturbations électromagnétiques

Perturbation électromagnétique désigne tout phénomène électromagnétique susceptible d'affecter les performances d'un appareil, d'un équipement ou d'un système. Ces perturbations peuvent être du bruit électromagnétique, des signaux indésirables ou des changements dans le milieu de propagation [7].

I.7.1 Perturbations à base fréquence

- Il s'agit principalement de perturbations de mode différentiel (Harmoniques de courant des alimentations, fluctuations de tension dues à des variations de charge...)
- Les champs magnétiques et électriques des équipements de puissance sont aussi à considérer dans certains cas (sources : transformateur, ligne haute tension, moteur... ; victimes : capteurs à effet hall, tubes cathodiques...) [7].

I.7.1.1 Perturbations BF en mode conduit

Les perturbations BF ont durée longue, au moins quelques dizaines de microsecondes. Elles peuvent être analysées par des schémas équivalents simples à constantes localisées et se répartissent en deux familles :

- Les perturbations BF entretenues : dont la durée conventionnelle dépasse une seconde.

- Les perturbations BF transitoires : qui sont beaucoup moins gênantes que les précédentes de même amplitude.

I.7.1.2 Perturbations BF en mode rayonné

En basses fréquences, le champ électrique n'a presque aucun effet, seul le champ magnétique peut poser de réels soucis. Qu'il soit transitoire ou entreteu, le champ magnétique à basse fréquence est habituellement généré au voisinage immédiat des victimes.

I.7.2 Perturbations à hautes fréquences

I.7.2.1 Perturbations HF en mode conduit

- Perturbations véhiculées essentiellement en mode commun, mais peut avoir une source de mode différentiel.
- Le rayonnement dans cette bande de fréquence est bien souvent véhiculé par les câbles qui font antenne (plus ou moins efficace selon la longueur et la disposition).

I.7.2.2 Perturbations HF en mode rayonné

Les perturbations rayonnées se retrouvent toujours couplées sous forme de perturbations conduites. Il est toujours intéressant de connaître la source du rayonnement du champ HF, car parfois une simple distance peut réduire ou supprimer le risque de panne

I.7.3 Perturbations permanentes

Ce sont les perturbations provenant essentiellement d'émetteur radio (par rayonnement direct, ou par induction sur les câbles), du champ magnétique généré par les lignes d'alimentation de la déformation de la tension de l'alimentation (harmoniques, ondulation DC...) [7].

Les réglementations exigent généralement que l'immunité d'un appareil soit suffisante pour l'empêcher de se dégrader au-delà des spécifications lorsqu'il est soumis à ce type de perturbation.

I.7.4 Perturbations transitoires

Ce sont des perturbations provenant essentiellement :de décharges électrostatiques, d'ondes de foudre, de commutations électriques dans le réseau d'énergie, de creux de tension

Dans la réglementation, il est globalement admis que la susceptibilité de l'appareil permette une dégradation temporaire de fonction, mais avec auto-récupération de cette fonction une fois la perturbation terminée (sans intervention de l'utilisateur).

I.8 Types de C.E.M [8]

I.8.1 C.E.M inter système

La CEM inter système tient compte du déploiement du système dans les conditions opérationnelles et doit garantir que le système considéré et les autres systèmes existants ou

prévus partageant la (les) même(s) sous-bandes de fréquence dans la même zone géographique, seront en mesure de cohabiter, sans causer ni subir de dégradation inacceptable.

I.8.2 C.E.M intra système

La CEM intra système concerne la compatibilité électromagnétique des systèmes faisant partie d'installation ou de plates-formes importantes (navires, avions,) et a pour but de réduire à un niveau acceptable, les brouillages entre systèmes co-implantés et d'éviter par conséquent toute détérioration de leurs performances.

I.8.3 C.E.M de matériel

Elle concerne la compatibilité électromagnétique des sous-ensembles constituant un matériel donné et a pour but d'assurer le bon fonctionnement du sous ensemble

I.9 Concept de la protection [9]

Sur le plan théorique, la protection consisterait à découpler le système sensible de son environnement électromagnétique. Ce découplage passe d'abord par l'identification des éléments perturbateurs ensuite par la réduction de leurs effets sur la victime ou par leur éloignement par rapport à celle-ci. En pratique, des considérations technico-économiques sont à prendre en compte lors de la définition de la stratégie de protection !. La stratégie adoptée alors est souvent basée sur un compromis que fera l'industriel entre le coût de la protection et les probables dégâts occasionnés en cas d'agression électromagnétique. Les différentes actions de protection possibles peuvent se résumer comme suit [9] :

I.9.1 Action sur l'élément perturbateur

L'action sur l'élément perturbateur n'est possible que pour une source de perturbation artificielle. La protection dans ce cas, consiste en la réduction de l'intensité des signaux perturbateurs émis par la source à un niveau admissible conforme aux normes CEM. Cette réduction peut se faire de deux manières à savoir :

- a- Le blindage des parties rayonnantes de la source de perturbation.
- b- Le filtrage électrique de ces entrées-sorties.

I.9.2 Action sur l'élément perturbé

Elle consiste en une opération de durcissement de l'élément perturbé de façon à lui assurer une grande immunité vis à vis des agressions de son environnement électromagnétique.

I.9.3 Action sur le moyen de couplage

Ce type d'action repose sur la réduction du phénomène de captation des signaux parasites par les lignes et câbles et leur acheminement vers les charges (utilisation d'écrans magnétiques, mises à la masse, filtrage, torsadage, etc.).

I.10 CEM en électronique de puissance

I.10.1 Problématique de la C.E.M en électronique de puissance

L'électronique de puissance utilise les semi-conducteurs de puissance en mode interrupteur. Ce fonctionnement confère au convertisseur un rendement très élevé, par contre, il donne lieu à de nombreuses perturbations électromagnétiques dues essentiellement aux commutations rapides des semi conducteurs. Les perturbations électromagnétiques se propagent vers la source d'alimentation du convertisseur et vers la charge qu'il alimente. Une partie plus infime de cette énergie est rayonnée [11].

I.10.2 Modélisation C.E.M en électronique de puissance

pour étude C.E.M convertisseur statique il existe deux méthodes :

I.10.2.1 Méthodes indirect

Le principe de ces méthodes consiste à faire une simulation dans le domaine temporel suivie d'une analyse fréquentielle. L'avantage de la simulation temporelle est de pouvoir analyser les régimes transitoires engendrés par les commutations des interrupteurs de puissance, et avoir une vision du comportement de la structure du point de vue de commande.

I.11.2.2 Méthodes direct

Puisque l'ingénieur en CEM a besoin de tenir des gabarits de spectres imposés par les normes, il est intéressant de travailler directement dans le domaine des fréquences sans passer par le traitement temporel. Toutefois, les méthodes basées sur une approche directe demandent parfois plus de recul et d'expérience que celles ayant recours aux simulations temporelles. La plupart de ces méthodes nécessitent de connaître, pour une structure donnée, les principaux mécanismes

de génération des perturbations ainsi que l'ensemble des chemins de propagation critiques, ce qui peut mener rapidement vers une situation complexe

I.11 Normalisation CEM en électronique de puissance

I.11.1 Normes basses fréquences

Ces normes font référence aux limites d'émissions basse fréquence (harmoniques) des différents types d'équipements du réseau. Par conséquent, les équipements électriques doivent respecter des limites d'amplitude harmonique clairement définies. Les normes basse fréquence sont élaborées par des groupes d'experts internationaux représentant les fabricants et les utilisateurs d'équipements, ainsi que des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialisés dans des domaines considérés [11].

La norme CEI 1000 définit les niveaux de courant et de tension harmoniques à respecter. Le tableau présente la norme CEI-1000-3-2 qui précise les limites de courant d'injection sur le réseau public basse tension par les équipements dont le courant est inférieur à 16A par phase

Table I.1: Limites imposées par la norme CEI 1000-3-2

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 * 15/h$		

La norme CEI-1000-2-2 fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basses fréquences et la transmission de signaux sur les réseaux de distribution basse

tension, publics et industriels. Le tableau 5.3 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension [10].

Table I.2 : Limites imposées par la norme CEI 1000-2-2

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
non multiple de 3		multiple de 3			
Rang	Vh/V1 (%)	Rang	Vh/V1 (%)	Rang	Vh /V1 (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.5	6	0.5
13	3	≥21	0.2	8	0.5
17	2			10	0.5
19, 23 et 25	1.5			≥12	0.2
> 25	0.2+0.5*25/h				

Les tableaux I.3 et I.4 donnent les limites de distorsion de tension pour les fournisseurs d'énergie électrique ainsi que les limites de distorsion de courant pour les systèmes de distribution. Les harmoniques pairs sont limités à 25% des limites des harmoniques impairs définis ci-dessous [11].

Table I.3 : Limites de distorsion de tension pour les fournisseur d'énergie électrique

Niveau de tension	Taux de distorsion individuel de tension (%)	Taux de distorsion global de tension (%)
≤ 1 kV	5	8
≥ 1.001 kV et ≤69 kV	3	5
≥ 69.001 kV et ≤161 kV	1.5	2.5
≤161.001 kV	1	1.5

Table I.4 : Limites de distorsion de courant pour les systèmes de distribution (120 V à 69 kV)

Distorsion maximale du courant harmonique en pourcent de I_L						
$\frac{I_{SC}}{I_L}$	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n < 50$	TDD
$\frac{I_{SC}}{I_L} < 20$	4	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < \frac{I_{SC}}{I_L} < 50$	7	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < \frac{I_{SC}}{I_L} < 100$	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < \frac{I_{SC}}{I_L} < 1000$	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$\frac{I_{SC}}{I_L} > 1000$	15	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
I_{SC} : Courant de court-circuit maximal. I_L : Courant maximal demandé par la charge (composante fondamentale).						

I.11.2 Normes hautes fréquences

Dans cette section, nous décrivons les critères de spécification des niveaux d'émission HF conduits. Parmi les normes pertinentes, nous pouvons citer : la norme EN61000, la norme EN55011 et la norme EN55022. Ces spécifications se divisent en deux catégories. La première, dite "Classe A", définit les niveaux d'émission des équipements destinés à être utilisés dans le secteur industriel. Le second est réservé au secteur domestique et hospitalier (appareils de classe B). Ces dernières sont plus strictes que les spécifications prévues pour les équipements de classe A. La figure montre les limites d'émissions conduites imposées par ces normes [10] respectivement.

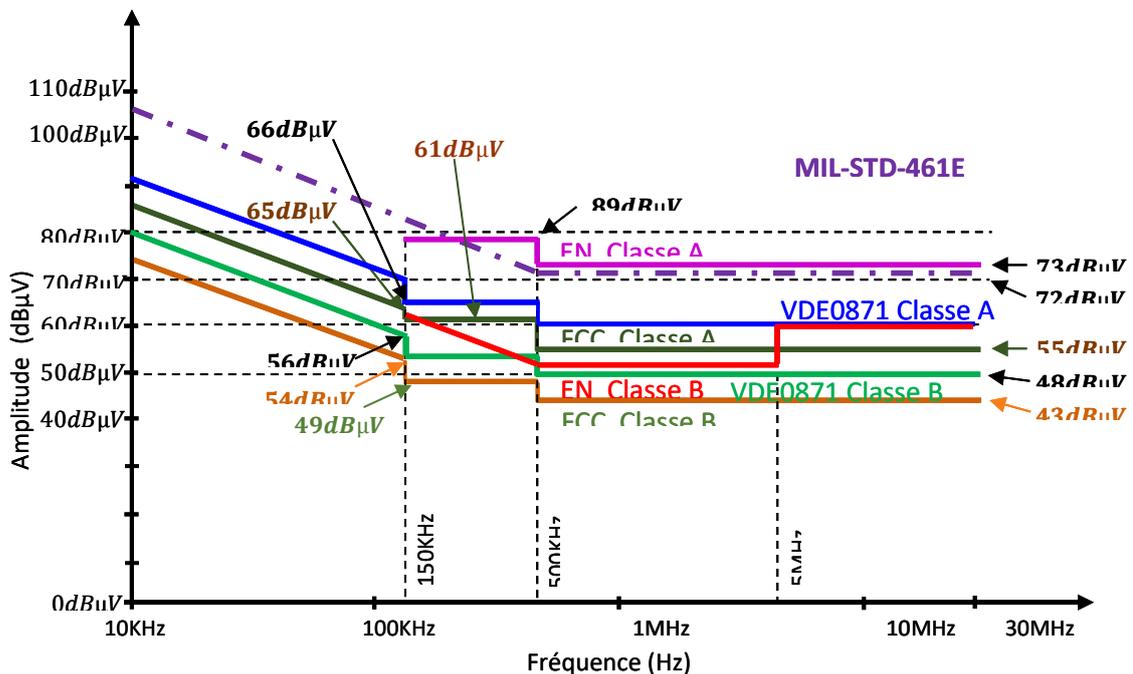


Figure I.8: Limites relatives aux émissions conduites

I.12 Conclusion

En conclusion, la compatibilité électromagnétique est une discipline qui vise à assurer le bon fonctionnement des systèmes électroniques et électriques dans leur environnement électromagnétique. Elle prend en compte les différentes sources de perturbations électromagnétiques, qu'elles soient d'origine naturelle ou industrielle, et cherche à les limiter pour éviter qu'elles n'affectent le fonctionnement des équipements électroniques.

Pour assurer une bonne compatibilité électromagnétique, il est important de prendre en compte les normes et les réglementations en vigueur, de réaliser des mesures et des tests pour évaluer les niveaux de perturbations électromagnétiques, et de concevoir des équipements électriques et électroniques qui soient résistants aux perturbations électromagnétiques. Le prochain chapitre, sera consacré à une analyse à profondeur des ponts redresseur, où nous synthétiserons de manière manaire d'étailé leurs caractéristiques et fonctionnement.

Chapitre II : Synthèse sur conversion alternative continue

II.1 Introduction

Un montage redresseur est un circuit électronique couramment utilisé pour convertir une tension alternative en une tension continue. Il est utilisé dans de nombreuses applications, notamment dans les alimentations électriques des équipements électroniques, les systèmes de régulation de tension, les moteurs électriques et les circuits de charge des batteries.

Cependant, lorsqu'un montage redresseur est utilisé, il peut générer des perturbations électromagnétiques qui peuvent affecter le fonctionnement des autres équipements électroniques à proximité. C'est pourquoi la compatibilité électromagnétique (CEM) est un élément clé à prendre en compte lors de la conception et de l'utilisation de montages redresseurs.

Dans cette perspective, il est important de comprendre les principes de fonctionnement et les caractéristiques des différents types de montage redresseur pour pouvoir choisir le montage le plus adapté à l'application visée.

II.2 Electronique de la puissance

L'électronique de puissance est une matière assez récente. Si ses prémices datent de l'utilisation des premiers tubes à vide (Thyratron, triodes, etc.) dans les années 1930, «l'explosion» des applications liées à cette matière est due au développement des thyristors puis des transistors spécifiques dits « transistors de puissance » dans les années 1970. L'évolution permanente de ces composants n 'a cessé depuis d' apporter de nouvelles possibilités et d 'étendre l'influence de cette matière à pratiquement tout ce qui consomme de l'énergie électrique en basse tension ...

En réalité, l'électronique de puissance peut être définie par « la partie de l'électronique spécialisée dans le changement de forme des tensions et des courants électriques associés à l'aspect énergétique des circuits électriques ». On l'appelle aussi « conversion statique de l'énergie électrique ».

Dans ce domaine l'amplification en puissance et la puissance de sortie des dispositifs est prépondérante.

II.3 Convertisseur statique

Les convertisseurs statiques sont des circuits électroniques qui permettent de convertir une source d'énergie électrique en une autre forme d'énergie électrique, généralement de nature différente. Les convertisseurs statiques sont couramment utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans les systèmes d'alimentation électrique des équipements électroniques, les systèmes de régulation de tension, les moteurs électriques, les éclairages à LED, etc.

II.3.1 Classification de convertisseur statique [12]

II.3.1.1 Convertisseur AC. DC

La conversion AC/DC consiste à « transformer » une tension alternative, voire un système de tensions triphasé, en une tension continue utilisable par un récepteur. Cette opération s'appelle couramment « redressement ». Pour opérer concrètement un redressement, il est le plus souvent nécessaire d'utiliser des composants passifs : les diodes et thyristors. On parle alors dans ce cadre précis de « redressement non commandé et commandé » des tensions du réseau alternatif.

II.3.1.2 Convertisseur DC.AC

La conversion DC/AC consiste à générer une ou plusieurs tension(s) alternative(s), le plus souvent sinusoïdale(s), à partir d'une tension continue. Ceci permet principalement d'alimenter des appareils adaptés aux tensions réseaux à partir de batteries ou de tensions redressées, ou encore de piloter, par variation de la fréquence, un moteur AC à vitesse variable. Les circuits qui réalisent ces opérations sont appelés « onduleurs ».

II.3.1.3 Convertisseur DC.DC

La conversion DC/DC consiste à générer une tension ou un courant continu à partir d'une source d'alimentation également continue. Le besoin de ce type de conversion est très important dans la plupart des appareillages électriques et notamment dans l'alimentation de circuits électroniques nécessitant souvent plusieurs niveaux de tensions différents à partir d'un bloc d'alimentation unique. Ces structures, souvent désignées sous le nom de hacheurs, reposent sur l'utilisation de commutateurs de types « transistors » commandés à l'ouverture et à la fermeture.

II.3.1.4 Convertisseur AC.AC

La conversion AC/ AC consiste à « transformer » une tension alternative, voire un système de tensions triphasé, en une autre tension alternative réglable (ou un autre système triphasé) utilisable par un récepteur. Pour ce faire, plusieurs possibilités se présentent. Si la tendance actuelle est à l'enchaînement d'un redressement et d'un montage « onduleur », il est néanmoins possible de convertir directement des tensions alternatives en utilisant des thyristors. Les courants délivrés étant alternatifs, les thyristors sont alors toujours appariés et associés de manière à réaliser un composant réversible en courant : « le Triac ».

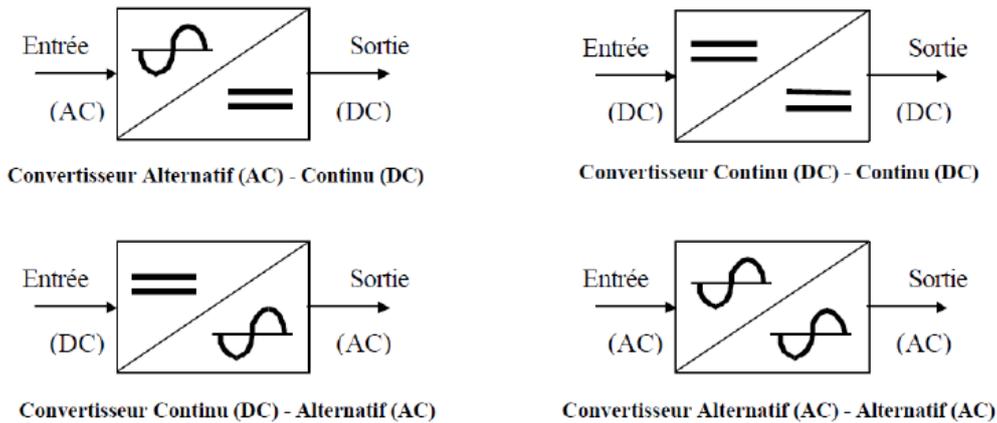


Figure II.1 : les convertisseurs statiques

II.3.2 Réversibilité de convertisseur

La réversibilité d'un convertisseur statique fait référence à sa capacité à fonctionner dans les deux sens de conversion : de l'entrée vers la sortie et de la sortie vers l'entrée. Un convertisseur réversible peut fonctionner comme un convertisseur abaisseur (Buck) lorsqu'il convertit une tension d'entrée élevée en une tension de sortie plus basse, et comme un convertisseur élévateur (Boost) lorsqu'il convertit une tension d'entrée plus basse en une tension de sortie plus élevée.

II.3.3 Constitution d'un convertisseur :

La constitution d'un convertisseur statique dépend de sa topologie, qui est déterminée en fonction de l'application pour laquelle il est utilisé. Cependant, la plupart des convertisseurs statiques sont composés de composants électroniques tels que des diodes, des transistors, des condensateurs, des inductances, des résistances, etc.

II.3.3.1 Interrupteur les plus utile en électronique de puissance

A- Thyristor

Le thyristor est un interrupteur semi-commandable. La commande externe n'agit que pour la fermeture. La fermeture de l'interrupteur thyristor correspond à l'amorçage d'un phénomène d'avalanche au niveau de la jonction voisine de la gâchette. Elle s'effectue en envoyant des impulsions entre gâchette G et cathode K (symbole $G \uparrow$) alors que la tension entre anode A et cathode K est positive ($V_{AK} > 0$ correspond au symbole $v > 0$).

