



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 TAZIR Miloud

Mr GRICHE Ilyess

Identification des perturbations EM conduites hautes fréquences générées par les ponts redresseurs

Soutenu le / / 2023 devant le jury composé de :

Présidente :	Mme BECHIRI	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr BENTOUNES	Pr	Université de Mostaganem
Rapporteuse :	Mme REZINI	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2022/2023



REMERCIEMENTS

**Nous remercions, tout d'abord, notre Dieu, qui nous a
donné la force de faire ce travail**

**Deuxièmement, nous tenons à remercier notre
superviseur Mme Saliha Rezini**

Pour ses conseils, son expérience et ses conseils

**nous remercions tous les enseignants de département
GENIE électrique pour leurs**

rôles importants dans notre formation.

**Par conséquent, nous exprimons notre gratitude à tous
les membres du jury pour leur présence.**

**J'accepte de lire ce manuscrit et de fournir les critiques
nécessaires sous la forme de ce mémoire**

**Enfin, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin
Pour réaliser cette recherche, la fin de cette étude, je
dis merci**

T.Miloud/G.Ilyess

Sommaire

Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Généralité sur la Compatibilité Electromagnétique</u>	
I.1.Introduction.....	2
I.2 Définition de la compatibilité électromagnétique (C.E.M)	2
I.3 Niveau de perturbation et niveau d'immunité	3
I.3 .1 Niveau d'immunité.....	3
I.3 .2 Limite d'émission.....	3
I.4 Représentation symbolique de la CEM.....	4
I.5 Sources de perturbation électromagnétique	4
I.5.1 Sources naturelles	4
I.5.2 Sources artificielles	5
I.6 Couplage électromagnétique.....	5
I.6.1 Couplage par conduction	5
I.6.1.1 Mode différentiel (symétrique)	5
I.6.1.1.1 Couplage capacitif.....	6
I.6.1.1.2 Couplage inductif.....	6
I.6.1.2 Mode commun (asymétrique).....	7
I.6.1.2.1 Couplage par impédance commune	7
I.6.2 Couplage par rayonnement.....	8
I.6.2.1 Couplage par champ électrique	8
I.6.2.2 Couplage par champ magnétique	9
I.7 Perturbations électromagnétique	9
I.7.1 Perturbations à basses fréquences	10
I.7.1.1 Perturbations BF en mode conduit	10
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.....	11
I.8 Types de CEM	11
I.8.1 CEM inter système	11

SOMMAIRE

I.8.2 CEM intra système	11
I.8.3 CEM de matériel.....	11
I.9 Concept de la protection en CEM	11
I.9.1 Action directe 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 des convertisseurs statiques	12
I.10.1 Problématique de CEM en électronique de puissance	12
I.10.2 Modélisation CEM en électronique de puissance	12
I.10 .2.1 Méthodes indirect.....	12
I.10 .2.2 Méthodes direct	12
I.10.3 Normalisation CEM en électronique de puissance	13
I.10.3.1 Normes basses fréquences	13
I.10.3.2 Normes hautes fréquences.....	13
I.11 conclusion.....	13

Chapitre II : synthèse sur les montages redresseurs

II.1 Introduction	16
II.2 Electroniques de puissance.....	16
II.3 Les convertisseurs statiques	16
II.3.1 Les typé de convertisseurs statiques	16
II.3.1.1 Les convertisseurs AC-DC : « Les redresseurs»	16
II.3.1.2 Les convertisseur DC-AC : « Les onduleurs »	17
II.3.1.3 Les convertisseur AC-AC : « Les gradateurs »	17
II.3.1.4 Les convertisseur DC-DC : «Hacheur ».....	18
II.3.2 Convertisseurs réversibles.....	18
II.3.3 Construction du convertisseur de puissance.....	18
II.4 les interrupteur non commandables	18
II.4.1 Diode de puissance.....	18
II.4.1.1 Présentation	18
II.4.1.2 Fonctionnement du la diode parfait	19