B- Diode

La diode est le composant à semi-conducteurs le plus simple, le moins coûteux, le plus fiable. Mais il n'est pas commandable. Une diode conduit dès que la tension à ses bornes est positive (symbole $v \uparrow = 0$) et se bloque quand le courant qui la traverse tend vers 0

(symbole $i \downarrow = 0$). En définitive, les changements d'état de la diode sont spontanés et donnés par les relations suivantes :

À la fermeture, $CF = (v \uparrow = 0)$

À l'ouverture, $CO = (i \downarrow = 0)$

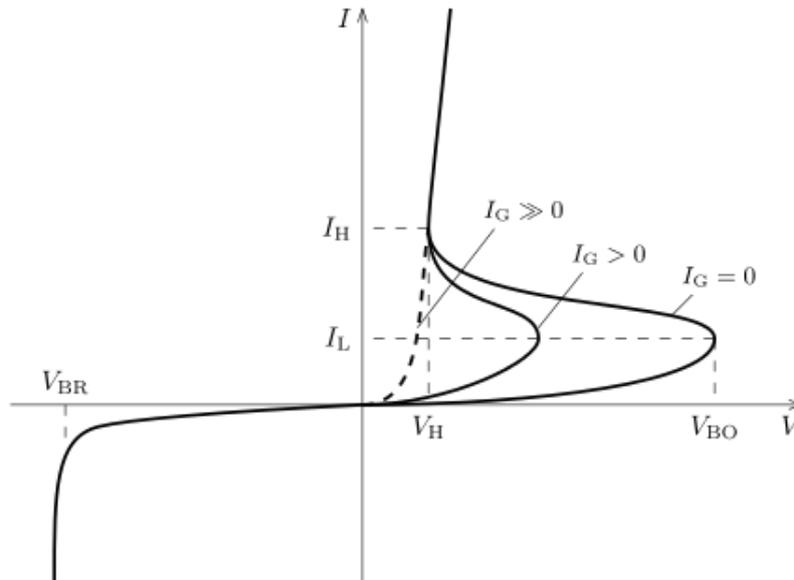


Figure II.2 : Caractéristique d'un thyristor

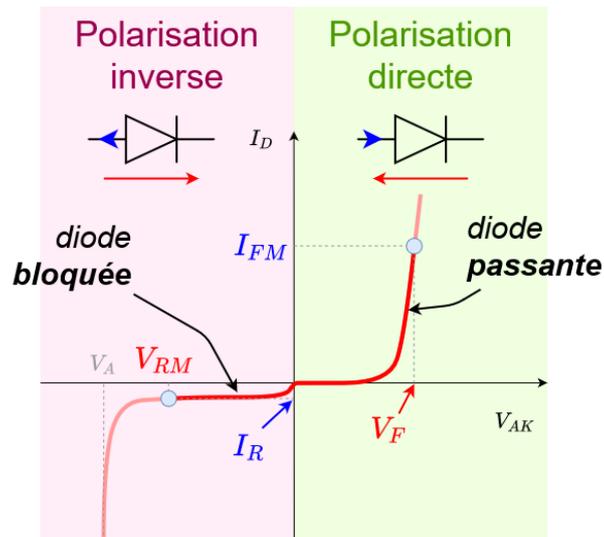


Figure II.3 : Caractéristique d'une diode

II.4 convertisseur alternatif – continu (redresseur)

Un convertisseur alternatif-continu (AC-DC), également connu sous le nom de redresseur, est un type de convertisseur statique utilisé pour convertir une tension alternative (AC) en une tension continue (DC).

II.4.1 Types de redresseurs [13]

il existe différents types de redresseur utilisés dans les systèmes électronique de puissance. les principaux types de redresseur sont les suivants

- les redresseurs non commandés, constitués d'une ou plusieurs diodes en série avec la charge
- les redresseurs commandés, constitués d'un ou plusieurs thyristors ou bien d'un ou plusieurs transistor de puissance (MOSFET ou IGBT) en série avec la charge.

II.4.1.1 Redresseur non commandé

A- Redressement « PD2 » (pont double monophasé « double alternance »)

Ce style de pont, également appelé « pont de Graetz » est la structure incontournable extrêmement classique du redressement monophasé. Le schéma électrique correspondant, toujours sur une charge résistive, est représenté sur la figure (II.4)

Le pont de diodes est constitué de quatre diodes qui sont disposées en forme de pont. Les deux diodes supérieures sont connectées à la borne positive de l'alimentation AC, tandis que les deux diodes inférieures sont connectées à la borne négative. Le circuit est alimenté en alternance dans les deux directions, ce qui permet d'obtenir une tension de sortie constante et continue.

Le pont double monophasé double alternance est une amélioration par rapport au redressement simple monophasé, car il permet de fournir une tension continue avec une meilleure qualité de signal et une tension de sortie plus stable.

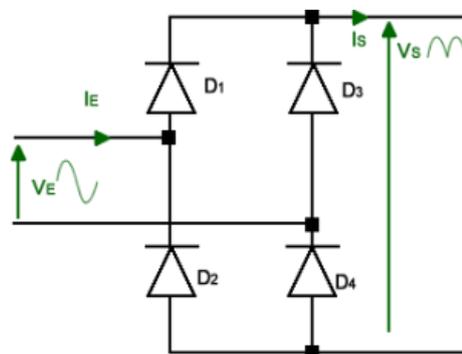


Figure II.4 : Pont double monophasé « double alternance »)

Explications :

Parmi D1 et D3 , une seule des 2 diodes peut conduire,celle qui a sur son anode la tension la plus élevée

Parmi D2 et D4 , une seule des 2 diodes peut conduire,celle qui a sur sa cathode la tension la plus faible

Donc:

- Si $V_E > 0$ D1 et D4 peuvent conduire et $V_S = +V_E$
- Si $V_E < 0$ D2 et D3 peuvent conduire et $V_S = -V_E$
- Si la charge est en circuit ouvert ou présente une fem E élevée, qui entraîne un VAK des diodes négatif,

alors celles-ci restent bloquées et $I_S = 0$, $V_S = 0V$ ou $+E$ dans le cas d'une charge R.L.E. Si la conduction est continue, comme dans la figure ci-contre, on démontre que [13]:

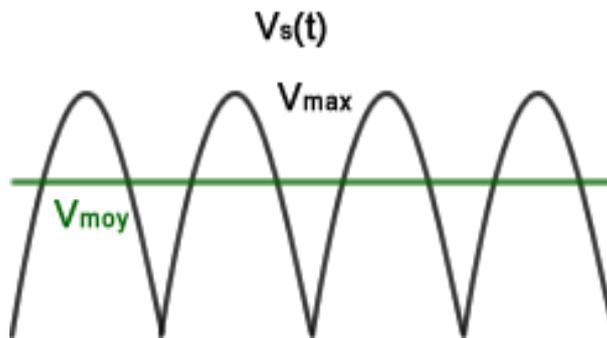


Figure II.5 : la tension en sortie du redresseur $V_s(t)$

$$V_{smoy} = \frac{2}{\pi} V_{Emax} \quad (II. 1)$$

B- Redressement triphasé non commandé - PD3

Le pont de diodes est constitué de six diodes qui sont disposées en forme de pont. Les trois phases de l'alimentation triphasée sont connectées aux bornes supérieures du pont, tandis que les bornes inférieures du pont sont connectées à la charge.

Le redressement PD3 est un redressement non-commandé, ce qui signifie qu'il ne permet pas de contrôler la tension de sortie. La tension de sortie est déterminée uniquement par la tension d'entrée et la charge connectée au circuit. Le redressement PD3 produit

également une tension de sortie pulsée, qui peut nécessiter un filtrage supplémentaire pour obtenir une tension de sortie plus lisse.

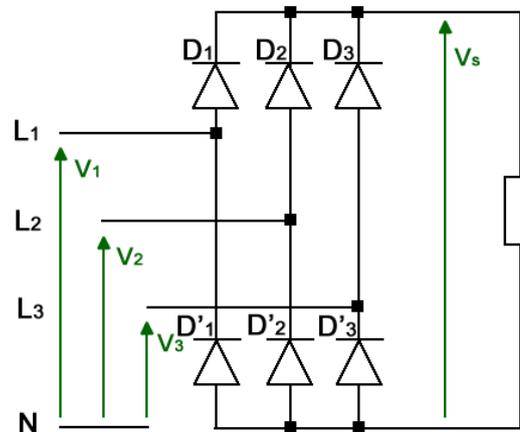


Figure II.6 : pont Triphasé non commandé - PD3

Explications:

→ Parmi D1, D2 et D3 seule une seule diode peut conduire à la fois : Celle dont l'anode est soumise à la tension la plus élevée,

les cathodes seront au potentiel de $\text{Max}(V_1, V_2, V_3)$ en conduction continue

→ Parmi D'1, D'2 et D'3 seule une seule diode peut conduire à la fois : Celle dont la cathode est soumise à la tension la plus faible,

les anodes seront au potentiel de $\text{Min}(V_1, V_2, V_3)$ en conduction continue

→ Si le courant de sortie est nul alors $V_s=0$ ou $V_s=E$ selon la nature de la charge

Pour terminer, il suffit de remarquer que si Di et D'j conduisent alors $V_s=V_i-V_j$ c'est à dire $V_s=U_{ij}$

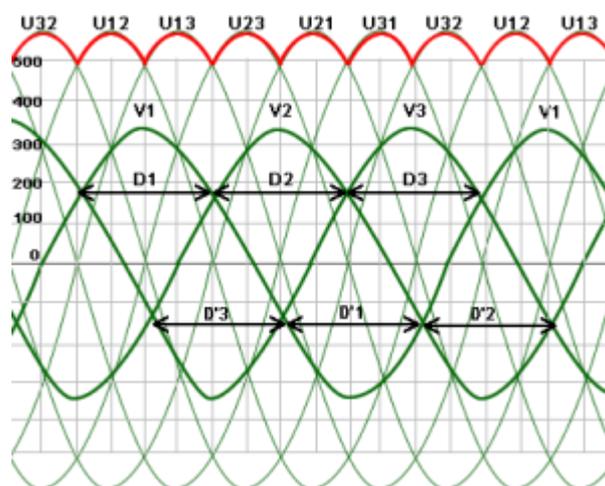


Figure II.7 : Formes d'ondes des différentes grandeurs d'un redresseur PD3

Si la conduction est continue, comme dans la figure ci-dessus, la tension de sortie de pont égal a :

$$V_{Smoy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_{max} \quad (II.2)$$

II.4.1.2. Redresseur commandé

- Redressement monophasé commandé – PD2

Le redressement monophasé commandé PD2 (Pont Double Monophasé Commandé) est constitué de quatre thyristors (ou triacs) qui sont disposés en forme de pont. Les thyristors sont commandés pour permettre ou bloquer le passage du courant dans une direction

donnée. Lorsque les thyristors sont commandés, ils permettent de contrôler l'angle de conduction et la forme d'onde de la tension de sortie.

Le redressement monophasé commandé PD2 permet de contrôler la tension de sortie en ajustant l'angle de conduction des thyristors. En modifiant l'angle de conduction, la tension de sortie peut être réglée et lissée pour obtenir une tension de sortie continue plus stable et plus précise.

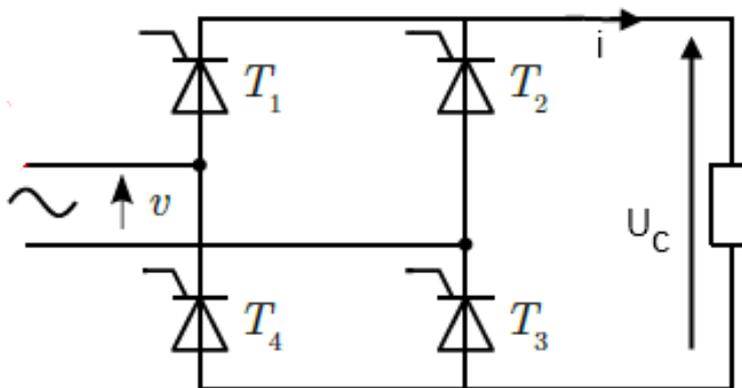


Figure II.8 : pont monophasé commandé – PD2

Explications:

Soit θ_0 le retard à l'amorçage. À partir de θ_0 , les thyristors T1 et T3 sont passants. Ils continuent à l'être jusqu'à ce que T2 et T4 deviennent passants. $v = U_c$. À partir de $\pi + \theta_0$, les thyristors T2 et T4 deviennent passants et entraînent le blocage de T1 et T3. Ils continuent à l'être jusqu'à ce que T1 et T3 deviennent passants. $-v = U_c$.

Les chronogrammes des tensions :

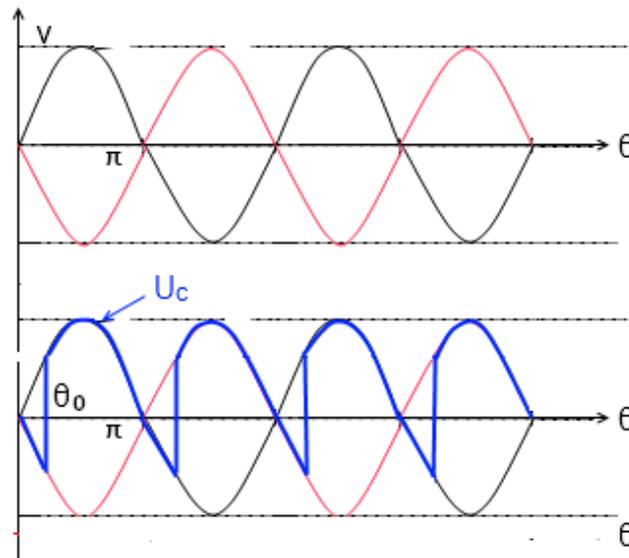


Figure II.9 : Les chronogrammes de la tension v et U_c .

La valeur
de la tension U_c :

moyenne

$$V_s \text{ moy} = \frac{2V_m}{\pi} \cos\theta \quad (\text{II. 3})$$

C- Redressement Triphasé commandé - PD3

Le redressement triphasé commandé PD3 (Pont Double Triphasé Commandé) est une technique de redressement utilisée pour convertir une tension alternative triphasée en une tension continue (DC) en utilisant un pont de diodes commandé.

le redressement triphasé commandé PD3 utilise des thyristors (ou des triacs) pour contrôler le processus de redressement. Le redressement triphasé commandé PD3 permet de contrôler la tension de sortie en ajustant l'angle de conduction des thyristors. En modifiant l'angle de conduction, la tension de sortie peut être réglée et lissée pour obtenir une tension de sortie continue plus stable et plus précise.

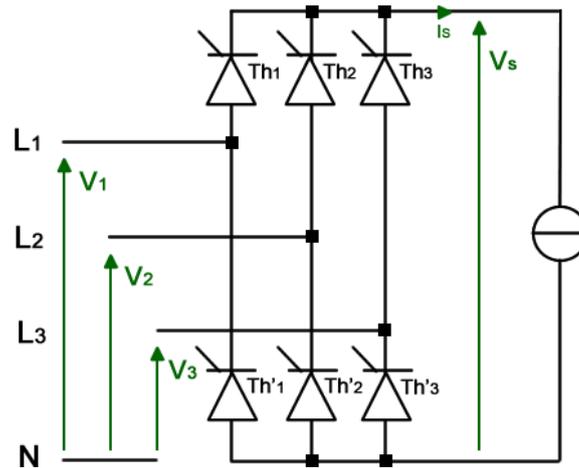


Figure II.10 : Triphasé commandé - PD3

Explications:

Le courant de sortie est toujours positif mais la tension moyenne peut devenir négative (onduleur assisté) si l'angle d'amorçage est compris entre 90° et 180° . Lorsqu'on amorce les thyristors avec un angle de retard à l'amorçage de 0° , la tension de sortie est similaire à celle obtenue avec un pont de diodes:

Pour un angle d'amorçage non nul, il suffit de décaler les intervalles de conduction du même angle et reconstruire la tension de sortie.

Le calcul montre que l'expression de la tension moyenne de sortie est :

$$V_{Smoy} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_{max} \cos\theta_o \tag{II.4}$$

II.4.2 Autre types de montage redresseur

Pont mixte monophasé:

Le pont mixte monophasé est constitué de 2 diodes et 2 transistors, il permet le réglage de la tension de sortie à travers l'angle d'amorçage du thyristor il n'est pas réversible en puissance : ne peut pas renvoyer d'énergie sur le réseau alternatif. Il existe deux formes de pont mixte monophasé :

Pont mixte asymétrique:

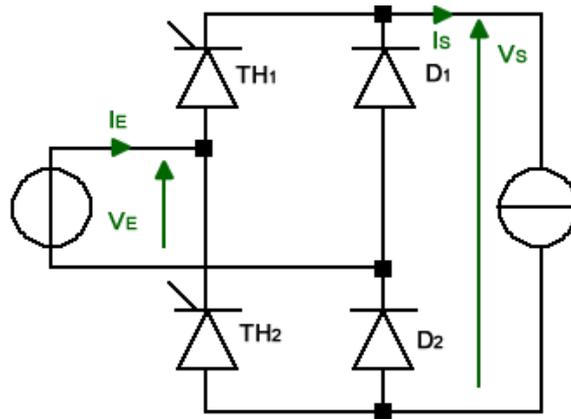


Figure II.11 : Pont mixte asymétrique

Pont mixte symétrique

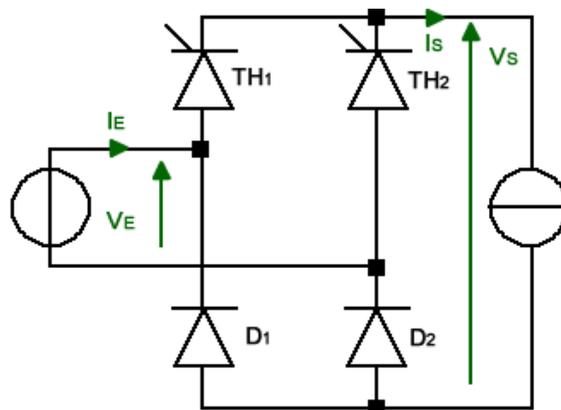


Figure II.12 : Pont mixte symétrique

Pont mixte triphasé

[14] :

Ce pont est composé de 3 thyristors et de 3 diodes. Les thyristors T1, T2 et T3 sont amorcés pendant l'alternance positive des tensions v_1 , v_2 et v_3 . Les diodes D1, D2 et D3 sont passantes pendant l'alternance négative.

La référence des angles d'amorçage est toujours l'angle d'amorçage naturel.

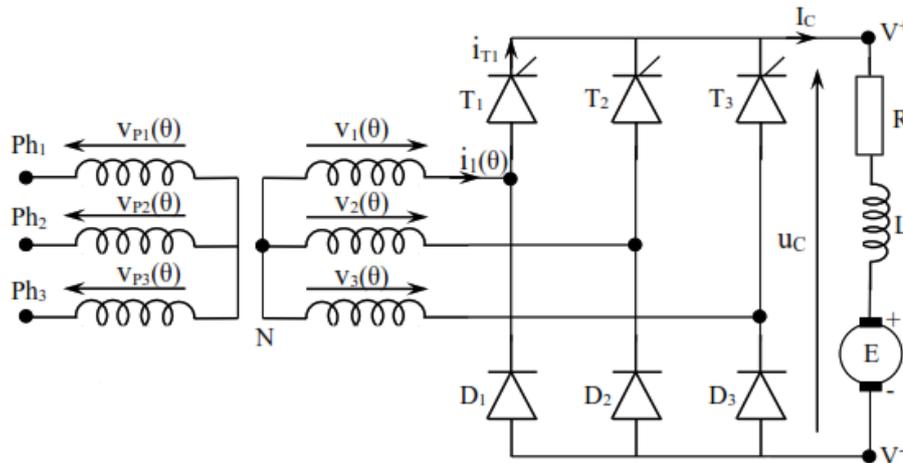


Figure II.13 : Redresseurs triphasés PD3 mixte

$$V_{smoy} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (1 + \cos(\theta)) \quad (II.5)$$

II.4.3 Utilisation

- Le redressement PD2 est utilisé dans de nombreuses applications, notamment dans les alimentations électriques des ordinateurs, des équipements audio, des systèmes de climatisation, des moteurs à courant continu, etc.
- Le pont triphasé permet de ne pas trop déséquilibrer le réseau alternatif
- La particularité de ne comporter que des thyristors permet une réversibilité en puissance et de renvoyer de la puissance au réseau alternatif
- Les ponts redresseurs sont utilisés pour convertir la tension alternative du secteur en une tension continue pour alimenter les équipements électroniques tels que les ordinateurs, les téléviseurs, les équipements audio, les systèmes de climatisation, etc.
- Les ponts redresseurs sont utilisés pour alimenter les moteurs à courant continu, qui sont largement utilisés dans les applications industrielles, automobiles et aérospatiales.
- Les ponts redresseurs sont utilisés pour convertir la tension alternative produite par les sources d'énergie renouvelable telles que les éoliennes et les panneaux solaires en une tension continue utilisable.

II.5 Conclusion

En cours de ce chapitre nous avons exploré les différentes strictures de convertisseur AC-DC. Les montages redresseurs PD3 ce distributaire par leurs formes donde de tension et courant considérablement améliorés paraports aux montages redresseurs du type PD2. étant donné leurs étulisations répondues, le prochain chapitre cera dédié à l'étude des perturbations électromagnétiques basses fréquences engendrées par ces convertisseurs.

**Chapitre III : Mise en
évidence et simulation
des perturbations BF
générées par les ponts
redresseurs**

III.1 Introduction

La notion de perturbations basses fréquences comprend les influences électromagnétiques dans la gamme des fréquences comprises dans l'intervalle : $[0\text{Hz}-2\text{kHz}]$. Ces perturbations sont causées par des utilisateurs possédant des appareils ayant des caractéristiques non-linéaires connectés au réseau d'alimentation. De ces non-linéarités résultent des courants et des tensions d'une forme différente de la sinusoïde idéale, pouvant à leur tour influencer ou perturber d'autres charges connectées au même réseau (couplage direct). De plus, d'autres systèmes peuvent être influencés à distance par couplage inductif ou capacitif (couplage indirect).

Pour le bon fonctionnement des systèmes en électronique de puissance, il est devenu important d'étudier les contraintes CEM. En effet, les problèmes de CEM se sont de plus en plus intensifiés en électronique de puissance et cela à cause de l'augmentation des fréquences de commutation, de la diminution des tensions d'alimentation des systèmes de commande, de la pollution de l'environnement,...

La modélisation CEM permet de se rapprocher le plus possible du spectre des signaux perturbateurs apparaissant essentiellement durant les phases de commutation des semi-conducteurs. Aussi, dans ce chapitre, nous nous intéressons à la mise en évidence et à la caractérisation, en basses fréquences, des perturbations EM conduites engendrées par les ponts redresseurs non commandé et commandé en monophasé et en triphasé. Cette étude est suivie par une détermination des niveaux de perturbations émises par ces convertisseurs pour vérifier leur compatibilité.

Pour mettre en évidence les perturbations BF engendrées par les ponts redresseurs nous avons effectué des simulations dans le domaine temporel suivies d'analyses fréquentielles, obtenues par transformation spectrale de Fourier. A noter enfin que les simulations et le traitement des résultats sont effectués grâce aux logiciels PSPICE et MATLAB.

III.2 Hypothèses liées aux dispositifs étudiés

Dans notre travail, nous prenons en compte les hypothèses suivantes :

- Les convertisseurs sont uniquement sources de perturbations EM.
- Les interrupteurs étudiés sont proches des interrupteurs réels.
- La charge étudiée est supposée parfaite.
- Seul le régime permanent est étudié.

III.3 Simulation d'un pont redresseur monophasé

III.3.1 Pont redresseur monophasé non commandé

Afin d'étudier l'effet perturbateur des ponts redresseurs à diodes sur le réseau électrique nous avons simulé sous PSPICE le circuit représenté par la figure III.1. Les diodes de redressement utilisées sont de type BYT12P-600.

III.3.1.1 Paramètres de simulation

Les paramètres de simulation considérés sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Paramètres de simulation

U_{Res} (V)	f (Hz)	R_{Res} (Ω)	L_{Res} (μH)	R_{Ch} (Ω)	C_{Ch} (μF)
220	50	0.4	500	50	900

III.3.1.2 Schéma de configuration étudiée

Dans la figure III.1, nous présentons le schéma de la configuration d'étude comportant l'ensemble des éléments considérés.

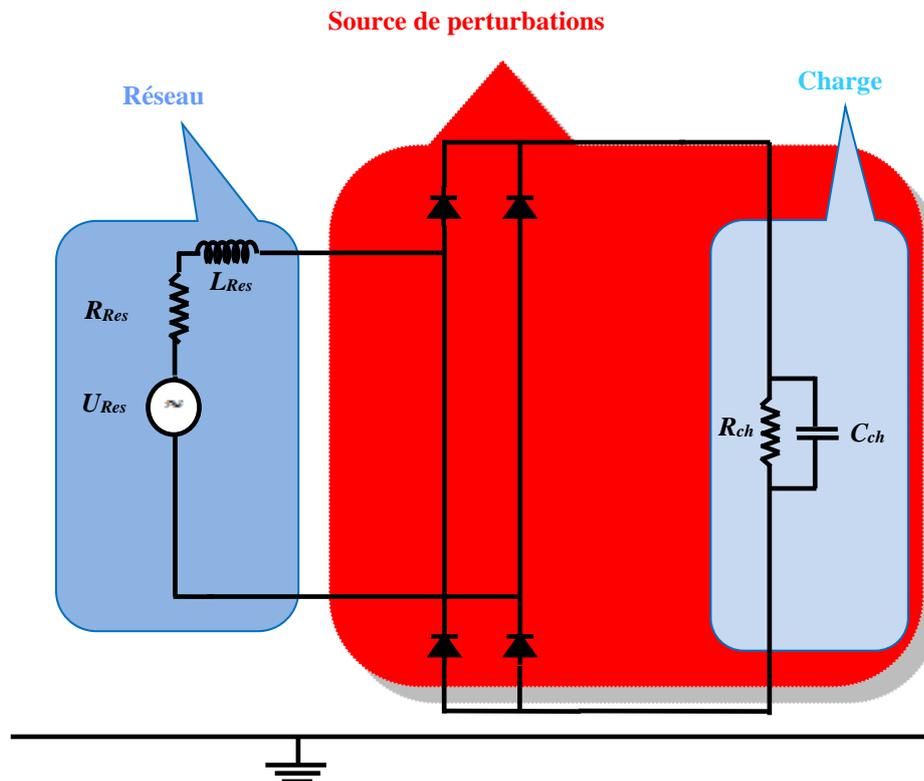


Figure III.1: Schéma de la configuration étudiée

Présentation et analyse des résultats obtenus

Les figures III.2 et III.4 représentent la tension à l'entrée du pont redresseur et le courant de ligne. Les analyses spectrales de Fourier de ces deux grandeurs sont reportés respectivement sur les figures III.3 et III.5.

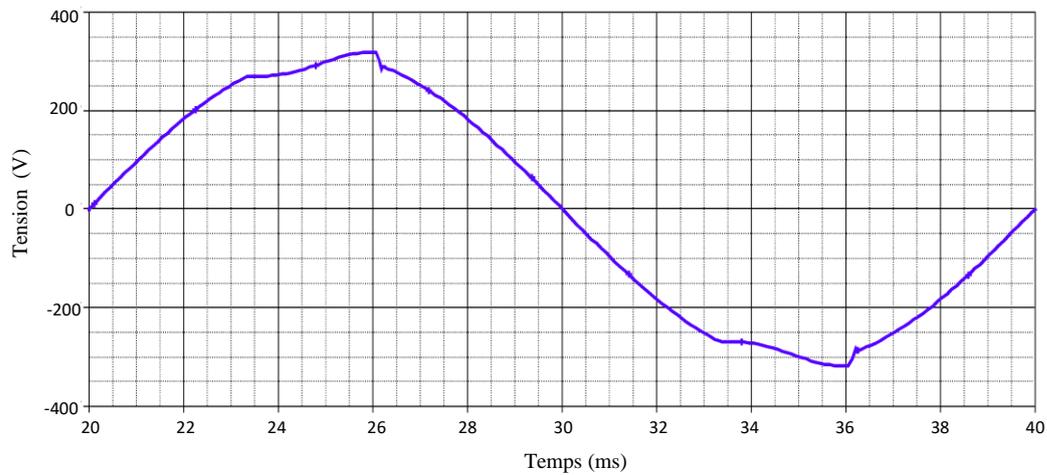


Figure III.2: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé

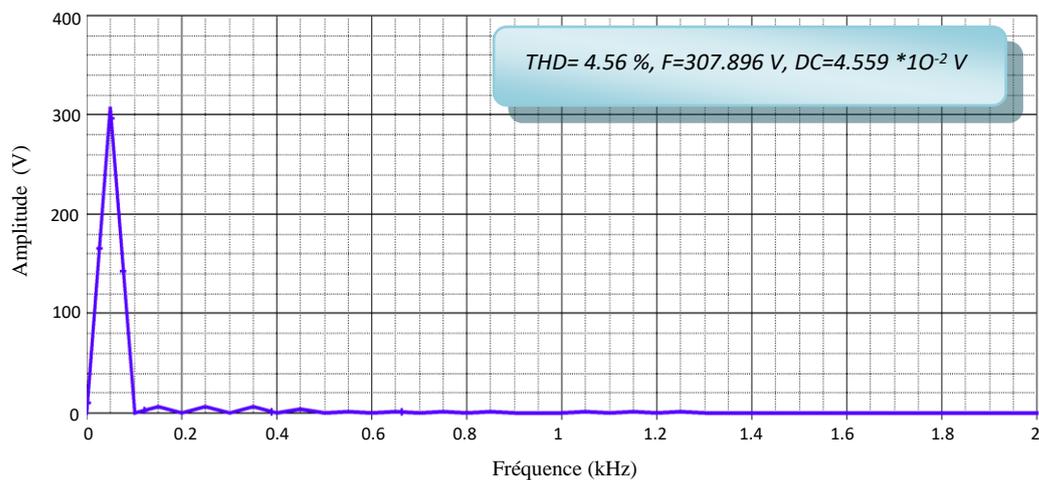


Figure III.3: Spectre fréquentiel de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé

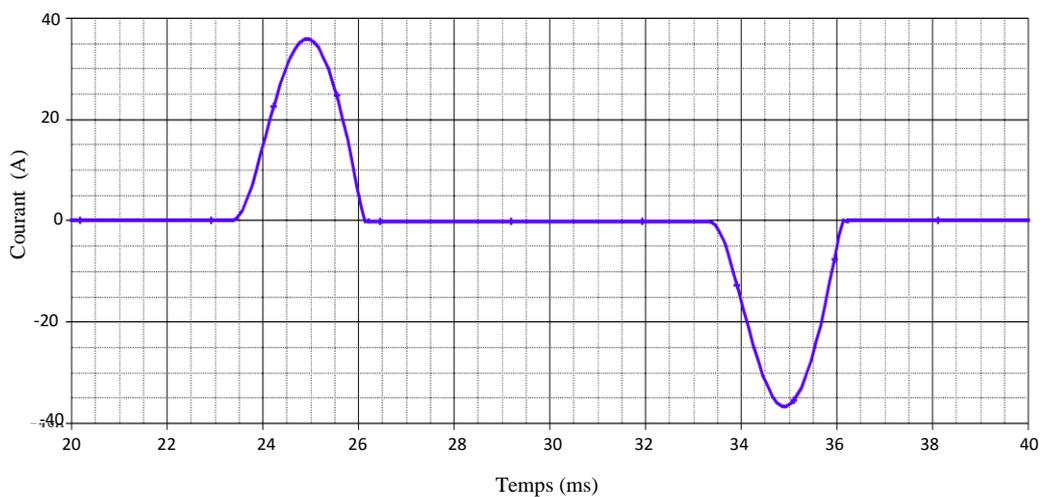


Figure III.4: Variations temporelles du courant de ligne du pont redresseur monophasé non commandé

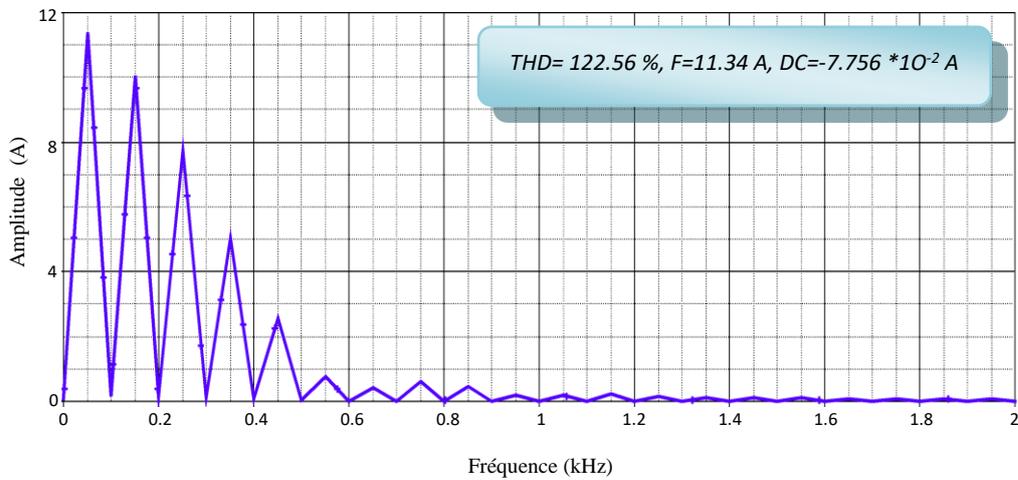


Figure III.5: Spectre fréquentiel du courant de ligne

L'analyse des formes d'ondes temporelles présentées aux figures III.2 et III.4 montre une nette déformation. Cette déformation est due à l'existence d'une charge non linéaire constituée par le pont redresseur et sa charge. Les analyses spectrales de ces formes d'ondes (Fig. III.3 et III.5) montrent la présence de plusieurs harmoniques impaires représentant les perturbations basses fréquences. Ces dernières se propagent à travers la liaison conductrice reliant le convertisseur au réseau d'alimentation.

Dans les tableaux III.2 et III.3, nous comparons les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont et du courant de ligne avec celles fournies par les normes **CEI classe A** respectivement **1000-2-2** et **1000-3-2**.

Le calcul du THD relatif au courant de ligne montre que ce dernier dépasse largement la limite autorisée par la norme **IEEE 519**. Cependant celui de la tension à l'entrée du pont est en dessous des limites imposées par cette norme. Nous constatons aussi que l'amplitude de la composante continue (notée « DC » dans les figures) est presque nulle tant pour le courant que pour la tension. Pour le fondamental (notée « F » dans la figure) de la tension d'entrée du pont redresseur nous observons que son amplitude est inférieure à l'amplitude de la tension délivrée par le réseau électrique. De plus, nous constatons que les harmoniques significatifs se situent entre le rang 3 et le rang 17. Enfin, nous remarquons, suite aux résultats présentés dans les tableaux III.2 et III.3, que :

- Les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur ne dépassent pas les limites autorisées par la norme **CEI 1000-2-2 classe A** sauf les harmoniques de rang 15 et 21. En effet, les amplitudes de ces derniers dépassent de quelque millivolts les limites autorisées par la norme CEM ce qui explique la valeur du THD trouvée qui est en dessous des limites de la norme **IEEE 519**.

- Les amplitudes des harmoniques du courant de ligne dépassent de loin les limites autorisées par la norme *CEI 1000-3-2 classe A* surtout les harmoniques des rangs inférieurs à 9. Ce dépassement s'est traduit par un THD de 122.5 % ; valeur considérablement supérieure à la limite autorisée par la norme qui est de 5%.

Tableau III.2: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé et les valeurs correspondantes fournies par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de la tension (V)	Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme <i>CEI 1000-2-2 classe A</i> (V)
3	150	6.239	15.395
5	250	6.883	18.474
7	350	5.948	15.395
9	450	3.775	4.618
11	550	1.353	10.776
13	650	0.895	9.237
15	750	1.528	0.924
17	850	1.231	6.148
19	950	0.597	4.618
21	1050	0.713	0.616
23	1150	0.878	4.618
25	1250	0.647	4.618
27	1350	0.431	0.616
29	1450	0.569	1.943
31	1550	0.579	1.857
33	1650	0.406	0.616
35	1750	0.370	1.715
37	1850	0.452	1.656
39	1950	0.400	0.616

Tableau III.3: Tableau comparatif entre les d'amplitudes des harmoniques du courant de ligne relatif au pont redresseur monophasé non commandé et les valeurs correspondantes fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (A)	Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisées par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
3	150	10.035	2.300
5	250	7.739	1.140
7	350	5.034	0.770
9	450	2.552	0.400
11	550	0.770	0.330
13	650	0.414	0.210
15	750	0.621	0.150
17	850	0.448	0.132
19	950	0.197	0.118
21	1050	0.205	0.107
23	1150	0.232	0.097
25	1250	0.160	0.090
27	1350	0.098	0.083
29	1450	0.116	0.077
31	1550	0.111	0.072
33	1650	0.075	0.068
35	1750	0.063	0.064
37	1850	0.070	0.060
39	1950	0.059	0.057

III.3.1.3 Influence de certains paramètres sur le comportement CEM du réseau

Dans ce paragraphe nous mettons en évidence l'influence des paramètres propres à la charge (R_{Ch} , C_{Ch}) ainsi que celle de l'inductance du réseau électrique (L_{Res}) sur le comportement CEM de ce dernier. Pour mieux voir cette influence l'étude est subdivisée en trois parties à savoir :

- Une première étude relative à la variation de la résistance de la charge R_{ch} (prenant successivement les valeurs : 25, 50, 75 et 100 Ω) tout en gardant C_{ch} constante (égale à 900 μF) et L_{res} constante (égale à 500 μH).
- Une deuxième étude dans laquelle on a fait varier C_{ch} (prenant successivement les valeurs : 300, 500, 700 et 900 μF) tout en gardant constantes R_{ch} (égale à 50 Ω) et L_{res} (500 μH).
- Enfin la troisième étude a porté sur la variation de l'inductance du réseau L_{res} (prenant successivement 500 μH , 2mH, 4mH) tout en gardant constantes R_{ch} (égale à 50 Ω) et C_{ch} (900 μF).

Dans le tableau suivant sont consignées toutes les valeurs des paramètres considérées dans cette étude.

Tableau III.4: Valeurs des paramètres de simulation utilisés

Charge	R_{Ch} (Ω)	25	50	75	100
	C_{Ch} (μF)	300	500	700	900
Réseau	L_{Res} (H)	500×10^{-6}	2×10^{-3}	4×10^{-3}	--

Présentation et analyse des résultats obtenus

Pour évaluer l'effet perturbateur du pont redresseur sur le réseau électrique en fonction des paramètres de la charge et de l'inductance du réseau nous avons, pour chaque étude citée ci-dessus, tracé :

- les formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur, présentées aux figures III.6, III.10 et III.14 avec les spectres fréquentiels correspondants présentés aux figures III.7, III.11 et III.15.
- Les formes d'ondes du courant de ligne, présentées aux figures III.8, III.12 et III.16 et les spectres fréquentiels correspondants présentés aux figures III.9, III.13 et III.17.

Les résultats de simulation obtenus, donnant les différentes valeurs du taux de distorsion harmonique, la composante continue et le fondamental pour différentes valeurs de la charge et de l'inductance du réseau électrique sont consignés dans le tableau III.5.

A la lumière de ces résultats on peut aisément voir l'influence de la variation des paramètres de la charge et de l'inductance de réseau sur les formes d'ondes temporelles et fréquentielles de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne.

Cette influence se caractérise par les constatations suivantes :

- **L'augmentation de la résistance de la charge entraîne :**
 - Une amélioration de la forme d'onde de la tension qui se rapproche de la forme sinusoïdale. Cette amélioration est traduite par une diminution du temps de conduction des diodes, des amplitudes des harmoniques du spectre de la tension et par conséquent du THD. En revanche, nous constatons que le THD dépasse la limite autorisée par la norme **IEEE 519** pour la valeur de la résistance de la charge $R_{ch} = 25 \Omega$. Enfin nous remarquons, avec cette augmentation de la résistance de la charge, que le fondamental est presque constant et que la composante continue est pratiquement nulle.
 - Une diminution du temps de conduction des diodes et du maximum de l'onde de courant de ligne. L'analyse spectrale de ce dernier montre que le fondamental diminue et le THD augmente avec l'augmentation de la résistance de la charge. En effet, le THD dépasse la limite autorisée par la norme **CEI 1000-3-2 classe A**.

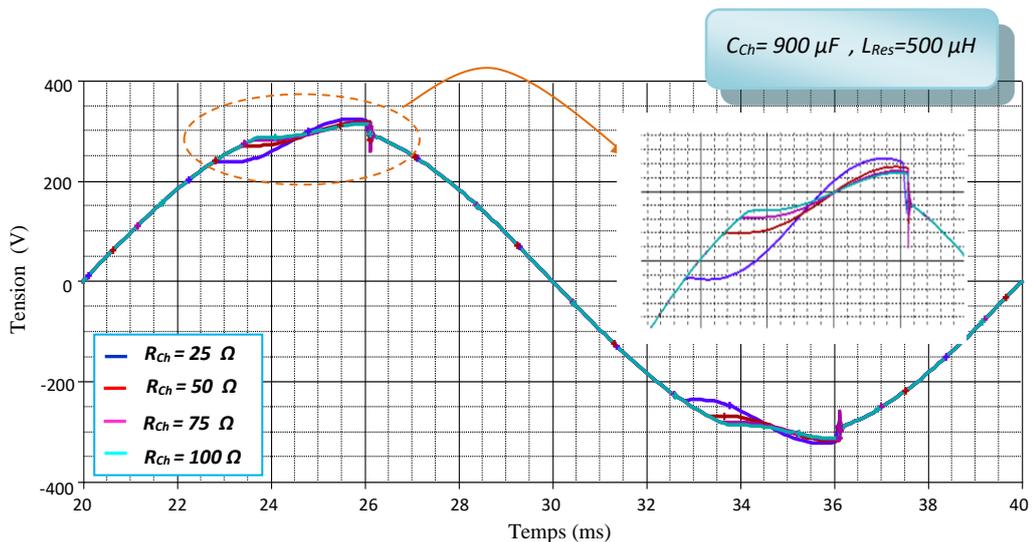


Figure III.6: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur, monophasé non commandé, pour différentes valeurs de R_{ch}

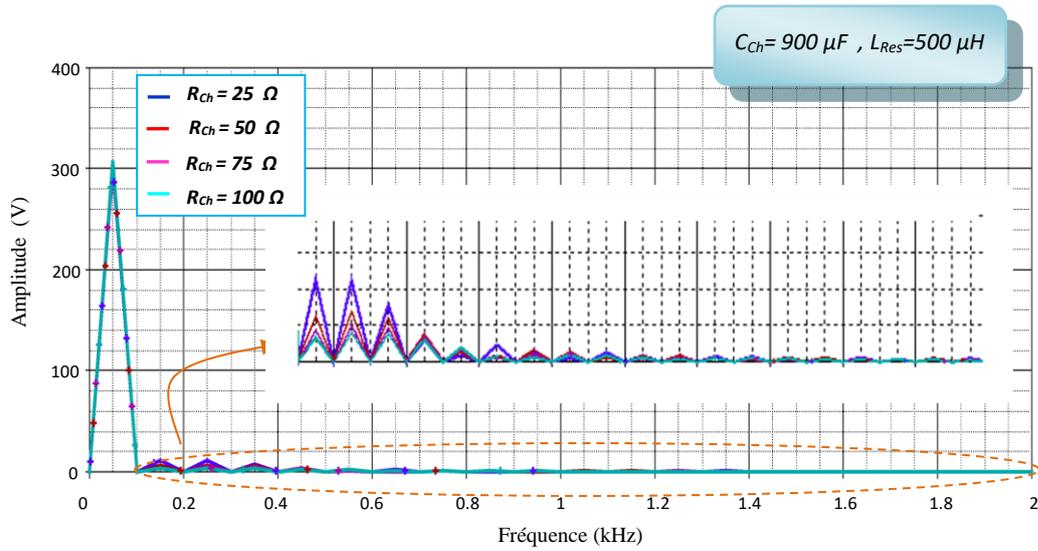


Figure III.7: Spectres fréquentiels de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé

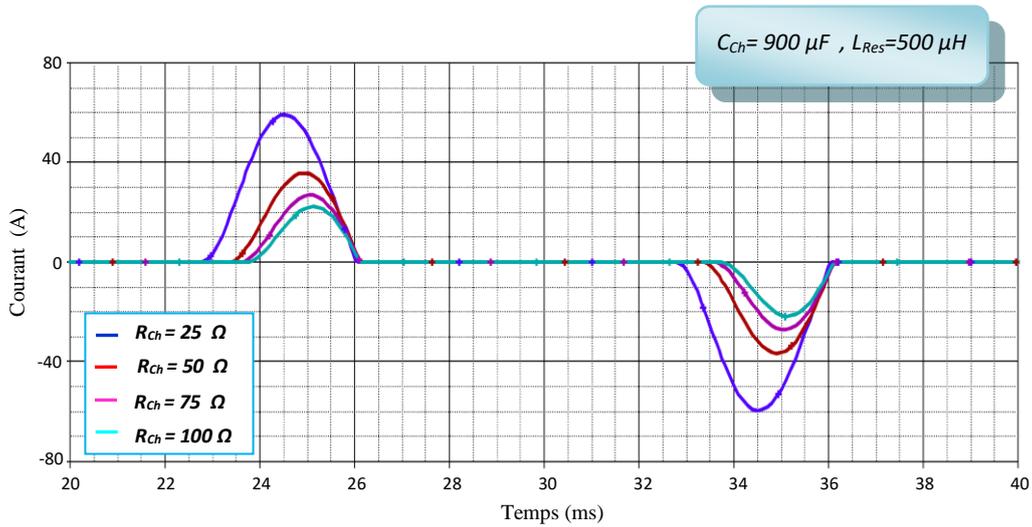


Figure III.8: Variations temporelles du courant de ligne pour différentes valeurs de R_{ch}