SOMMAIRE

II.5 Les interrupteurs commandables.....	19
II.5.1 Le thyristor	20
II.5.1.1 Présentation	20
II.5.1.2 Caractéristique statique.....	20
II.6 Montages de redresseurs	21
II.6.1 Introduction	21
II.6.2 Types des redresseurs.....	21
II.6.2 .1 Redresseurs non commandé « Redresseurs tout diodes»	21
II.6.2 .2 Redresseurs commandé « Redresseurs tout thyristors »	21
II.7 Redressement non commandé.....	22
II.7.1 Redressement non commandé simple alternance	22
II.7.1.1 Redresseur non commandé monophasé simple alternance P1	22
II.7.1. 2 Redresseur non commandé triphasé simple alternance P3	22
II.7.2 Redressement non commandé double alternance.....	23
II.7.2.1 Redresseur non commandé monophasé double alternance PD2.....	23
II.7.2.2 Redresseur noncommandé triphasé double alternance PD3.....	24
II.8 Redressement commandé	24
II.8 .1 Redressement commandé simple alternance	24
II.8 .1.1 Redresseur commandé monophasé simple alternance P1	25
II.8 .1.2 Redresseur commandé triphasé simple alternance P3	25
II.8 .2 Redressement commandé double alternance	26
II.8 .2 .1 Redresseur commandé monophasé double alternance PD2.....	26
II.8 .2 .2 Redresseur commandé triphasé double alternance PD3.....	27
II.9 Autres types de redresseur	27
II.10 Appareils utilisant le redresseur	27
II.11 Conclusion.....	28

Chapitre III : Etude et simulation des perturbations EM générées par les ponts redresseurs

III.1 Introduction	29
III.2 Hypothèses liées aux dispositifs étudiés.....	29
III.3 Simulation d'un pont redresseur monophasé.....	30

SOMMAIRE

III.3.1 Considérations théoriques	30
III.3.2 Pont redresseur monophasé non commandé.....	31
III.3.2.1 Influence de certains paramètres sur le comportement CEM du réseau.....	31
III.3.3 Pont redresseur monophasé commandé	43
III.3.3.1 Influence de la variation d'angle d'amorçage des thyristors.....	44
III.4 Simulation d'un pont redresseur triphasé	48
III.4.1 Considérations théoriques	48
III.4.2 Pont triphasé non commandé.....	51
III.4.3 Pont triphasé commandé	51
III.5 Conclusion.....	57
Conclusion générale	58
Références	59
Annexe	62

Liste de figures

<u>Chapitre I : Généralité sur la Compatibilité Electromagnétique</u>	
Figure I.1 : Limites d'émission, d'immunité et de compatibilité.	03
Figure I.2 : Schéma bloc symbolisant les différents aspects de la CEM.	04
Figure I.3 : Couplage par conduction et par rayonnement.	05
Figure I.4 : Mode différentiel.	06
Figure I.5 : Diaphonie capacitive.	06
Figure I.6 : Diaphonie inductive.	07
Figure I.7 : Mode commun.	07
Figure I.8 : Couplage par impédance commune.	08
Figure I.9 : Emissions en champ magnétique (a) et en champ électrique (b).	09
Figure I.10 : Couplage d'un champ électrique E sur un conducteur.	09
Figure I.11 : Emission en champ magnétique.	10
Figure I.12 : Limites relatives aux émissions conduites.	14
<u>Chapitre II : Généralités sur les redresseurs.</u>	
Figure II.1 : Conversion AC-DC.	18
Figure II.2 : Conversion DC-AC.	18
Figure II.3 : Conversion AC-AC.	18
Figure II.4 : Conversion DC-DC.	19
Figure II.5 : diode de puissance.	20
Figure II.6 : Fonctionnement de la diode parfait.	20

Liste de figures

Figure II.7 : thyristor de puissance.	21
figure II.8 Caractéristique d'un thyristor.	22
figure II.9 Redresseur P1 non commandé.	24
figure II.10 Redresseur P3 non commandé.	24
figure II.11 Redresseur PD2 non commandé.	25
figure II.12 Redresseur PD3 non commandé.	26
Figure II.13 Redresseur P1 commandé.	27
Figure II.14 Redresseur P3 commandé.	27
Figure II.15 Redresseur PD2 commandé.	28
Figure II.16 Redresseur PD3 commandé.	29

Chapitre III : Etude et simulation des perturbations EM générées par les ponts redresseurs

Figure III.1: Pollution en mode différentiel et en mode commun.	31
Figure III.2: Schéma électrique du pont redresseur non commandé monophasé – Modèle hautes fréquences.	32
Figure III.3: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé à diodes.	33
Figure III.4: Variations temporelles du courant de ligne.	33
Figure III.5: Tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL.	34
Figure III.6: Spectre des perturbations totales localisées sur le RSIL.	34
Figure III.7: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé pour différentes valeurs de R_{ch} .	36
Figure III.8: Variations temporelles du courant de ligne pour différentes valeurs de R_{ch} .	36
Figure III.9: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de R_{ch} .	36
Figure III.10: Spectres des perturbations totales localisées sur le RSIL pour différentes valeurs de R_{ch} .	37