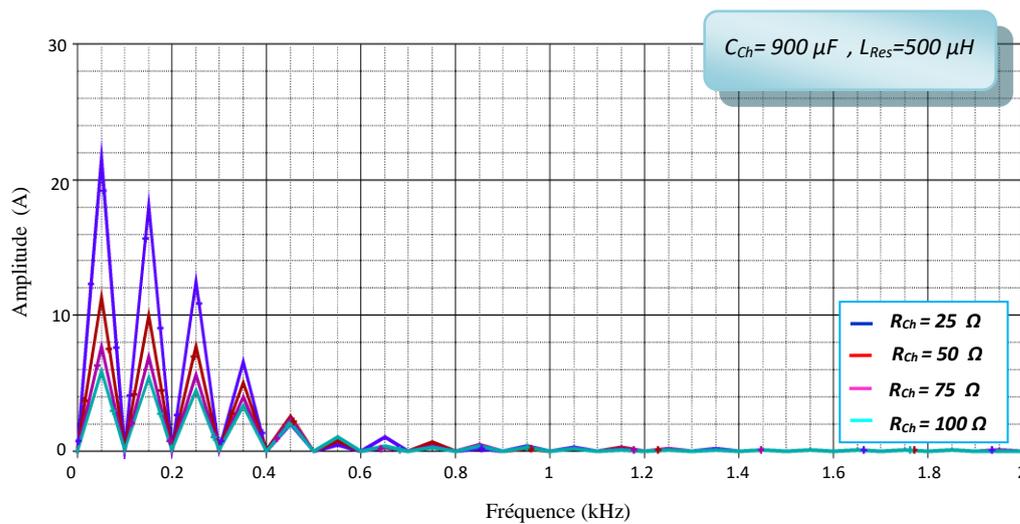


Figure III.9: Spectres fréquentiels du courant de ligne

- L'augmentation de capacité de la charge engendre :

- ✚ Une diminution de la distorsion de l'onde de tension à l'entrée du pont redresseur se traduisant par une légère baisse du THD avec une légère augmentation du fondamental correspondant aux configurations comprenant des capacités de charge prenant successivement comme valeurs : $500 \mu F$, $700 \mu F$ et $900 \mu F$. Quant à la configuration avec une capacité de charge égale à $300 \mu F$, l'onde de tension obtenue est légèrement moins déformée que celles obtenues dans le cas des autres valeurs de capacité de charge ($500 \mu F$, $700 \mu F$ et $900 \mu F$) avec une légère diminution du THD et une faible augmentation de l'amplitude du fondamental.

- ✚ Une translation de l'onde de courant dans le temps avec une diminution de son amplitude maximale. Les variations du THD et de l'amplitude du fondamental en fonction des valeurs de capacités de charge sont identiques à celles obtenues pour la tension à l'entrée du pont redresseur. De plus, on remarque que le THD dans ce cas dépasse largement la limite autorisée par la norme **IEEE 519**.

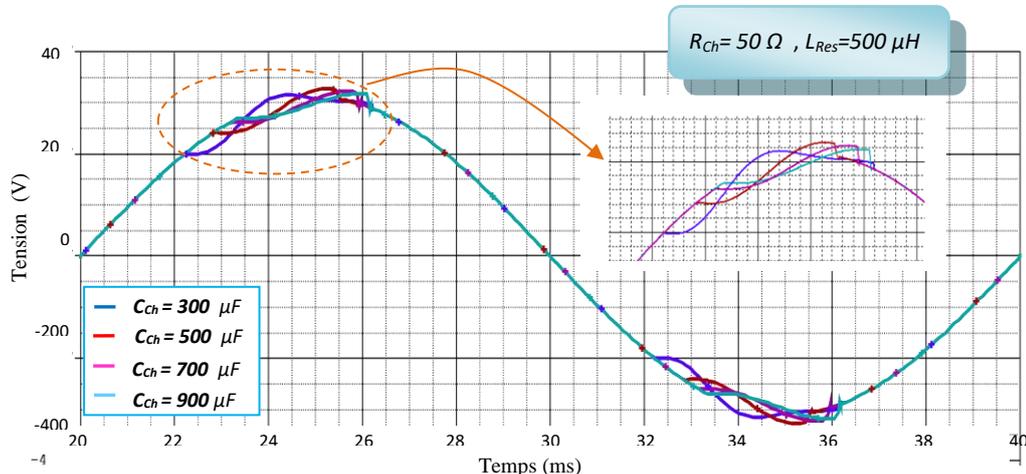


Figure III.10: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur, monophasé non commandé, pour différentes valeurs de C_{ch}

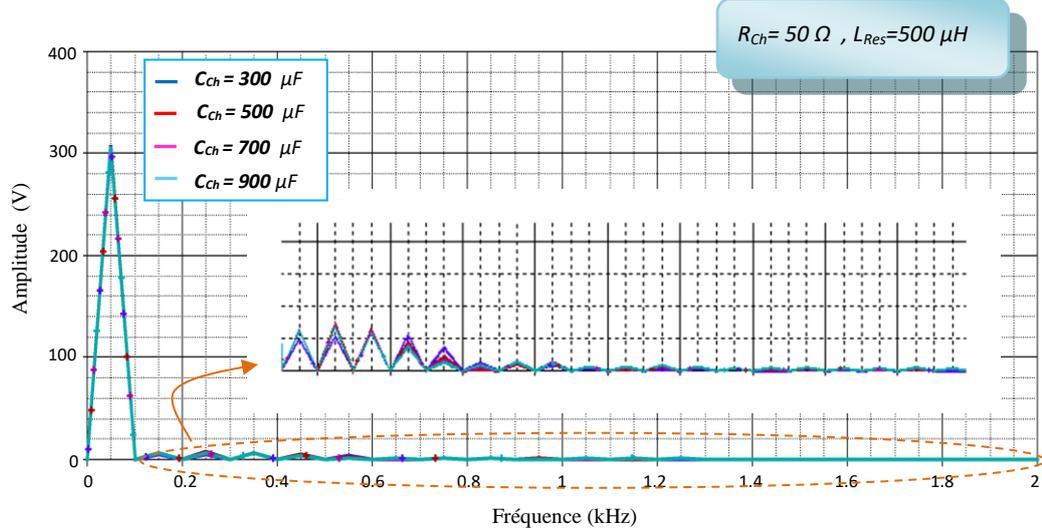


Figure III.11: Spectres fréquentiels de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé

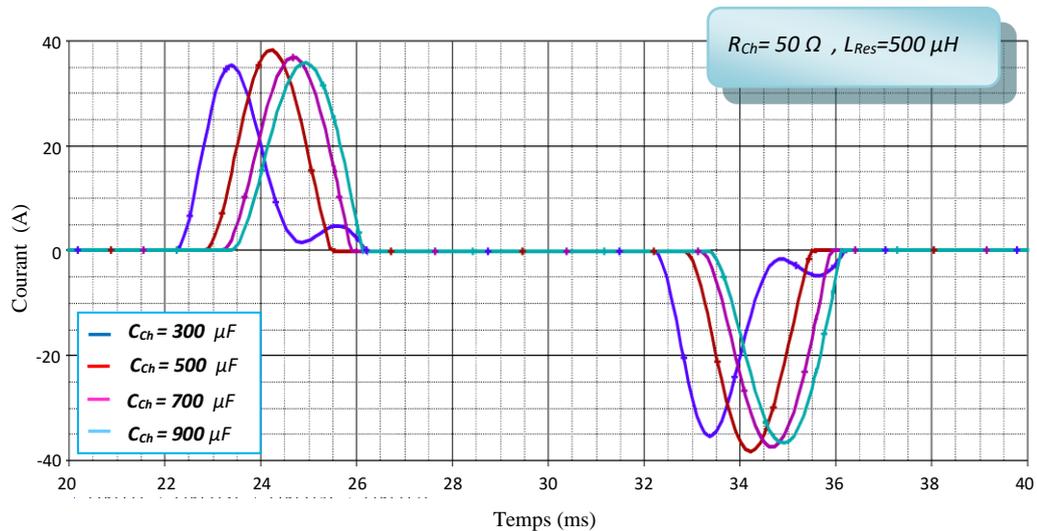


Figure III.12: Variations temporelles du courant de ligne, dans le cas du pont redresseur monophasé non commandé, pour différentes valeurs de C_{ch}

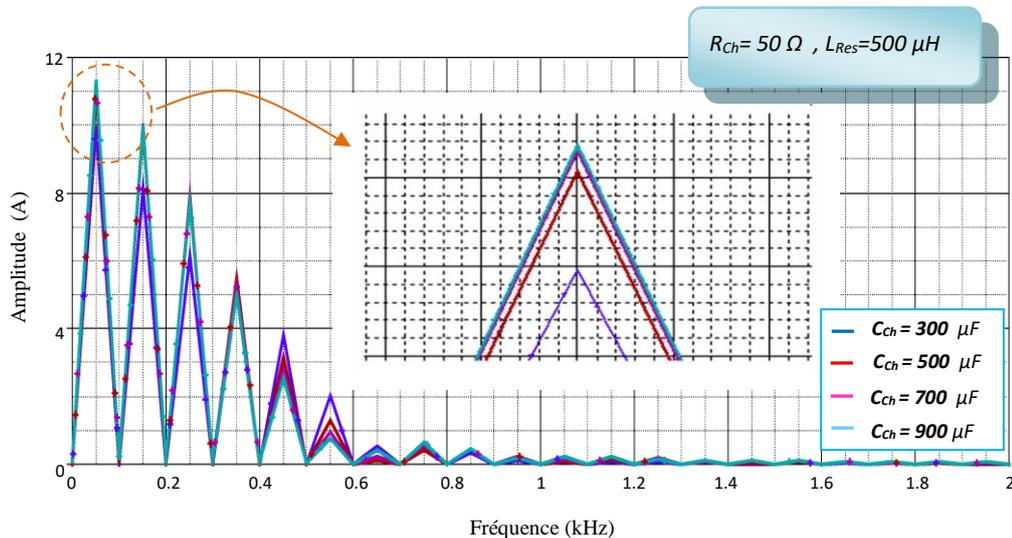


Figure III.13: Spectres fréquentiels correspondant au courant de ligne

- **L'augmentation de l'inductance du réseau engendre :**

Un effet perturbateur sur la tension à l'entrée du pont redresseur et sur le courant de ligne. Cet effet perturbateur est traduit par :

- Une distorsion importante de la forme d'onde de la tension avec une augmentation du temps de conduction des diodes et réduction du maximum du courant.
- Une augmentation des amplitudes des harmoniques du spectre fréquentiel relatif à la tension avec une augmentation perceptible du THD dont la valeur dépasse la limite permise par la norme **IEEE 519**.
- Une diminution considérable des amplitudes des harmoniques constituant le spectre de la forme d'onde du courant avec l'augmentation de l'inductance du réseau. Ceci explique la diminution du THD qui est insuffisante par rapport à la valeur admise par la norme **IEEE 519**.

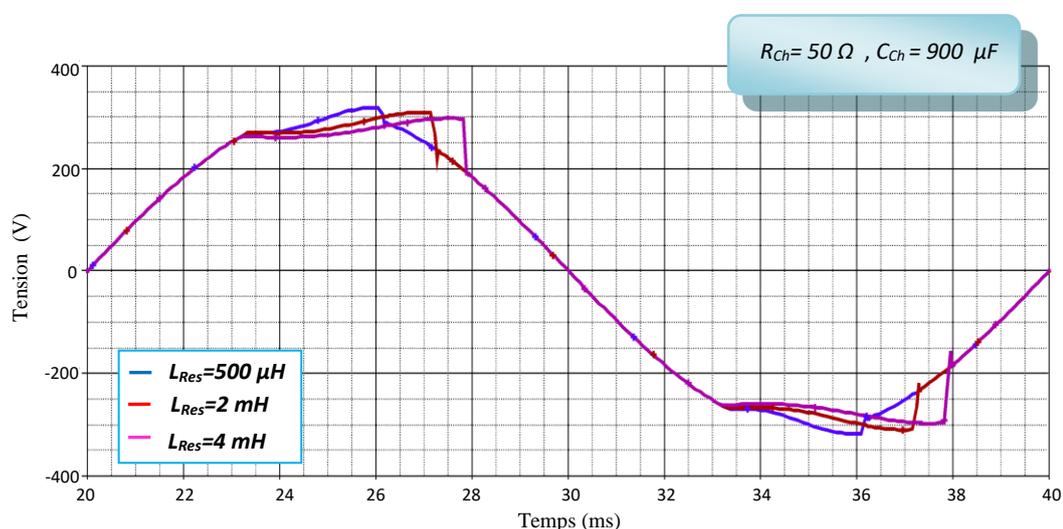


Figure III.14: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur, monophasé non commandé, pour différentes valeurs de l'inductance de réseau électrique (L_{Res})

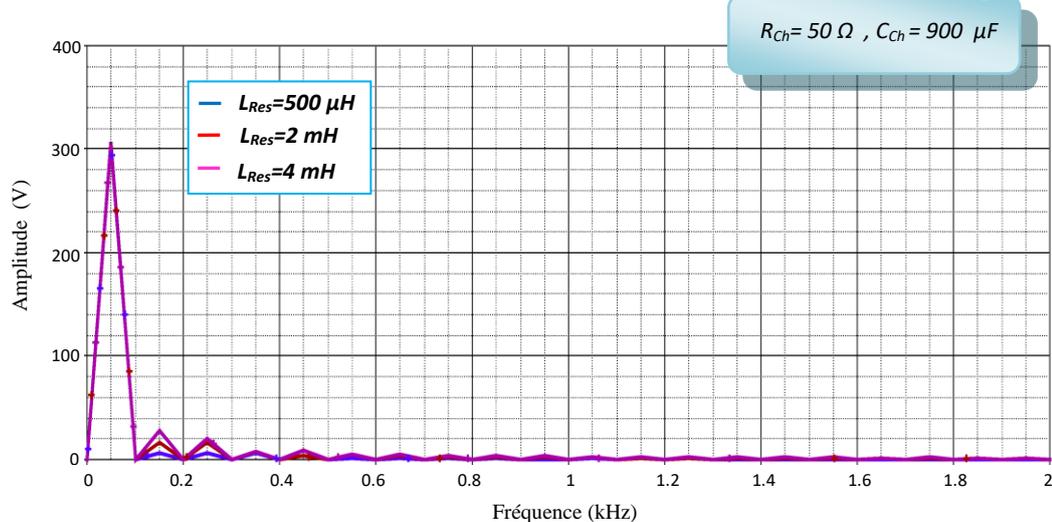


Figure III.15: Spectres fréquentiels correspondant à la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé

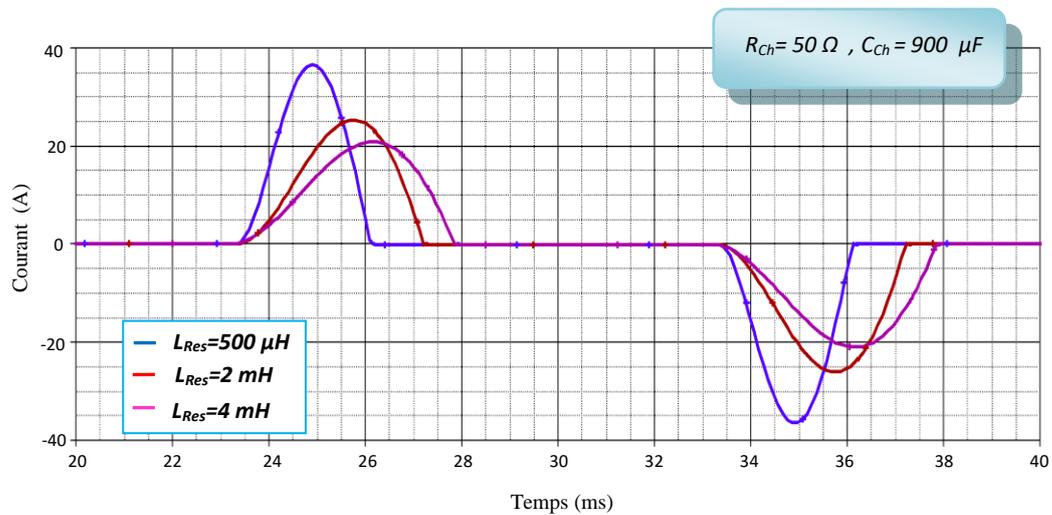


Figure III.16: Variations temporelles du courant de ligne pour différentes valeurs de l'inductance de réseau électrique (L_{Res})

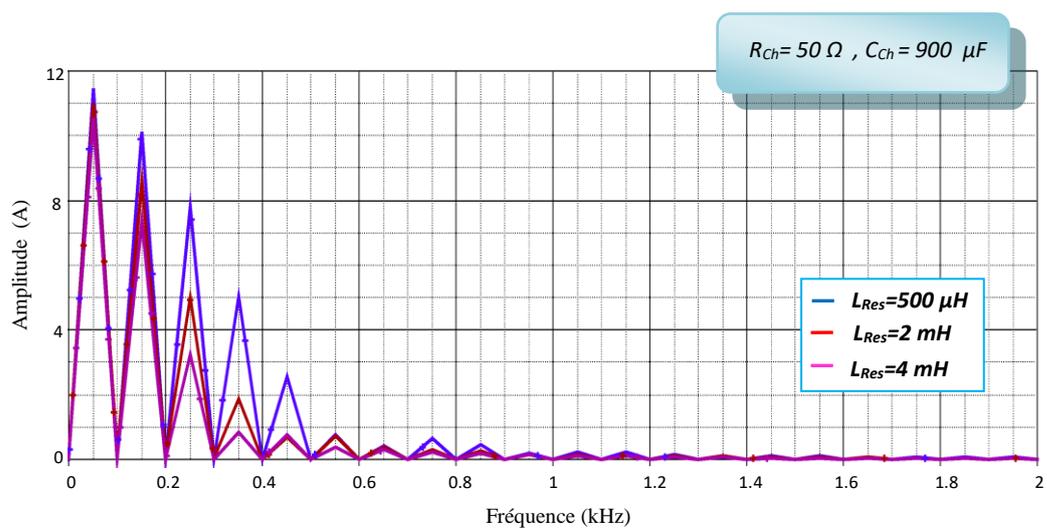


Figure III.17: Spectres fréquentiels correspondant au courant de ligne

Tableau III.5: Taux de distorsion harmonique (THD), composante continue (DC) et amplitude du fondamental (F), pour différentes valeurs de la charge et de l'inductance du réseau

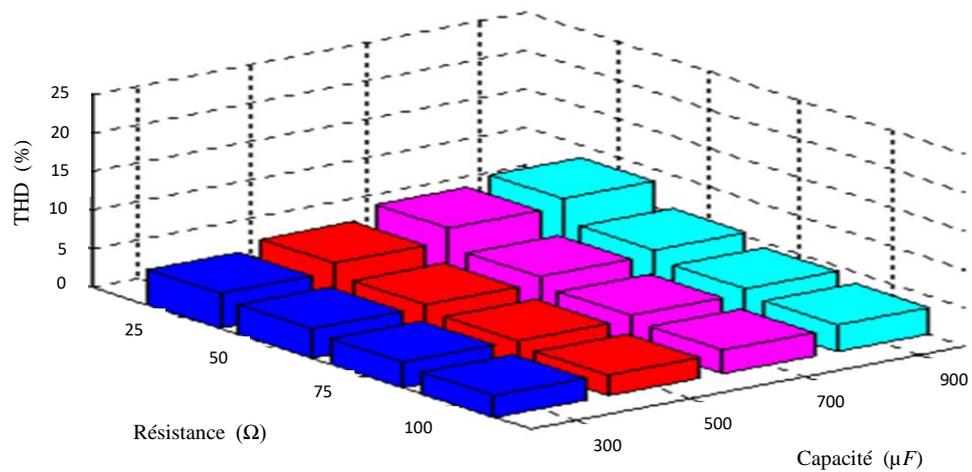
			Taux de distorsion harmonique (THD)	Amplitude de la composante continue (DC)	Amplitude du fondamental (F)
Tension à l'entrée du pont	Résistance de la charge (Ω)	25	6.03 %	$2.836 \cdot 10^{-2} V$	303.1 V
		50	3.98 %	$5.342 \cdot 10^{-2} V$	306.8 V
		75	3.09 %	$-1.661 \cdot 10^{-3} V$	308.1 V
		100	2.59 %	$9.341 \cdot 10^{-3} V$	308.8 V
	Capacité de la charge (μF)	300	3.84 %	$4.225 \cdot 10^{-3} V$	308.1 V
		500	4.14 %	$7.254 \cdot 10^{-3} V$	306.8 V
		700	4.07 %	$2.639 \cdot 10^{-2} V$	307.0 V
		900	3.98 %	$4.190 \cdot 10^{-2} V$	307.3 V
	Inductance du réseau (H)	$500 \cdot 10^{-6}$	3.96 %	$3.312 \cdot 10^{-2} V$	306.6 V
		$2 \cdot 10^{-3}$	8.81 %	$3.413 \cdot 10^{-2} V$	305.9 V
		$4 \cdot 10^{-3}$	12.78 %	$2.769 \cdot 10^{-2} V$	303.5 V
	Courant de ligne	Résistance de la charge (Ω)	25	107.46 %	$-2.756 \cdot 10^{-2} A$
50			122.56 %	$-7.756 \cdot 10^{-2} A$	11.34 A
75			131.22 %	$-2.145 \cdot 10^{-2} A$	7.749 A
100			137.72 %	$4.153 \cdot 10^{-2} A$	5.927 A
Capacité de la charge (μF)		300	122.23 %	$-3.044 \cdot 10^{-3} A$	9.953 A
		500	128.95 %	$5.683 \cdot 10^{-3} A$	11.060 A
		700	125.09 %	$-5.028 \cdot 10^{-2} A$	11.280 A
		900	122.58 %	$-4.772 \cdot 10^{-2} A$	11.340 A
Inductance du réseau (H)		$500 \cdot 10^{-6}$	122.30 %	$-2.545 \cdot 10^{-5} A$	11.430 A
		$2 \cdot 10^{-3}$	92.59 %	$-1.187 \cdot 10^{-1} A$	10.990 A
		$4 \cdot 10^{-3}$	77.44 %	$-3.035 \cdot 10^{-2} A$	10.054 A

L'analyse des résultats présentés dans le tableau ci-dessus montre que le THD ainsi que l'amplitude du fondamental (F) dépendent principalement des éléments constituant la charge (R_{ch} , C_{ch}) et de l'inductance du réseau électrique (L_{res}). Une étude de sensibilité de ces paramètres est alors nécessaire pour déterminer le poids de chaque paramètre sur l'intensité des perturbations basses fréquences générées par le pont redresseur monophasé non commandé.

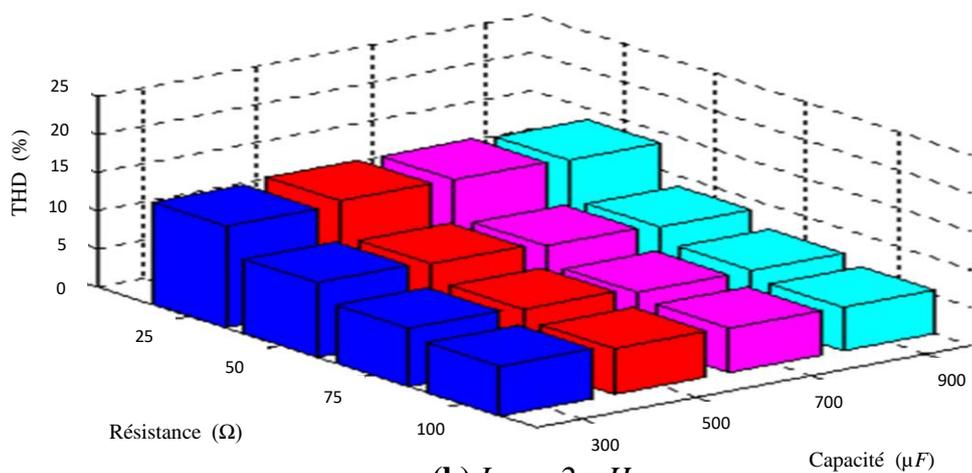
Cette étude de sensibilité a été effectuée sous environnement PSPICE. Par contre, les graphes obtenus (figures III. 18, III.19, III.20 et III.21) représentant l'évolution du THD et de l'amplitude du fondamental en fonction des données de la charge et du réseau électrique ont été tracés sous MATLAB.

L'analyse des figures III.18 et III.19, relatives à l'évolution du THD et du fondamental de la tension à l'entrée du pont en fonction des paramètres de la charge et pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique, montre que pour une valeur donnée de l'inductance du réseau électrique, l'augmentation de la résistance de la charge entraîne une diminution du THD et une augmentation minime du fondamental. Aussi, nous observons que l'augmentation de la capacité de la charge conduit à une élévation du THD et que l'accroissement de l'inductance du réseau conduit à une augmentation considérable du THD dépassant la limite autorisée par la norme **IEEE 519** et une diminution de l'amplitude du fondamental.

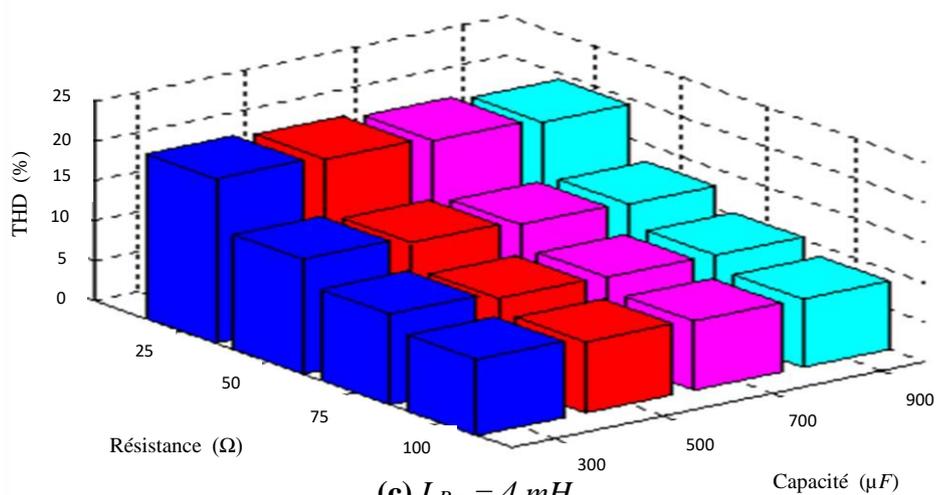
Par ailleurs, l'analyse des courbes présentées aux figures III.20 et III.21, représentant l'évolution du THD et de l'amplitude du fondamental du courant de ligne en fonction des paramètres de la charge et pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique, montre que pour une valeur donnée de l'inductance du réseau, l'augmentation de la résistance de la charge engendre une élévation du THD et une diminution de l'amplitude du fondamental dépassant ainsi la limite spécifiée par la norme **IEEE 519**. En revanche, l'augmentation de la capacité de la charge a conduit à une réduction légère (quelques pourcents) du THD et une invariance de l'amplitude du fondamental. Finalement, nous avons remarqué une diminution du THD et une augmentation de l'amplitude du fondamental au fur et à mesure que l'inductance du réseau électrique augmente. L'augmentation de cette dernière est donc bénéfique du point de vue CEM car l'effet perturbateur est réduit. Cependant, ce dernier reste encore supérieur à la limite prescrite par la norme **IEEE 519**.



(a) $L_{Res} = 500 \mu H$



(b) $L_{Res} = 2 mH$



(c) $L_{Res} = 4 mH$

Figure III.18: Evolution du THD de la tension à l'entrée du pont redresseur, monophasé non commandé, en fonction des paramètres de la charge et pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})

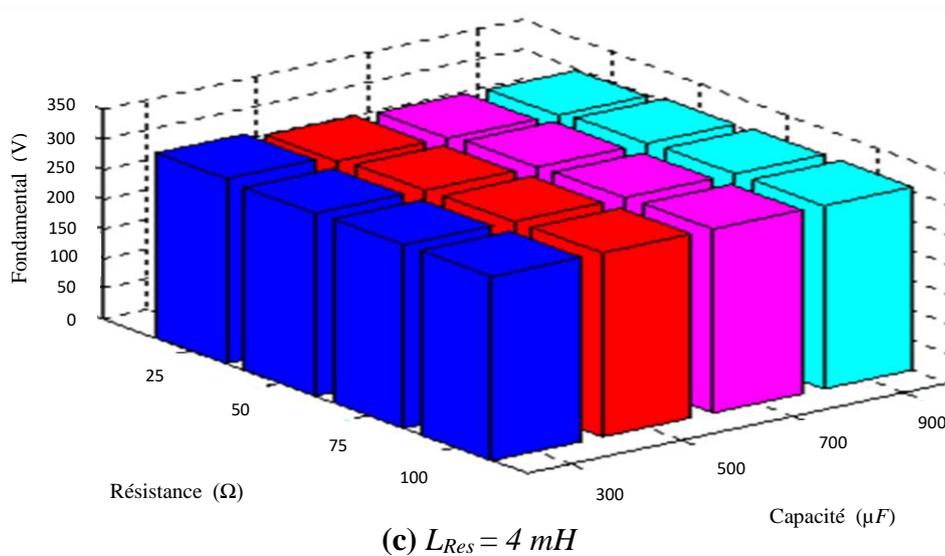
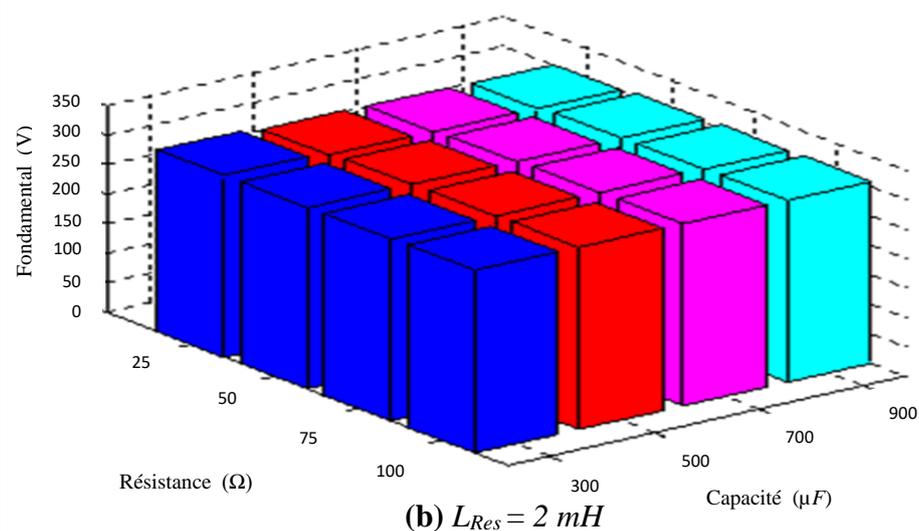
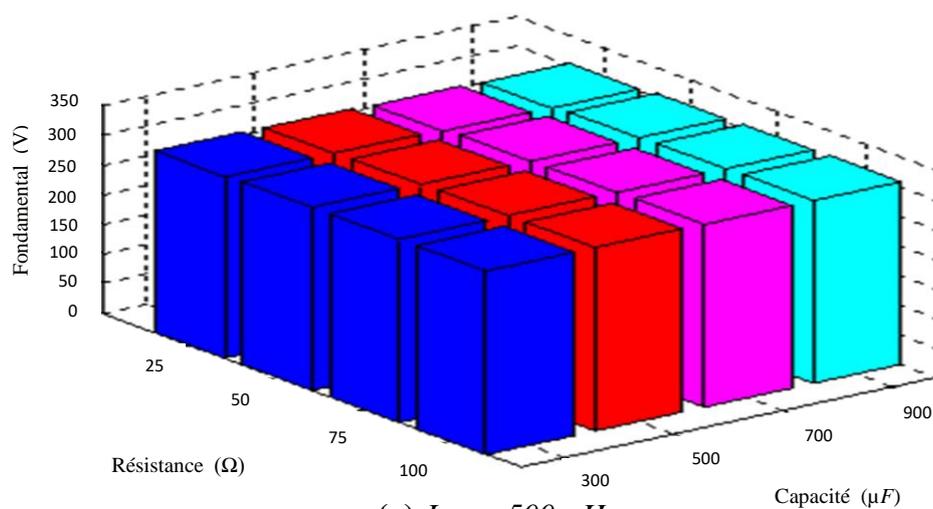
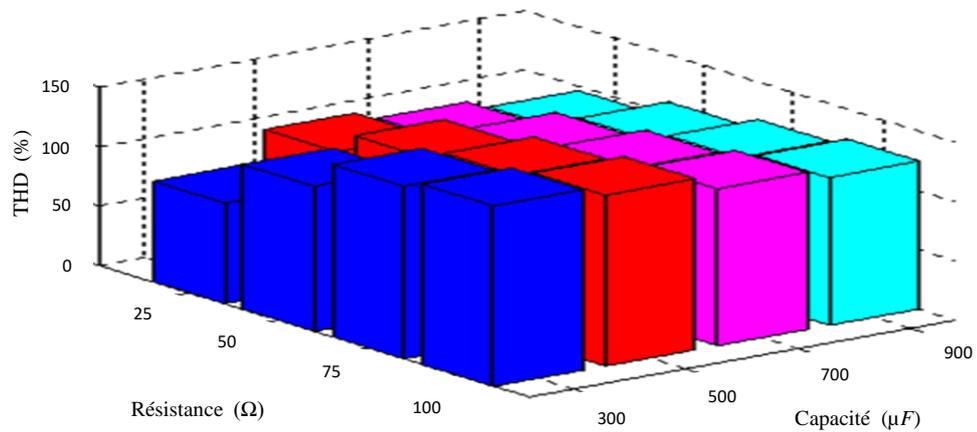
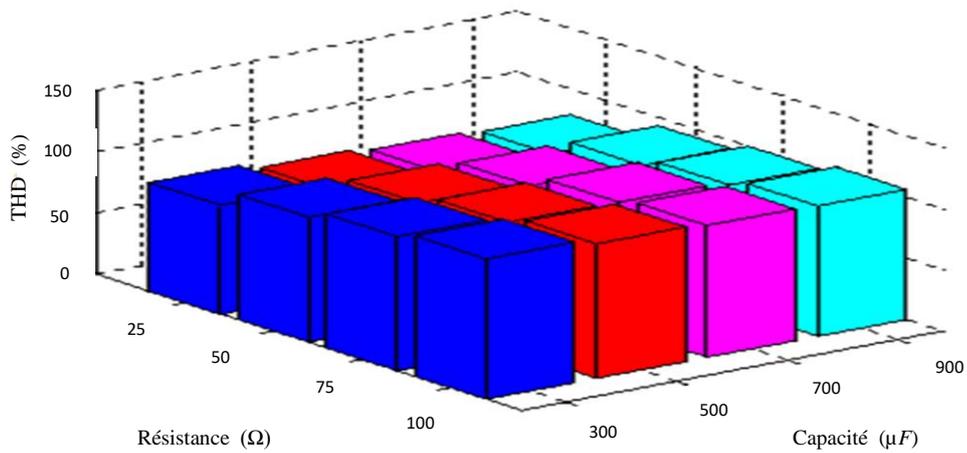


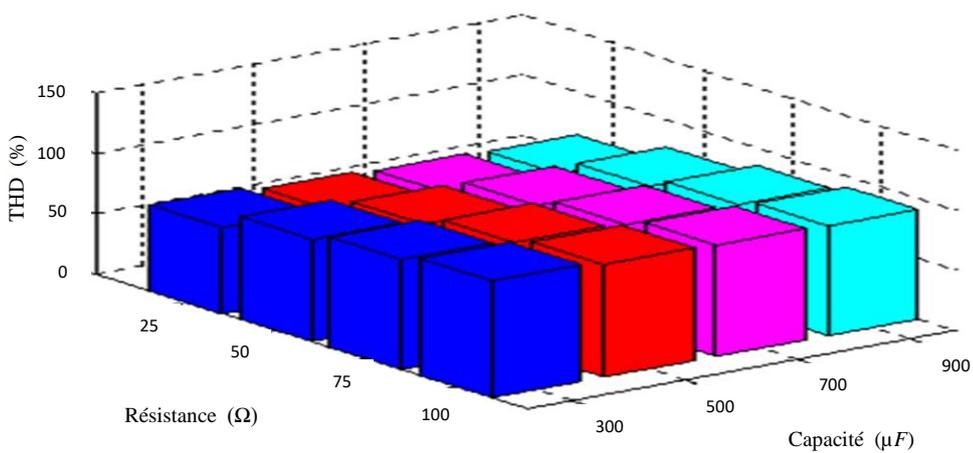
Figure III.19: Evolution de l'amplitude du fondamental de la tension à l'entrée du pont redresseur, monophasé non commandé, en fonction des paramètres de la charge et pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})



a) $L_{Res} = 500 \mu H$



(b) $L_{Res} = 2 mH$



(c) $L_{Res} = 4 mH$

Figure III.20: Evolution du THD du courant de ligne du pont redresseur, monophasé non commandé, en fonction des paramètres de la charge et pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})

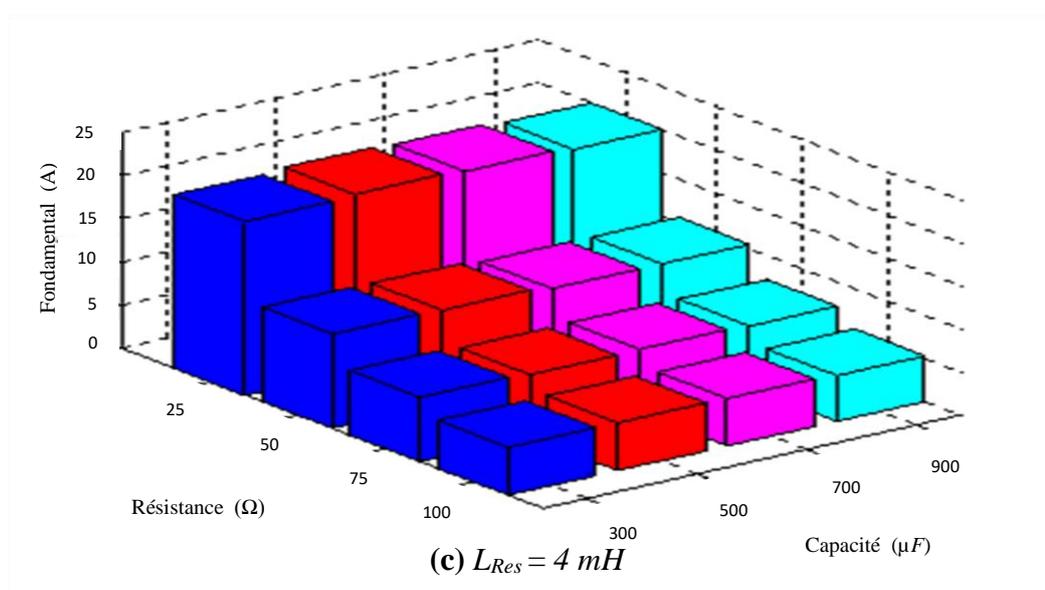
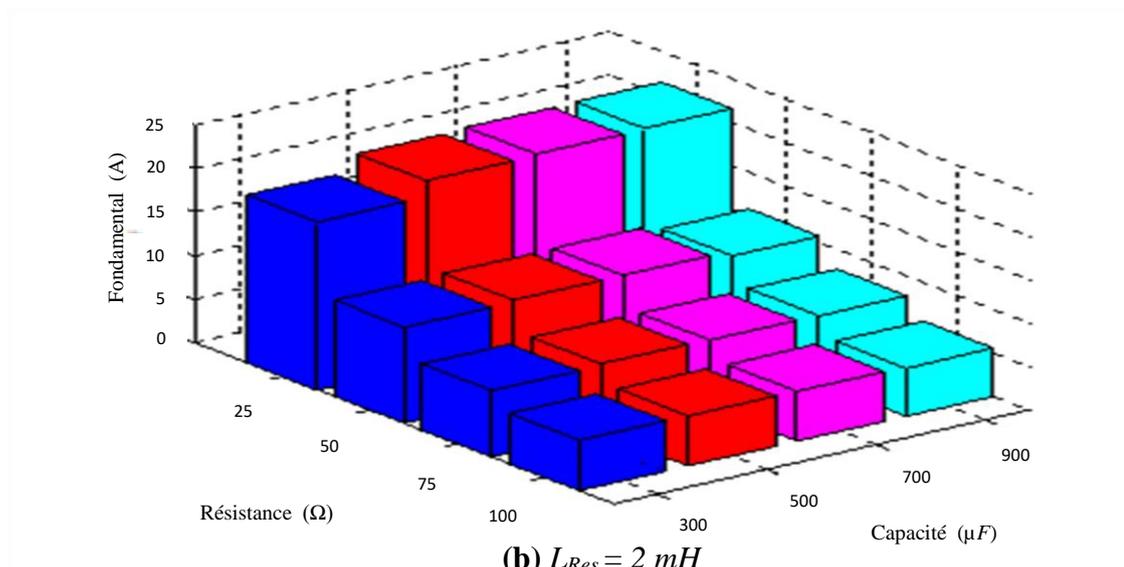
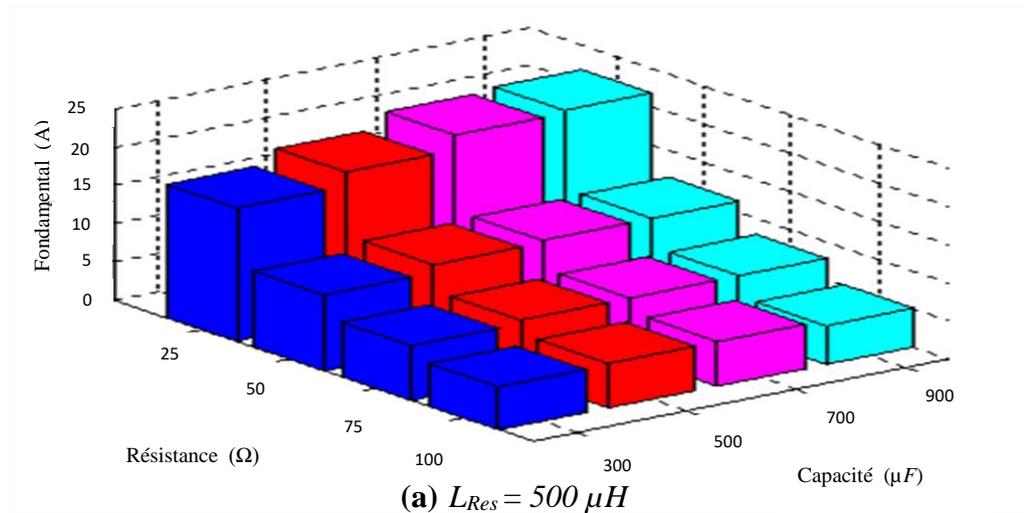


Figure III.21: Evolution de l'amplitude du fondamental du courant de ligne du pont redresseur, monophasé non commandé, en fonction des paramètres de la charge et pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique

III.3.2 Pont redresseur monophasé commandé

Dans ce paragraphe, nous allons étudier l'influence des perturbations EM, basses fréquences engendrées par un pont redresseur, à base de thyristors, sur le réseau électrique. Nous avons simulé sous PSPICE le circuit étudié précédemment, représenté par la figure III.6, dans lequel nous avons remplacé les diodes par des thyristors de type MCR3935-10 et diminué la valeur de la capacité de la charge du condensateur C_{ch} à 900 nF afin de réduire la constante de temps de charge. L'angle d'amorçage des thyristors considérés a été fixé à 30° et le signal de commande des thyristors est de forme trapézoïdale.