Liste de figures

Figure III.11: Formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé pour différentes valeurs de C_{ch} .	38
Figure III.12: Formes d'ondes du courant de ligne pour différentes valeurs de C_{ch} .	38
Figure III.13: Formes d'ondes de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de C_{ch} .	39
Figure III.14: Spectres des perturbations totales localisées sur le RSIL pour différentes valeurs de C_{ch} .	39
Figure III.15: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res}).	40
Figure III.16: Variations temporelles du courant de ligne pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res}).	40
Figure III.17: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res}).	41
Figure III.18: Spectres des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res}).	41
Figure III.19: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé.	42
Figure III.20: Variations temporelles du courant de ligne relatives au pont redresseur monophasé commandé.	42
Figure III.21: Forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relative au pont redresseur monophasé commandé.	43
Figure III.22: Spectre des perturbations totales localisées sur le RSIL relatif au pont redresseur monophasé commandé.	43
Figure III.24: Variations temporelles du courant de ligne du pont redresseur monophasé commandé, pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α).	45
Figure III.25: Tensions aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relatives au pont redresseur monophasé commandé, pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α).	45
Figure III.26: Spectres des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL, relatifs au pont redresseur monophasé commandé pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α).	46
Figure III.27: Configuration triphasée typique de mesure des perturbations EM par un RSIL.	47
Figure III.28: Schéma électrique (HF) équivalent au montage considéré.	49

Liste de figures

Figure III.29: Structure du pont redresseur triphasé non commandé – Modèle hautes fréquences .	50
Figure III.30: Variations temporelles de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur non commandé triphasé.	51
Figure III.31: Variations temporelles du courant de ligne relatives au pont redresseur triphasé non commandé.	52
Figure III.32: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relatives au pont redresseur triphasé non commandé.	52
Figure III.33: Spectre fréquentiels des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL correspondant au pont redresseur triphasé non commandé.	52
Figure III.34: Forme d'onde de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur commandé triphasé tout thyristors .	54
Figure III.35: Forme d'onde du courant de ligne correspondant au pont redresseur commandé triphasé tout thyristors.	54
Figure III.36: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL dans le cas du redresseur commandé triphasé tout thyristors.	54
Figure III.37: Spectre des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente de mesure du RSIL relatif au pont redresseur commandé triphasé tout thyristors.	55
Figure III.38: Variations temporelles de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte.	56
Figure III.39: Variations temporelles du courant de ligne correspondant au pont redresseur triphasé mixte.	56
Figure III.40: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relatives au pont redresseur triphasé mixte.	56
Figure III.41: Spectre des perturbations totales localisées sur la résistance du RSIL relatif au pont redresseur triphasé mixte .	57

INTRODUCTION GENERALE

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).

Sur la base de ce constat, l'objectif du travail proposé dans ce travail repose sur l'identification et de la caractérisation de l'agression électromagnétique conduite haute fréquence générée par les ponts redresseurs non commandés et commandés, en monophasé et en triphasé afin de mettre en évidence les effets du raccordement de ces derniers avec le réseau électrique.

Le mémoire s'articule en trois chapitres distincts.

Le premier chapitre est réservé à une exposition exhaustive des principes fondamentaux inhérents à la compatibilité électromagnétique, ainsi qu'à l'explication approfondie des origines et des mécanismes de propagation des diverses perturbations électromagnétiques fréquemment rencontrées au sein du domaine spécifique de l'électronique de puissance.

Le deuxième chapitre se focalise sur l'analyse approfondie et la description exhaustive des ponts redresseurs, englobant les diverses topologies utilisées et le principe de fonctionnement spécifique à chacune d'entre elles.

Le dernier chapitre est dédié à l'étude approfondie de la propagation des perturbations électromagnétiques conduites hautes fréquences engendrées par les ponts redresseurs. Cette étude débute par l'identification des perturbations électromagnétiques conduites générées par les ponts redresseurs non commandés et commandés en mode monophasé, puis se poursuit par l'identification des perturbations électromagnétiques conduites engendrées par les ponts redresseurs non commandés et commandés triphasé. Les résultats de simulation obtenus sont validés en conformité avec les normes actuelles de compatibilité électromagnétique utilisées en mode conduit haute fréquence.

En guise de clôture, notre mémoire s'achèvera par une conclusion globale de notre étude.

Chapitre I

**Généralités sur la compatibilité
électromagnétique**

I.1 Introduction

Le principe de la compatibilité électromagnétique (CEM) consiste à permettre le fonctionnement correct et optimal de tout dispositif électrique en présence d'autres, chacun étant en fonctionnement nominal. De cette définition découlent trois pôles d'intérêt : l'étude des sources de perturbations, l'étude des couplages et, enfin, l'étude de l'impact des perturbations sur une « victime ». Les études CEM ont pour but d'améliorer la cohabitation entre les éléments susceptibles d'émettre des perturbations électromagnétiques et/ou d'y être sensibles. Ainsi nous allons dans un premier temps définir ce qu'est exactement la CEM avec des exemples concrets. Ensuite nous verrons leurs aspects fondamentaux et l'origine des perturbations. Enfin nous présenterons les activités liées à la compatibilité électromagnétique. Actuellement ce domaine est particulièrement important car les dispositifs électriques et électroniques sont de plus en plus nombreux, complexes et stratégiques (électronique de bord d'un avion par exemple) donc vulnérables à la pollution électromagnétique avec des conséquences très importantes.

La CEM est une discipline qui a pour objectif d'étudier les problèmes de cohabitation électromagnétique.

Elle a pour vocation de :

- ✚ Etudier les transferts d'énergie non intentionnels entre systèmes électriques et/ou électroniques,
- ✚ Mettre au point des procédés permettant de limiter les perturbations électromagnétiques émises et de ce fait satisfaire à la réglementation en vigueur,
- ✚ Mettre au point des procédés permettant d'accroître l'immunité des systèmes aux parasites.

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la compatibilité électromagnétique, en suite nous allons donner une vue sur la réglementation et la normalisation en CEM, et finalement nous terminons ce chapitre par une notion sur la CEM des convertisseurs statiques.

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

La compatibilité électromagnétique CEM ou compatibilité électromagnétique EMC (de son nom anglais) est la capacité d'un appareil ou d'un système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans produire de perturbations électromagnétiques intolérables pour quelque raison que ce soit, ni dans cet environnement. Ainsi la compatibilité électromagnétique prend trois aspects :

- ✚ Tout appareil fonctionne de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique. Cela signifie que chaque appareil résiste aux agressions que constituent les perturbations provenant du milieu, et donc qu'il est immunisé contre celles-ci : son niveau d'immunité est suffisamment élevé.

Aucun appareil ne doit produire lui-même de perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement. On comprend que son niveau d'émission de perturbations pour ledit environnement doit être suffisamment bas pour que tout ce qui figure dans cet environnement lui soit insensible.

✚ Ne pas interférer avec lui-même (auto-compatibilité).

I.3 Niveau de perturbation et niveau d'immunité

I.3.1 Niveau d'immunité

Le fonctionnement d'un appareil, d'un système ou d'une installation d'une manière spécifique satisfaisant dans l'environnement électromagnétique. Sinon, la résistance fait référence à un Comportement du dispositif en réponse à une contrainte extérieure jugée incompatible avec un utilisation normale. La résilience est aussi appelée vulnérabilité ; la capacité de supporter perturbations (EMS = Electro Magnetic Susceptibility) [1].

I.3.2 Limite d'émission

Production et propagation de perturbation électromagnétiques. Autrement émission (normes aérospatiales) ou perturbations (normes industrielles) désignent les signaux volontaires ou non dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement des appareils ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage ; c'est le pouvoir perturbateur d'un équipement électrique (EMI = ElectroMagnetic Interference) [2].