Présentation et analyse des résultats obtenus

Les figures III.22 et III.24 montrent les formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne. Nous avons également représenté sur les figures III.23 et III.25 leurs spectres fréquentiels respectifs.

Les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont et du courant de ligne sont consignées dans les tableaux III.6 et III.7. Dans ces mêmes tableaux nous avons reporté, pour des besoins de comparaisons, les amplitudes correspondantes fournies par les normes *CEI classe A 1000-2-2 et 1000-3-2*.

L'analyse de ces figures et tableaux nous permet de dégager les observations suivantes :

- Les formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne sont déformées et s'éloignent de la forme sinusoïdale. De plus, le THD, pour le courant de ligne, dépasse la limite autorisée par la norme *IEEE 519*. Quant au THD de la tension à l'entrée du pont redresseur il est inférieur à la limite autorisée par la norme *IEEE 519*.
- Les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur sont en dessous des valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*. en revanche, à partir de la dix-neuvième les amplitudes des harmoniques du courant de ligne dépassent les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*.

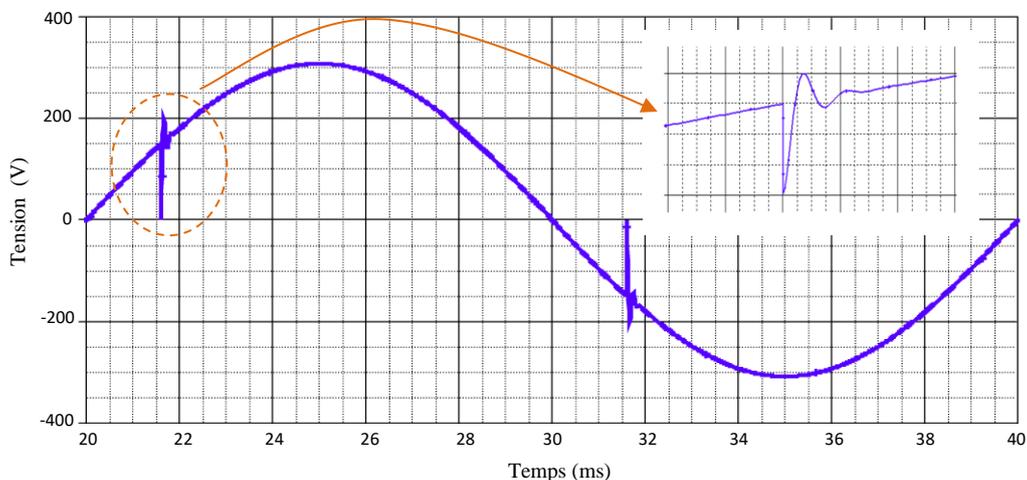


Figure III.22: Forme d'onde de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé

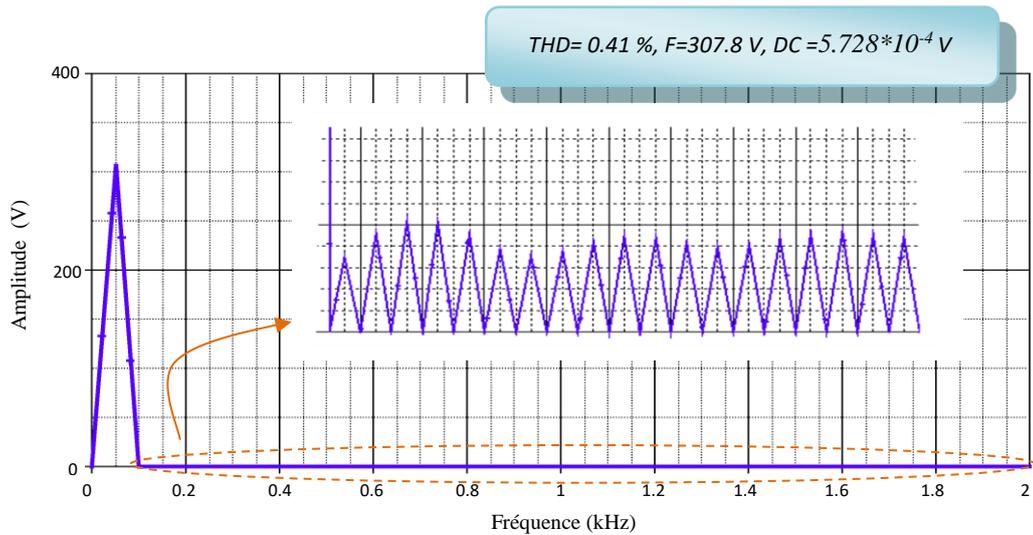


Figure III.23: Spectre fréquentiel de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé

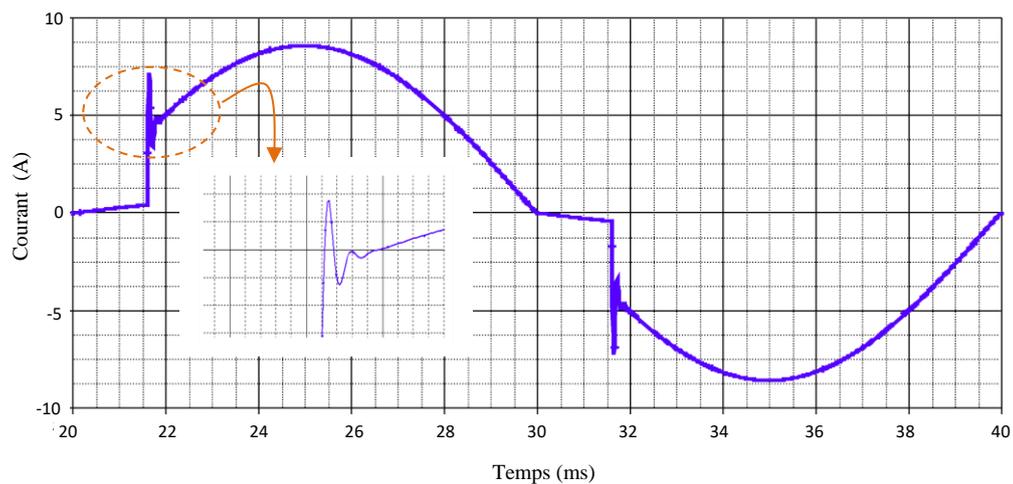


Figure III.24: Forme d'onde du courant de ligne

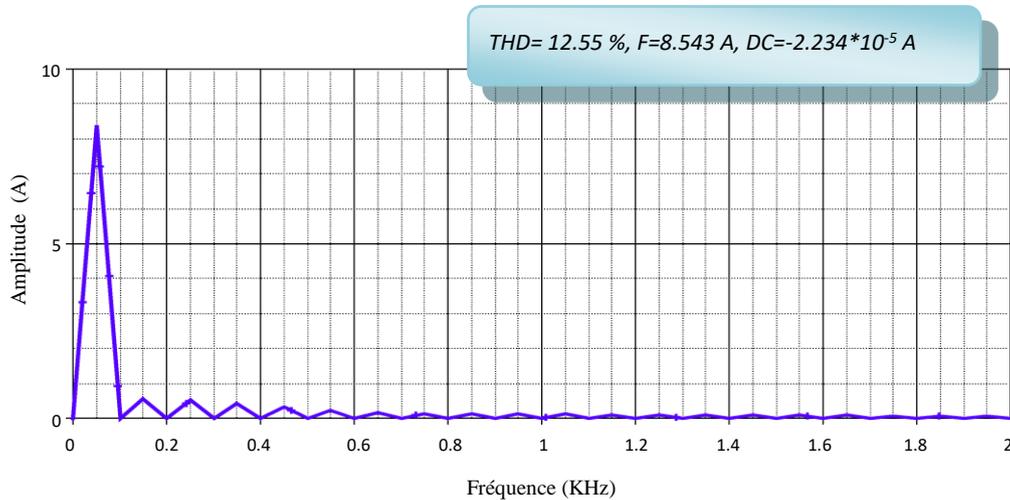


Figure III.25: Spectre fréquentiel du courant de ligne

Tableau III.6: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé et celles fournies par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de la tension (mV)	Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme <i>CEI 1000-2-2 classe A</i> (V)
3	150	350.162	15.390
5	250	459.212	18.468
7	350	516.363	15.390
9	450	510.925	4.617
11	550	456.556	10.773
13	650	388.942	9.234
15	750	356.631	0.923
17	850	379.167	6.156
19	950	422.445	4.617
21	1050	447.616	0.615
23	1150	441.665	4.617
25	1250	416.259	4.617
27	1350	398.649	0.615
29	1450	407.184	1.942
31	1550	435.958	1.857
33	1650	460.639	0.615
35	1750	465.899	1.715
37	1850	454.305	1.655
39	1950	442.578	0.615

Tableau III.7: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques du courant de ligne du pont redresseur monophasé commandé et celles fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (mA)	Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisées par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
3	150	575.471	2.300
5	250	510.871	1.140
7	350	425.679	0.770
9	450	331.664	0.400
11	550	242.721	0.330
13	650	174.091	0.210
15	750	138.325	0.150
17	850	131.097	0.132
19	950	131.769	0.118
21	1050	126.582	0.107
23	1150	113.731	0.097
25	1250	98.109	0.090
27	1350	86.612	0.083
29	1450	82.712	0.077
31	1550	83.236	0.072
33	1650	82.776	0.068
35	1750	78.809	0.064
37	1850	72.425	0.060
39	1950	66.745	0.057

III.3.1.1 Etude de l'influence de l'angle d'amorçage des thyristors sur les perturbations renvoyées au réseau électrique

Afin d'examiner l'influence de l'angle d'amorçage des thyristors sur les grandeurs (tension et courant) caractérisant le comportement du réseau électrique, nous avons fait varier cet angle en lui donnant les valeurs suivantes : $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 60^\circ$.

Ainsi, pour chaque valeur de l'angle d'amorçage des thyristors nous avons tracé les variations temporelles et fréquentielles (analyse spectrale de Fourier) du courant de ligne et de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé.

Présentation et analyse des résultats obtenus

Sur les figures III.26, III.27, III.28 et III.29 nous présentons les allures du courant de ligne et de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé suivies des analyses spectrales correspondantes. Dans les tableaux III.8 et III.9 sont consignées les amplitudes des harmoniques de courant de ligne et de la tension à l'entrée du pont redresseur ainsi que les valeurs correspondantes spécifiées par les normes **CEI 1000-3-2 classe A** et **CEI 1000-2-2 classe A**. Dans le tableau III.10, nous avons reporté, pour chaque angle d'amorçage, les valeurs obtenues relatives au THD, à la composante continue (DC) et au fondamental (F). Ces valeurs sont comparées et validées par rapport à la norme **IEEE 519**.

A la lumière de ces résultats, il est facile de voir l'effet perturbateur engendré par le pont redresseur à base de thyristors à travers la valeur de l'angle d'amorçage de ces derniers, sur le courant de ligne et la tension à l'entrée du pont. Ainsi, la tension aux bornes du pont et le courant de ligne comportent une distorsion importante dont l'amplitude est proportionnelle à la valeur de l'angle d'amorçage. En effet, l'augmentation de l'angle d'amorçage α conduit à une augmentation des amplitudes des harmoniques des spectres du courant de ligne et de la tension à l'entrée du pont.

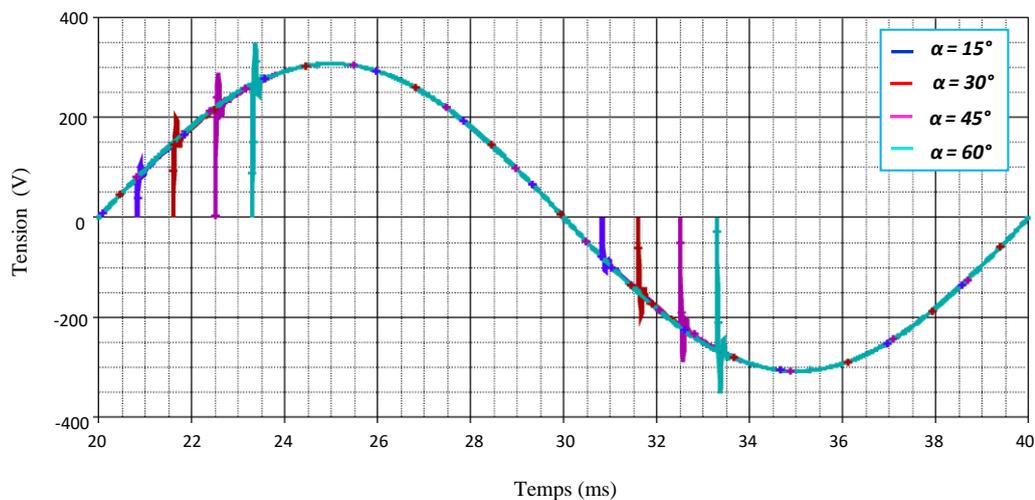


Figure III.26: Evolution de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors (α)

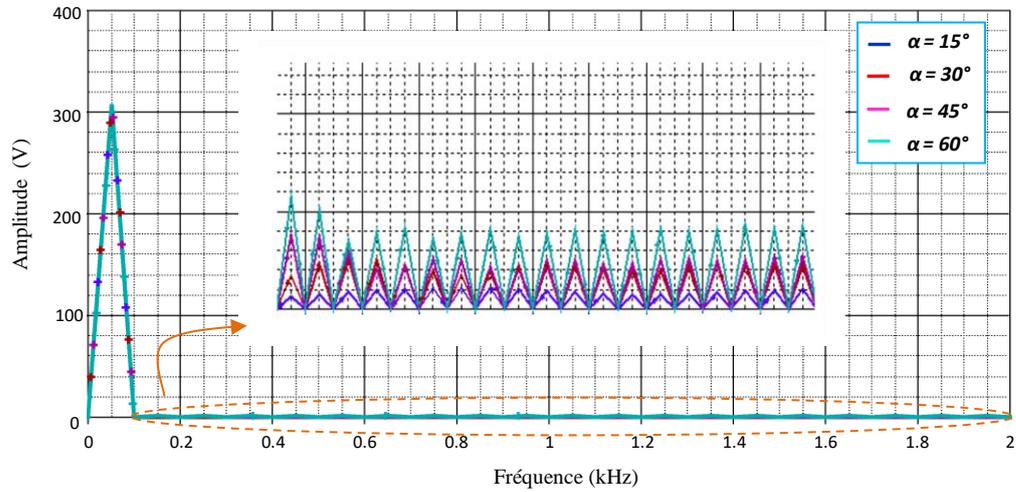


Figure III.27: Spectres fréquentiels correspondant à la tension à l'entrée du pont redresseur, monophasé commandé, pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors (α)

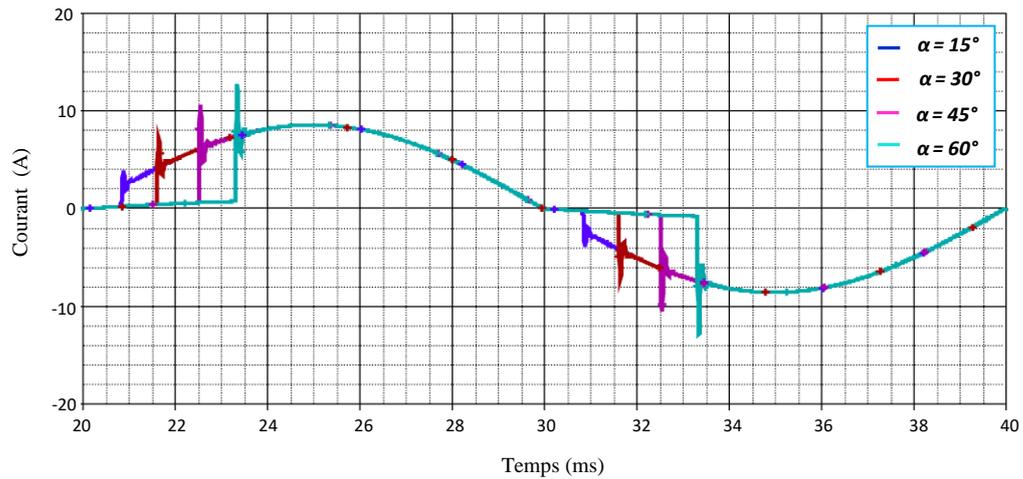


Figure III.28: Evolution temporelle du courant de ligne pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors (α)

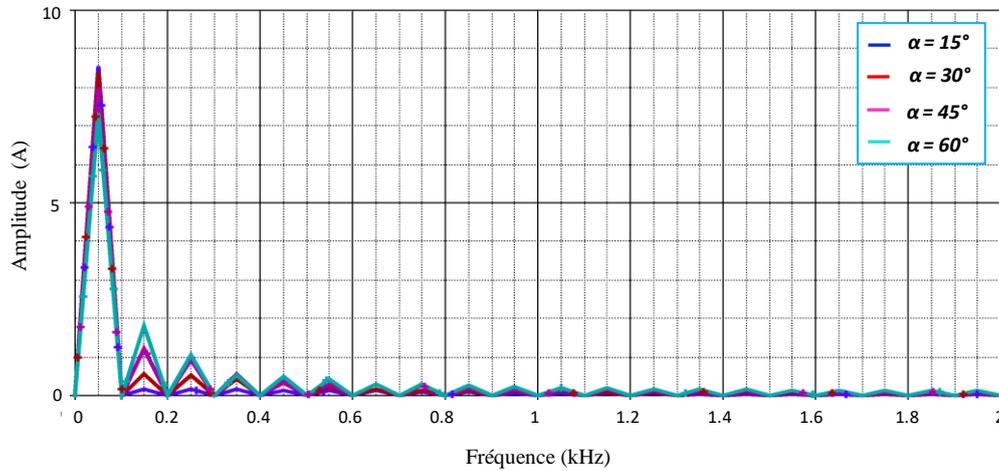


Figure III.29: Spectres fréquentiels du courant de ligne pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors (α)

Les résultats présentés dans les tableaux III.8, III.9 et III.10, montrent que les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur respectent les limites autorisées par la norme *CEI 1000-2-2 classe A* et les amplitudes des harmoniques du courant dépassent les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-3-2 classe A* à partir du neuvième harmonique.

Par ailleurs, d'après les résultats présentés dans le tableau III.11, nous constatons que l'augmentation de l'angle d'amorçage des thyristors conduit à une croissance des THD relatifs au courant de ligne et à la tension à l'entrée du pont redresseur.

Ainsi, le THD relatif au courant dépasse les limites autorisées par la norme *IEEE 519*. En revanche, celui de la tension reste en dessous des limites de cette norme. Quant à l'amplitude du fondamental, en fonction de l'augmentation de l'angle d'amorçage, elle reste presque constante pour la tension à l'entrée du pont redresseur et diminue dans le cas du courant de ligne. Enfin la composante continue est presque nulle pour le courant de ligne et pour la tension à l'entrée du pont redresseur.

Tableau III.8: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé et celles fournies par la norme **CEI 1000-2-2 classe A**

Rang des harmoniques	$\alpha=15^\circ$		$\alpha=30^\circ$	
	Amplitudes des harmoniques de la tension (mV)	Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme CEI 1000-2-2 classe A (V)	Amplitudes des harmoniques de la tension (mV)	Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme CEI 1000-2-2 classe A (V)
3	124.575	15.385	350.162	15.390
5	148.737	18.462	459.212	18.468
7	173.961	15.385	516.363	15.390
9	195.683	4.615	510.925	4.617
11	211.457	10.769	456.556	10.773
13	220.172	9.231	388.942	9.234
15	221.633	0.923	356.631	0.923
17	216.348	6.154	379.167	6.156
19	205.437	4.615	422.445	4.617
21	190.633	0.615	447.616	0.615
23	174.394	4.615	441.665	4.617
25	159.959	4.615	416.259	4.617
27	150.966	0.615	398.649	0.615
29	150.124	1.942	407.184	1.942
31	157.514	1.856	435.958	1.857
33	170.451	0.615	460.639	0.615
35	185.163	1.714	465.899	1.715
37	198.378	1.654	454.305	1.655
39	207.900	0.615	442.578	0.615

Rang des harmoniques	$\alpha=45^\circ$		$\alpha=60^\circ$	
	Amplitudes des harmoniques de la tension (mV)	Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme CEI 1000-2-2 classe A (V)	Amplitudes des harmoniques de la tension (mV)	Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme CEI 1000-2-2 classe A (V)
3	755.906	15.395	1157.000	15.410
5	732.284	18.474	992.126	18.492
7	484.526	15.395	702.296	15.410
9	416.510	4.618	786.197	4.623
11	439.931	10.776	840.156	10.787
13	519.685	9.237	708.661	9.246
15	496.063	0.924	755.906	0.925
17	433.176	6.158	814.647	6.164
19	446.580	4.618	743.136	4.623
21	496.063	0.615	779.528	0.616
23	490.063	4.618	803.150	4.623
25	448.819	4.618	755.906	4.623
27	471.743	0.616	795.188	0.616
29	516.889	1.943	832.833	1.945
31	519.685	1.857	803.150	1.859
33	496.063	0.616	803.150	0.616
35	496.063	0.616	826.772	1.717
37	543.690	1.656	830.005	1.658
39	547.412	1.602	850.056	1.604

Tableau III.9: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques du courant de ligne du pont redresseur monophasé commandé et celles fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (mA)				Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisées par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
	$\alpha=15^\circ$	$\alpha=30^\circ$	$\alpha=45^\circ$	$\alpha=60^\circ$	
3	168.417	575.471	1228.000	1827.000	2.300
5	162.292	510.871	913.386	1039.000	1.140
7	154.081	425.679	575.575	529.807	0.770
9	143.920	331.664	345.473	481.694	0.400
11	132.217	242.721	297.269	425.743	0.330
13	119.454	174.091	291.805	302.685	0.210
15	106.136	138.325	243.888	280.012	0.150
17	92.774	131.097	195.229	269.448	0.132
19	79.882	131.769	179.448	217.635	0.118
21	67.989	126.582	179.785	207.351	0.107
23	57.646	113.731	161.180	197.906	0.097
25	49.409	98.109	136.594	167.779	0.090
27	43.701	86.612	131.872	165.718	0.083
29	40.566	82.712	133.588	162.349	0.077
31	39.501	83.236	124.745	144.187	0.072
33	39.618	82.776	110.762	138.229	0.068
35	40.040	78.809	105.637	134.748	0.064
37	40.146	72.425	109.254	126.504	0.060
39	39.614	66.745	104.030	123.436	0.057

Tableau III.10: Tableau comparatif des valeurs du THD, de l'amplitude du fondamental et de la composante continue, en fonction des différentes valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors

Angle d'amorçage : α (degrés)			15	30	45	60
Tension à l'entrée du pont	THD (%)	Valeurs obtenues par simulation	0.22	0.41	0.62	0.75
		Valeur spécifiée par la norme IEEE 519	8			
	Fondamental (Volts)		308.2	307.9	307.8	307.7
	Composante continue (Volts)		$-7.230 \cdot 10^{-5}$	$5.728 \cdot 10^{-4}$	$-3.186 \cdot 10^{-5}$	$4.099 \cdot 10^{-4}$
Courant de ligne	THD (%)	Valeurs obtenues par simulation	4.95	12.55	22.78	32.53
		Valeur spécifiée par la norme IEEE 519	5			
	Fondamental (Ampères)		8.543	8.393	7.968	7.335
	Composante continue (Ampères)		$1.622 \cdot 10^{-5}$	$-2.234 \cdot 10^{-5}$	$-1.580 \cdot 10^{-5}$	$-2.362 \cdot 10^{-5}$

III.4 Simulation d'un pont redresseur monophasé

Les ponts redresseurs monophasés présentent un intérêt très limité parce que la tension et le courant délivrés par ces convertisseurs sont loin de la forme souhaitée (forme continue). En revanche, les ponts redresseurs triphasés permettent de redresser les courants et les tensions à une forme très proche de la forme continue. Les signaux redressés ont alors une ondulation de fréquence six fois supérieure à celle des tensions d'entrée et un taux d'ondulation très petit. Dans ce paragraphe, nous allons examiner l'influence des perturbations EM créées par ces ponts redresseurs triphasés.