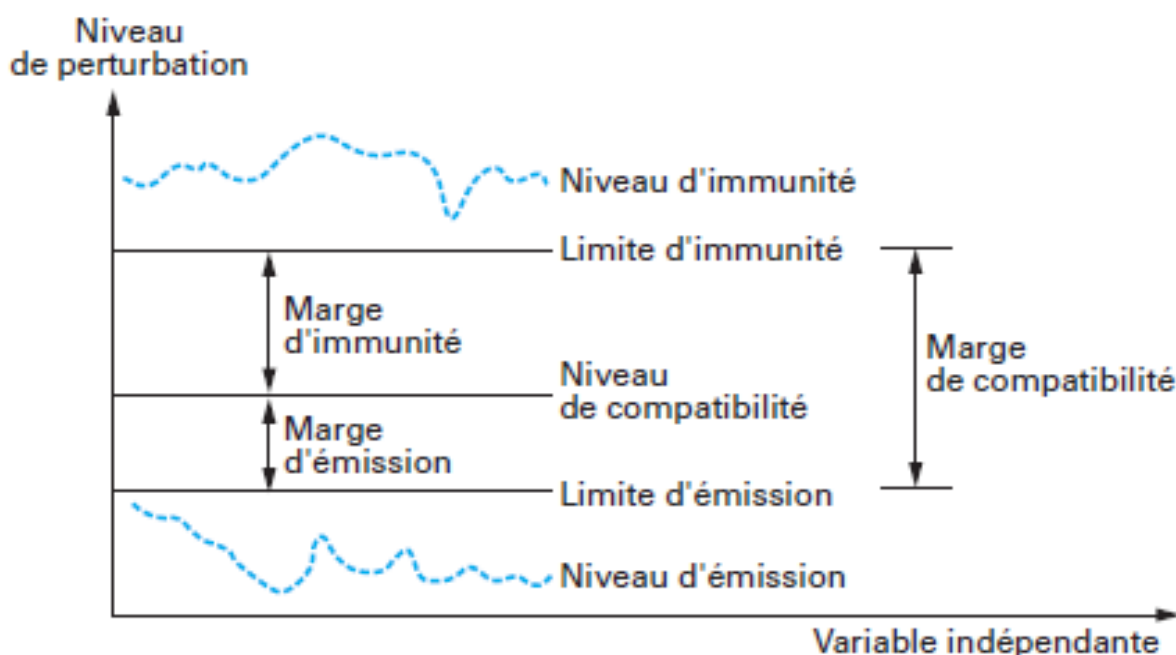


Figure I.1 : Limites d'émission, d'immunité et de compatibilité.

I.4 Représentation symbolique de la CEM

Le domaine de la CEM peut être représenté symboliquement par le schéma bloc de la figure I.2 suivante.

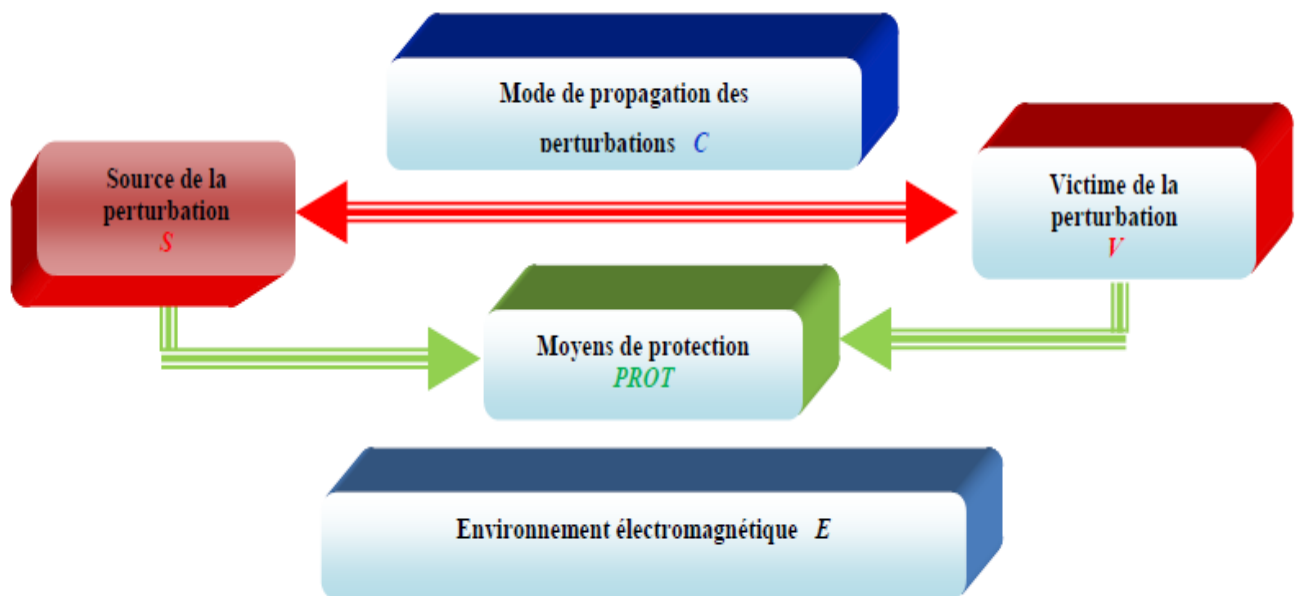


Figure I.2 : Schéma bloc symbolisant les différents aspects de la CEM.