Pour mener à bien cette étude, nous considérons deux cas distincts à savoir :

- le cas des ponts redresseurs triphasés non commandés,
- le cas des ponts redresseurs triphasés commandés (tout thyristors et mixtes).

III.4.1 Pont redresseur triphasé non commandé

Le pont redresseur triphasé non commandé se déduit du pont monophasé (à quatre diodes) en y rajoutant une branche. Il faut alors le connecter sur un réseau électrique triphasé direct et équilibré. La charge continue est connectée entre le point commun des cathodes et le point commun des anodes. Pour étudier le comportement CEM de ce convertisseur avons simulé, sous PSPICE, le circuit présenté à la figure III.30. Les diodes appartenant à ce circuit sont de type BYT12P-600.

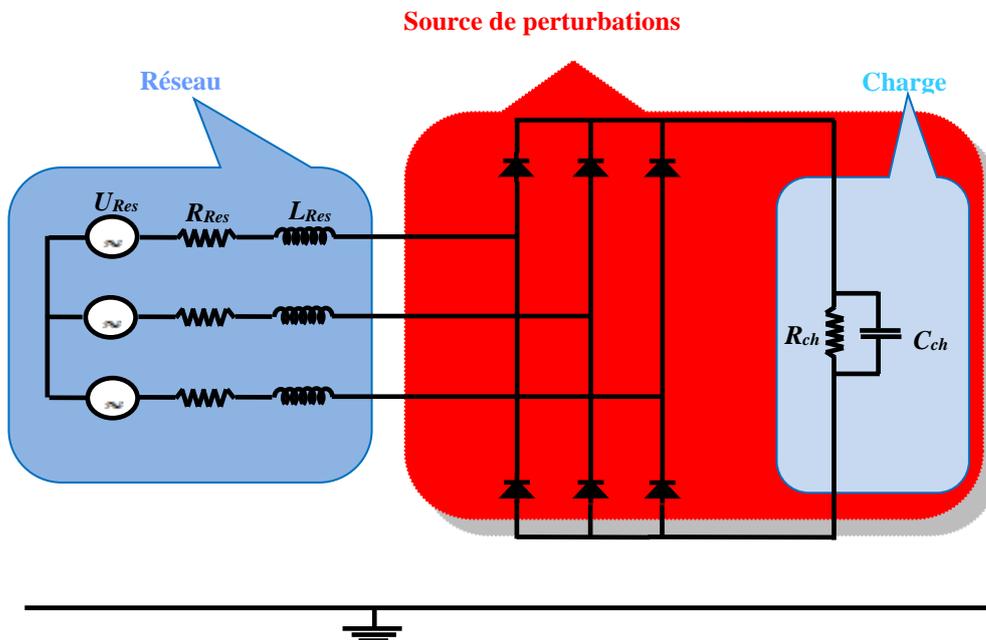


Figure III.30: Structure du pont de diode triphasé débitant sur une charge – Modèle basse fréquence

Les paramètres de simulation sont consignés sur le tableau III.11 suivant :

Tableau III.11: Paramètres de simulation utilisés

U_{Res} (V)	f (Hz)	R_{Res} (Ω)	L_{Res} (μH)	R_{Ch} (Ω)	C_{Ch} (μF)
220	50	0.4	500	50	900

Présentation et analyse des résultats obtenus

Nous avons reporté sur les figures III.31 et III.33 les variations temporelles de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur triphasé ainsi que la forme d'onde du courant de ligne. Les spectres fréquentiels correspondant à ces variations temporelles sont présentés aux figures III.32 et III.34.

Dans les tableaux III.12 et III.13, nous avons reporté les valeurs des amplitudes des harmoniques de la tension composée, de la tension simple et du courant de ligne. Ces valeurs sont comparées avec celles fournies par les normes *CEI classe A 1000-2-2* et *CEI classe A 1000-3-2*.

Ainsi l'analyse des résultats obtenus, met en évidence la déformation des formes d'ondes de la tension et du courant à l'entrée du pont redresseur triphasé due à la présence de diodes dans le circuit de ce pont. Cette déformation se traduit, sur le plan fréquentiel, par l'apparition de plusieurs harmoniques impaires. D'autre part, nous constatons que les harmoniques multiples de trois sont nuls.

Par ailleurs, l'analyse des résultats consignés dans les tableaux III.13 et III.14, montre que les amplitudes des harmoniques de la tension (composée et simple) à l'entrée du pont redresseur ne dépassent pas les limites autorisées par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*, avec un THD inférieur à la valeur limite du THD spécifiée par la norme *IEEE 519*. Quant aux amplitudes des harmoniques du courant de ligne elles sont importantes et dépassent les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-3-2 classe A* ; le THD dans ce cas-là est supérieur à la valeur limite du THD spécifiée par la norme *IEEE 519*.

De plus, nous constatons que le pont redresseur engendre une composante continue tant sur l'onde de tension que sur l'onde de courant au niveau du réseau électrique. Quant à l'amplitude du fondamental correspondant à la tension à l'entrée du pont redresseur, nous remarquons que cette dernière est en dessous de l'amplitude de la tension fournie par le réseau électrique.

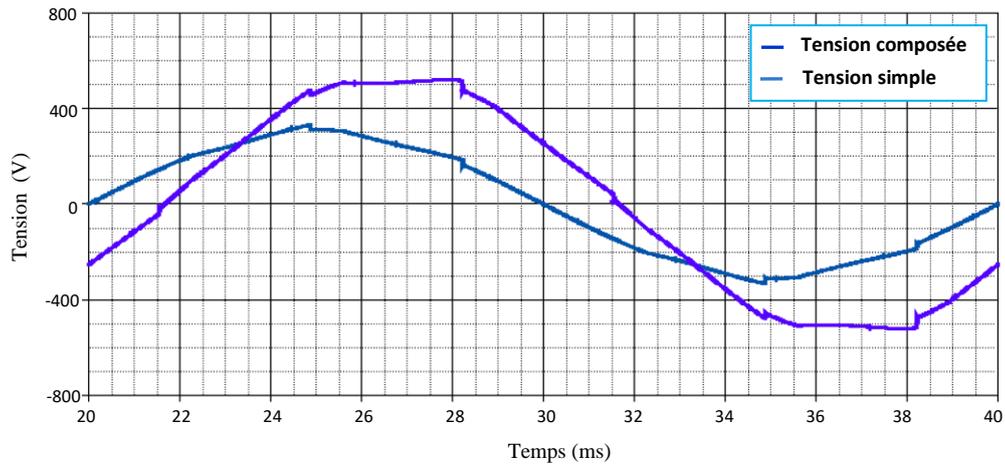


Figure III.31: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé non commandé

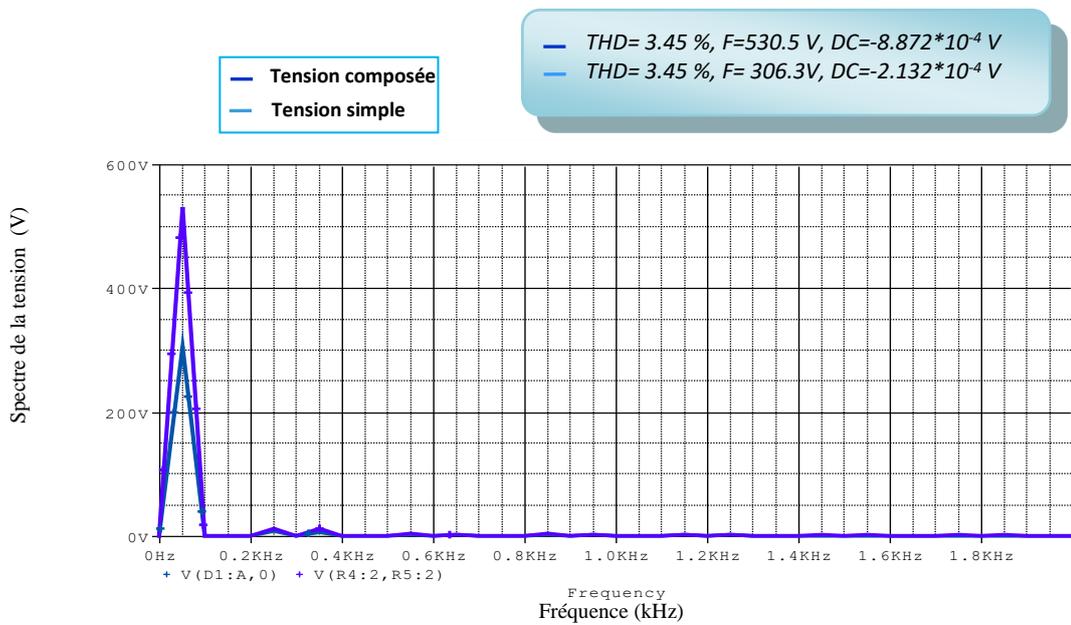


Figure III.32: Spectres fréquentiels de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé non commandé

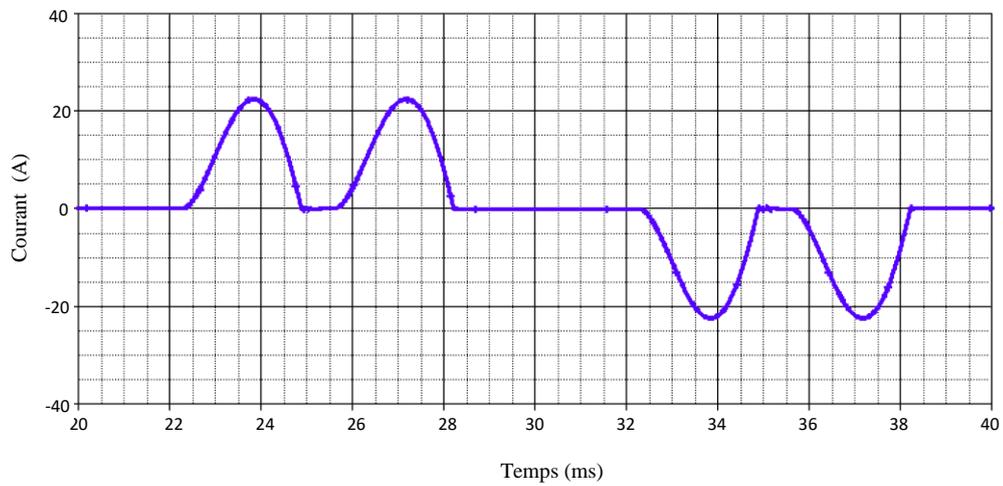


Figure III.33: Variations temporelles du courant de ligne

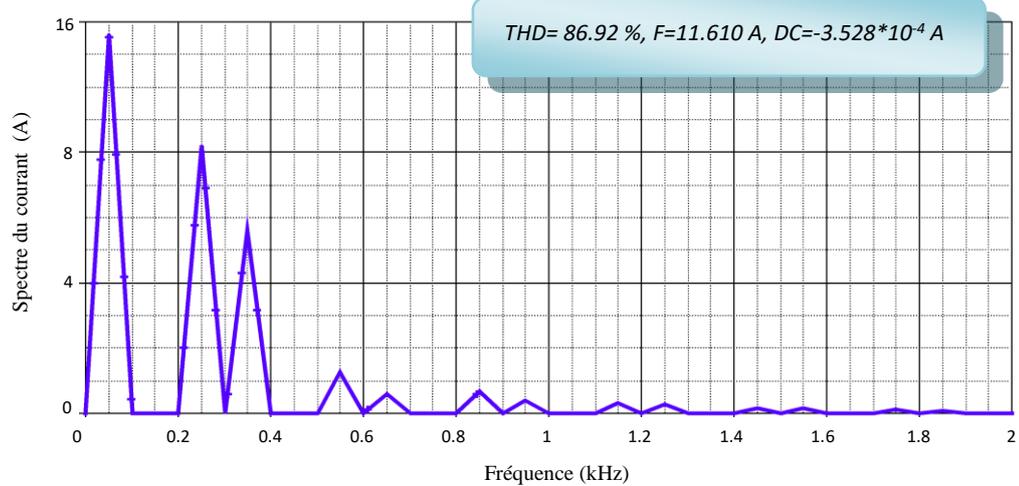


Figure III.34: Spectre fréquentiel correspondant au courant de ligne

Tableau III.12: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé non commandé et celles fournies par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de la tension (V)		Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme <i>CEI 1000-2-2 classe A</i> (V)	
		Composée	Simple	Composée	Simple
3	150	0	0	26.528	15.316
5	250	12.549	7.245	31.834	18.379
7	350	11.391	6.577	26.528	15.316
9	450	0	0	7.958	4.595
11	550	3.910	2.255	18.569	10.721
13	650	2.107	1.218	15.917	9.189
15	750	0	0	1.591	0.919
17	850	3.137	1.808	10.611	6.126
19	950	2.069	1.197	7.958	4.595
21	1050	0	0	1.061	0.612
23	1150	1.942	1.119	7.958	4.595
25	1250	1.908	1.104	7.958	4.595
27	1350	0	0	1.061	0.612
29	1450	1.201	0.691	3.348	1.933
31	1550	1.417	0.819	3.200	1.847
33	1650	0	0	1.061	0.612
35	1750	1.051	0.604	2.956	1.706
37	1850	0.987	0.571	2.853	1.647
39	1950	0	0	1.061	0.612

Tableau III.13: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques du courant de ligne, dans le cas du pont redresseur triphasé non commandé, et celles fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (A)	Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisés par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
3	150	0	2.300
5	250	8.216	1.140
7	350	5.618	0.770
9	450	0	0.400
11	550	1.272	0.330
13	650	0.584	0.210
15	750	0	0.150
17	850	0.669	0.132
19	950	0.397	0.118
21	1050	0	0.107
23	1150	0.307	0.097
25	1250	0.279	0.090
27	1350	0	0.083
29	1450	0.151	0.077
31	1550	0.167	0.072
33	1650	0	0.068
35	1750	0.109	0.064
37	1850	0.097	0.060
39	1950	0	0.057

III.4.1 Ponts redresseurs triphasés commandés tout thyristors et ponts mixtes

Dans ce paragraphe, nous allons étudier (mise en évidence et caractérisation) dans un premier temps les perturbations BF générées par un pont redresseur triphasé tout thyristors (de type MCR3935-10). Nous étudions ensuite, les perturbations produites par un pont redresseur triphasé mixte diodes-thyristors.

Par ailleurs, il est utile de rappeler que les thyristors fonctionnent avec un retard à l'amorçage de 30° par rapport à la conduction naturelle des diodes (amorçage naturel) dans les configurations de pont considérées (pont tout thyristors et pont mixte).

Présentation et analyse des résultats obtenus

Dans les figures III.35, III.36, III.37, III.38, nous présentons, respectivement, les variations temporelles et fréquentielles de la tension (composée et simple) à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne correspondant au cas du pont tout thyristors. Dans les figures III.39, III.40, III.41 et III.42, nous représentons ces mêmes variations pour le cas du pont mixte.

Dans les tableaux III.14, III.15, III.16 et III.17, sont consignées les amplitudes des harmoniques de la tension (composée et simple) à l'entrée pont et du courant de ligne pour les deux configurations de pont étudiées (pont tout thyristors et pont mixte). Ces amplitudes sont confrontées, dans un but de comparaison, avec celles fournies par les normes *CEI classe A 1000-2-2* et *1000-3-2*.

L'analyse des figures présentées ci-dessous, montre clairement l'effet perturbateur engendré par le pont redresseur triphasé, dans ces deux configurations (pont redresseur commandé et pont redresseur mixte), et sa charge. Ainsi, le courant de ligne possède une forme très distordue et assez différente de la forme sinusoïdale qu'il devrait avoir en l'absence de perturbations. La forme d'onde de la tension à l'entrée du pont redresseur (composée et simple) se retrouve elle aussi déformée dans les deux configurations étudiées. De plus, les formes d'ondes obtenues, relatives au pont redresseur mixte, montrent une dissymétrie entre l'onde positive et l'onde négative.

En effet, l'agrandissement (« Zoom ») des courbes représentant les variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur, dans les deux cas de configurations étudiées (pont tout thyristors et pont mixte) montre l'existence d'un phénomène oscillatoire. Ce dernier est dû au blocage des thyristors dans le cas du pont redresseur commandé et au blocage des thyristors et des diodes dans le cas du pont redresseur mixte.

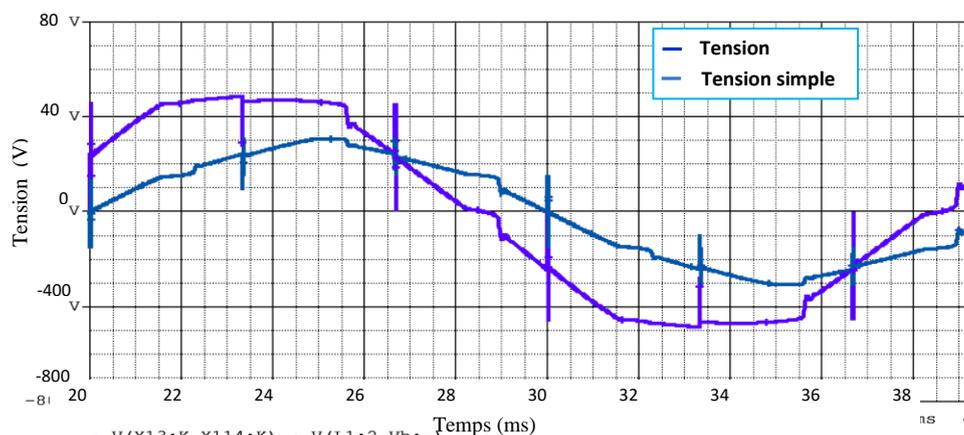


Figure III.35: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur

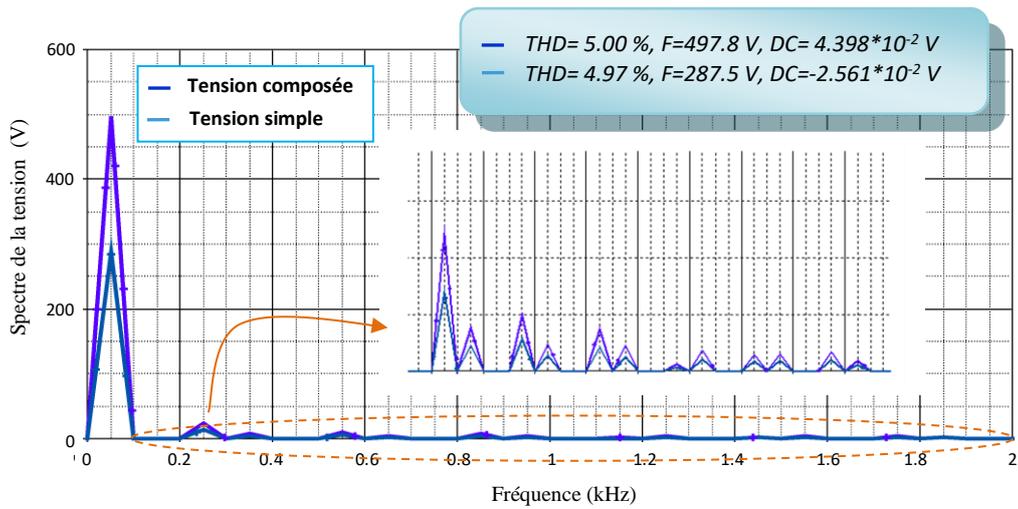


Figure III.36: Spectres fréquentiels de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé commandé tout thyristors

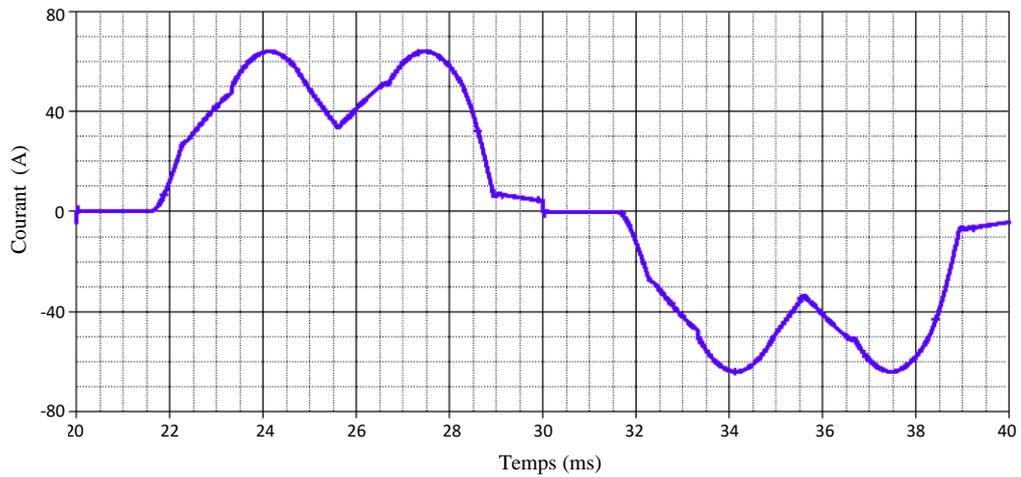


Figure III.37: Forme d'onde du courant de ligne du pont redresseur triphasé commandé tout thyristors

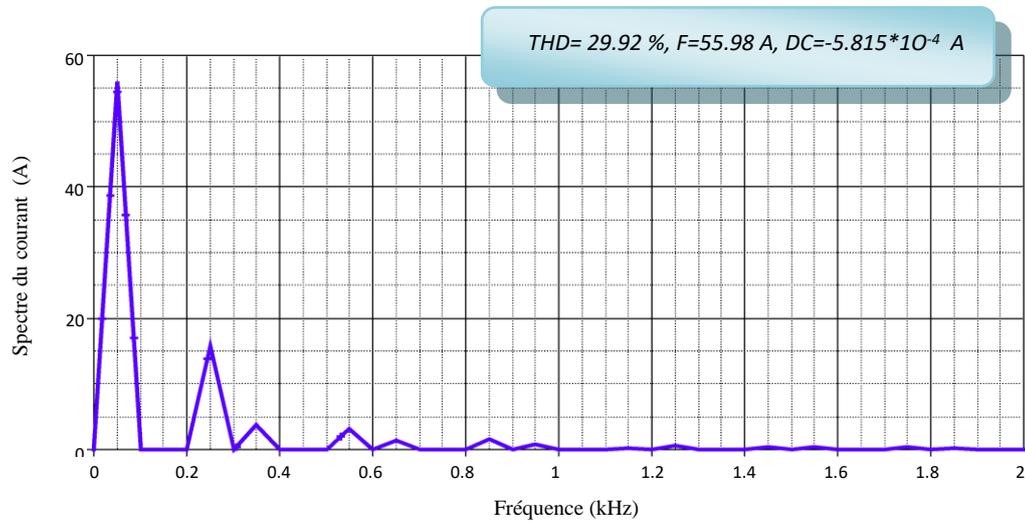


Figure III.38: Spectre fréquentiel du courant de ligne du pont redresseur triphasé commandé tout thyristors

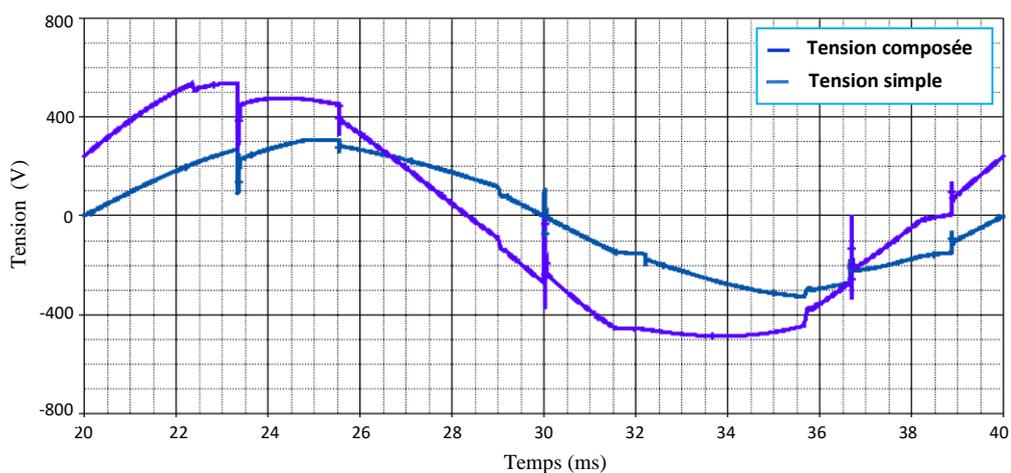


Figure III.39: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte

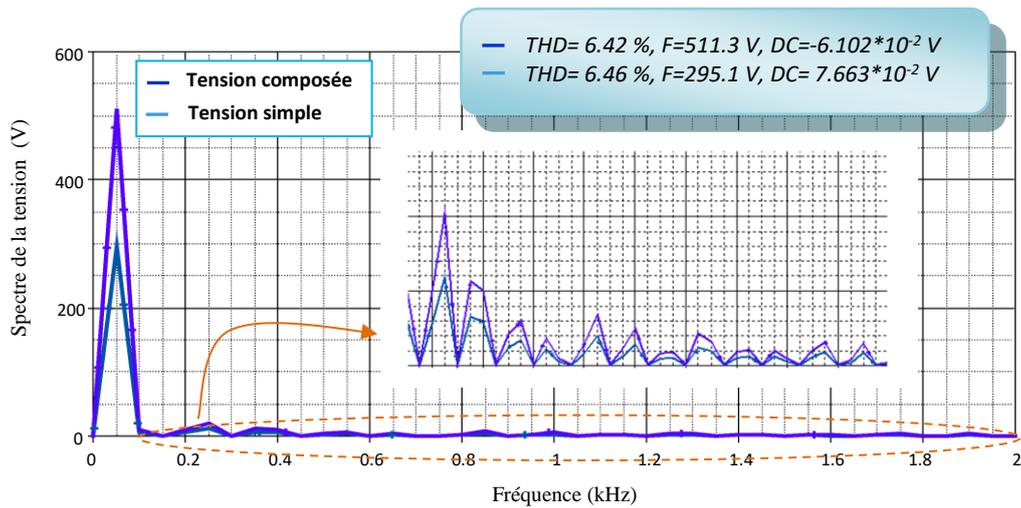


Figure III.40: Spectres fréquentiels de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte

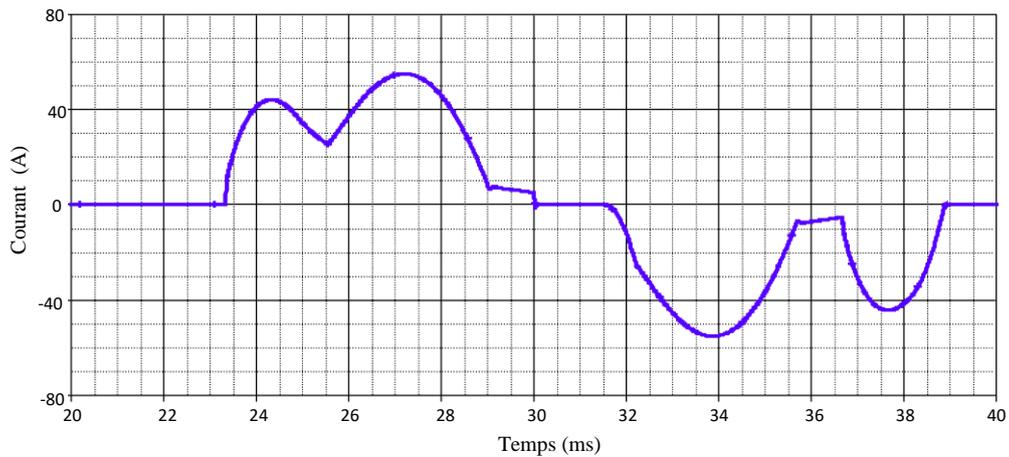


Figure III.41: Variations temporelles du courant de ligne relatives au pont redresseur triphasé mixte

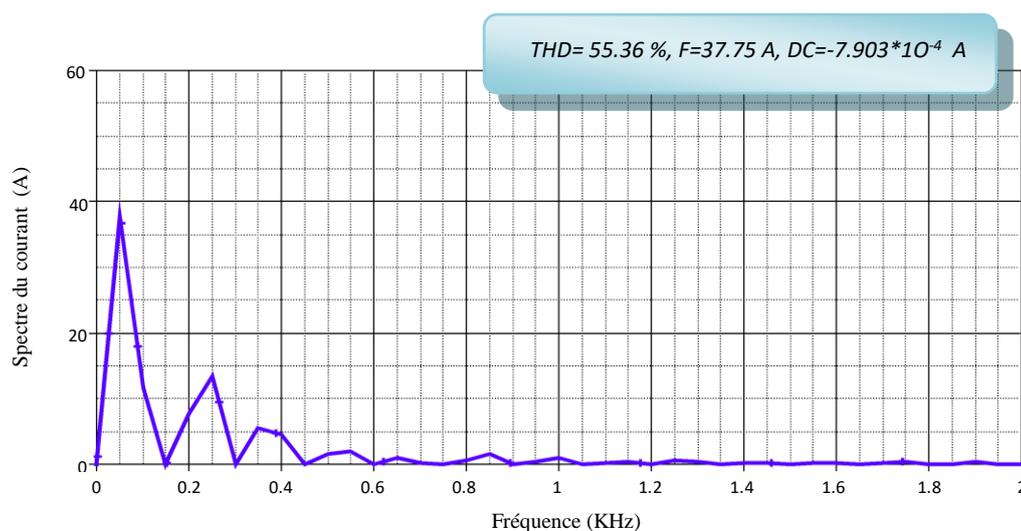


Figure III.42: Spectre fréquentiel du courant de ligne relatif au pont redresseur triphasé mixte

L'analyse des résultats consignés dans les tableaux III.14 et III.15, relatifs au pont redresseur commandé, montre que les amplitudes des harmoniques de la tension (composée et simple) à l'entrée du pont (Tableau III.14) ne dépassent pas les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*. En revanche, les amplitudes des harmoniques du courant de ligne (Tableau III.15) dépassent les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*.

Les résultats consignés dans les tableaux III.16 et III.17, relatifs aux amplitudes des harmoniques de la tension (composée et simple) à l'entrée pont et du courant de ligne dans le cas du pont redresseur mixte, montrent qu'en plus des harmoniques d'ordre impair il existe des harmoniques d'ordre pair. Ces derniers sont dus à la dissymétrie des formes d'ondes (tension, courant).

Aussi, nous constatons que les amplitudes des harmoniques de la tension (Tableau III.16) dépassent les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*, notamment pour les harmoniques de rang 8, 10, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 35 et 38. De même, les amplitudes des harmoniques du courant de ligne (Tableau III.18) dépassent elles aussi les valeurs autorisées par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*. Enfin, nous avons constaté que les harmoniques multiples de trois sont nuls dans les deux cas de configurations de pont étudiées (pont commandé et pont mixte).

Par ailleurs, l'analyse du THD, relatif au courant de ligne dans les deux cas de configurations de pont étudiées, montre que ce dernier dépasse largement les limites spécifiées par la norme *IEEE 519*. En revanche, celui relatif à la tension à l'entrée du pont redresseur commandé reste en dessous des limites spécifiées par la norme *IEEE 519*. Enfin, le THD relatif à la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte se situe au-dessus des limites recommandées par la norme *IEEE 519*.

Tableau III.14: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé tout thyristors et celles fournies par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de la tension (V)		Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme <i>CEI 1000-2-2 classe A</i> (V)	
		Composée	Simple	Composée	Simple
3	150	0	0	24.900	14.376
5	250	24.163	13.956	29.340	17.251
7	350	7.664	4.425	24.900	14.376
9	450	0	0	7.470	4.313
11	550	9.888	5.704	17.430	10.063
13	650	4.731	2.735	14.940	8.625
15	750	0	0	1.494	0.862
17	850	7.312	4.224	9.960	5.750
19	950	4.446	2.563	7.470	4.313
21	1050	0	0	0.996	0.575
23	1150	1.160	672.167m	7.470	4.313
25	1250	3.706	2.138	7.470	4.313
27	1350	0	0	0.996	0.575
29	1450	2.915	1.678	7.470	4.313
31	1550	3.084	1.786	7.470	4.313
33	1650	0	0	0.996	0.575
35	1750	3.455	1.994	7.470	4.313
37	1850	1.819	1.047	7.470	4.313
39	1950	0	0	0.996	0.575

Tableau III.15: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques du courant de ligne, dans le cas du pont redresseur triphasé tout thyristor, et celles fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (A)	Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisées par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
3	150	0	2.300
5	250	15.824	1.140
7	350	3.751	0.770
9	450	0	0.400
11	550	3.226	0.330
13	650	1.322	0.210
15	750	0	0.150
17	850	1.574	0.132
19	950	0.855	0.118
21	1050	0	0.107
23	1150	0.172	0.097
25	1250	0.533	0.090
27	1350	0	0.083
29	1450	0.375	0.077
31	1550	0.371	0.072
33	1650	0	0.068
35	1750	0.367	0.064
37	1850	0.181	0.060
39	1950	0	0.057

Tableau III.16: Tableau comparatif entre les amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte et celles fournies par la norme *CEI 1000-2-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de la tension (V)		Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme <i>CEI 1000-2-2 classe A</i> (V)	
		Composée	Simple	Composée	Simple
2	100	10.225	7.874	10.226	5.901
3	150	0	0	25.565	14.757
4	200	9.912	5.716	5.113	2.951
5	250	20.392	11.835	30.678	17.708
6	300	0	0	2.556	1.475
7	350	11.347	6.573	25.565	14.757
8	400	10.068	5.856	2.556	1.475
9	450	0	0	7.669	4.427
10	500	4.230	2.432	2.556	1.475
11	550	6.042	3.453	17.896	10.329
12	600	0	0	1.023	0.590
13	650	3.777	2.240	15.339	8.854
14	700	0.992	0.615	1.023	0.590
15	750	0	0	1.533	0.885
16	800	2.844	1.658	1.023	0.590
17	850	6.968	4.074	10.226	5.903
18	900	0	0	1.023	0.590
19	950	2.298	1.276	7.669	4.427
20	1000	5.048	2.938	1.023	0.590
21	1050	0	0	1.023	0.590

Tableau III.17: Comparaison entre les valeurs des amplitudes des harmoniques de la tension à l'entrée du **pont, tout thyristors**, avec celles fournies par la norme **CEI 1000-2-2 classe A**

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de la tension (V)		Amplitudes, maximales des harmoniques de la tension, autorisées par la norme CEI 1000-2-2 classe A (V)	
		Composée	Simple	Composée	Simple
22	1100	1.691	1.032	1.023	0.590
23	1150	1.875	1.146	7.669	4.427
24	1200	0	0	1.023	0.590
25	1250	4.296	2.509	7.669	4.427
26	1300	3.275	1.963	1.023	0.590
27	1350	0	0	1.023	0.590
28	1400	1.813	1.065	1.023	0.590
29	1450	2.172	1.274	3.226	1.226
30	1500	0	0	1.023	0.590
31	1550	2.102	1.258	3.084	1.780
32	1600	1.037	0.620	1.023	0.590
33	1650	0	0	1.023	0.590
34	1700	2.056	1.230	1.023	0.590
35	1750	3.188	1.895	2.848	1.644
36	1800	0	0	1.023	0.590
37	1850	0.774	0.430	2.750	1.587
38	1900	3.049	1.795	1.023	0.590
39	1950	0	0	1.023	0.590
40	2000	0.518	0.352	1.023	0.590

Tableau III.18: Comparaison entre les amplitudes des harmoniques du courant de ligne, dans le cas du pont redresseur triphasé mixte, et celles fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (A)	Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisées par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
2	100	11.616	1.080
3	150	0	2.300
4	200	7.611	0.430
5	250	13.420	1.140
6	300	0	0.300
7	350	5.585	0.770
8	400	4.464	0.230
9	450	0	0.400
10	500	1.496	0.184
11	550	1.969	0.330
12	600	0	0.153
13	650	1.074	0.210
14	700	0.287	0.131
15	750	0	0.150
16	800	0.637	0.115
17	850	1.517	0.132
18	900	0	0.102
19	950	0.419	0.118
20	1000	0.935	0.092
21	1050	0	0.107

Tableau III.19: Comparaison entre les valeurs des amplitudes des harmoniques du courant de ligne avec celles fournies par la norme *CEI 1000-3-2 classe A*

Rang des harmoniques	Fréquences des harmoniques (Hz)	Amplitudes des harmoniques de courant de ligne (A)	Amplitudes, maximales des harmoniques du courant, autorisées par la norme <i>CEI 1000-3-2 classe A</i> (A)
22	1100	0.289	0.083
23	1150	0.314	0.097
24	1200	0	0.076
25	1250	0.626	0.090
26	1300	0.476	0.071
27	1350	0	0.083
28	1400	0.228	0.065
29	1450	0.285	0.077
30	1500	0	0.061
31	1550	0.261	0.072
32	1600	0.130	0.075
33	1650	0	0.068
34	1700	0.226	0.054
35	1750	0.347	0.064
36	1800	0	0.051
37	1850	0.066	0.060
38	1900	0.303	0.048
39	1950	0	0.057
40	2000	0.056	0.046

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné deux aspects principaux. Tout d'abord, nous avons étudié les perturbations électromagnétiques conduites à basses fréquences engendrées par les redresseurs monophasés, qu'ils soient commandés ou non. Ensuite, nous nous sommes penchés sur l'analyse des perturbations électromagnétiques à basses fréquences générées par les ponts redresseurs triphasés, également qu'ils soient commandés ou non.

Les résultats issus des simulations ont révélé :

- Que le pont redresseur monophasé commandé est moins polluant que le pont redresseur monophasé non commandé. En effet, les formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé et du courant de ligne se rapprochent de la forme sinusoïdale ce qui le rend plus intéressant sur le plan de la CEM que le redresseur monophasé non commandé.
- Que les ponts redresseurs triphasés non commandés améliorent la qualité des formes d'ondes avec absence d'harmoniques multiples de trois donc un taux de distorsion harmonique (THD) plus faible. Par contre, pour les ponts redresseurs triphasés commandés tout thyristors, nous avons mis en évidence que l'augmentation du nombre des thyristors entraîne une élévation du THD et une dégradation de la qualité des formes d'ondes.
- Que les ponts redresseurs mixtes (deux sources de perturbations différentes) présentent des formes d'ondes distordues avec un THD élevé.

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons montré que la CEM comporte trois notions fondamentales: émission, susceptibilité et perturbation. Ces notions génériques permettent d'introduire les trois notions de bases de l'analyse CEM des dispositifs électriques à savoir: les sources, les chemins et les victimes. D'autre part nous avons montré que les émissions électromagnétiques émissives conduites et rayonnées sont soumises à des normes spéciales qui exigent des limites de perturbations à respecter.

Nous avons montré que les sources des perturbations dans les dispositifs de puissance peuvent être à l'origine des caractéristiques temporelles et fréquentielles des signaux issus de points chauds des interrupteurs de puissance. De ce fait, la dérivabilité du temps de montée et de temps de descente ainsi la fréquence de commutation apparaissent comme des facteurs très importants pour caractériser un signal utile dans le domaine de l'électronique de puissance. D'autre part, l'ouverture des interrupteurs de puissance provoque des périodes oscillatoires amorties. Ces phénomènes sont à l'origine de perturbations électromagnétiques indésirables. Nous avons aussi montré que chaque interrupteur (Diode, Thyristor) possède sa propre signature CEM.

Ce travail nous a permis de en mettant évidence les sources et les chemins de propagations des perturbations EM basses fréquences présentes dans l'environnement des ponts redresseurs étudiés. A l'issue des résultats trouvés nous avons pu mettre en évidence le dépassement des normes CEM en vigueur au niveau du taux de distorsion d'harmonique (THD) ainsi que le niveau des amplitudes des harmoniques générées par ces redresseurs distordant ainsi le courant de ligne et par conséquent la tension du réseau.

A noter que les simulations réalisées dans le cadre de ce travail ont été effectuées sous environnement PSPICE et ont nécessité un effort de programmation non négligeable.

Pour finir, nous considérons que les objectifs fixés au départ ont été atteints dans leur globalité.

Références bibliographique

- [1] AHMIL INES Dr : TOURAB WAFI BELDI ASMA Modélisation analytique des champs électromagnétiques en vue d'estimation de l'exposition publique et professionnelle basse fréquence
- [2] Cahier technique n° 199 La qualité de l'énergie électrique
- [3] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Compatibilite-electromagnetique-page-3.html>
- [4] André collin la compatibilité électromagnétique
- [5] Abdallah Darkawi La Compatibilité Électromagnétique (CEM)
- [6] Cahier technique n° 149 La CEM : la compatibilité électromagnétique
- [7] <https://blog.formatis.pro/cem/>
- [8] compatibilité électromagnétique et qualité d'énergie électrique
- [9] Cours de CEM Notions élémentaires Jacques Cuvillier
- [10] <https://www.sicomtesting.com/fr/blog/limportanza-della-compatibilita-elettromagnetica/>
- [11] Élt 217 Electronique Etude Des Perturbation EM Hautes Frequences Generees par un pont Redresseur 2011 HIDAOUI A.E.K REZINI
Élt 218 Electronique
- [12] : Hidri.Imed , cours D'électronique de puissance , Technologue à l'ISET de Nabeul
- [13] :
<https://www.numlor.fr/elearning/etenp/co/4REDRESSEMENTCOMMANDE.html>
- [14] : Claude CHEVASSU , Électronique de puissance Principes , 5 décembre 2013