I.5 Sources de perturbation électromagnétique

Si nous nous intéressons à l'environnement électromagnétique d'un équipement, nous pouvons distinguer deux catégories de sources de perturbations.

I.5.1 Sources naturelles

les sources naturelles de perturbations électromagnétiques sont des sources d'origine externe, qui s'expriment par rayonnement sous forme de champs électromagnétiques permanents et transitoires. Ces perturbations, qui sont dues à des phénomènes électrostatiques et aléatoires, peuvent affecter les caractéristiques des systèmes de téléphonie mobile [3].

Parmi les sources de ces bruits on trouve :

- ✚ La foudre qui résulte du passage à la terre de charges électriques accumulées au sein d'un nuage.
- ✚ Les champs magnétiques et électriques terrestre.
- ✚ Les bruits cosmiques et atmosphériques.

I.5.2 Sources artificielles

Les sources de perturbations industrielles sont diverses et sont causées par des installations électriques ou des activités industrielles domestiques (lignes électriques, appareillage, moteurs, etc.). Ces perturbations régulières sont plus importantes que les perturbations d'origine naturelle. Ils prennent des formes continues lorsque les appareils fonctionnent en mode continu, ou des formes impulsionnelles lorsque les appareils sont perturbés dans la zone de transition.

Les perturbations électromagnétiques peuvent être également classées selon la valeur de la fréquence du signal perturbateur :

- ✚ Perturbation basses et moyennes fréquences (inférieures à 5 MHz).
- ✚ Perturbation haute fréquence (supérieures à 30 MHz).

I.6 Couplage électromagnétique

On appelle couplage le processus par lequel l'énergie de la source de perturbation atteint la victime. Les modes de couplage couramment rencontrés sont le couplage rayonné et le couplage conduit (figure I.3) [4].

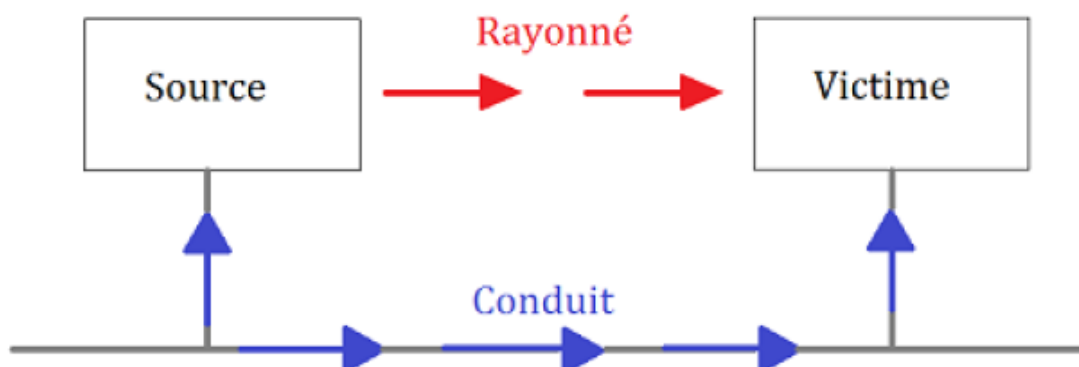


Figure I.3 : Couplage par conduction et par rayonnement.

I.6.1 Couplage par conduction

Ce couplage peut exister lorsque la source et la victime sont reliées par un connecteur. Les lois classiques de l'analyse des circuits électriques sont généralement utilisées pour les décrire ou les modéliser [8,9].

I.6.1.1 Mode différentiel (symétrique)

La propagation s'effectue en mode différentiel lorsque la perturbation est transmise à un seul conducteur actif. 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.4).

Le plan de masse ne joue aucun rôle dans le couplage. En effet, les signaux sont transmis sur deux fils (conducteurs actifs) reliant deux équipements. Le retour du courant se fait au niveau du second fil et les courants dans le premier fil « aller » et le deuxième fil « retour » sont identiques mais de signe opposé. La tension parasite (tension en mode différentiel : U_{MD}) se manifeste entre l'un et l'autre des conducteurs [8].

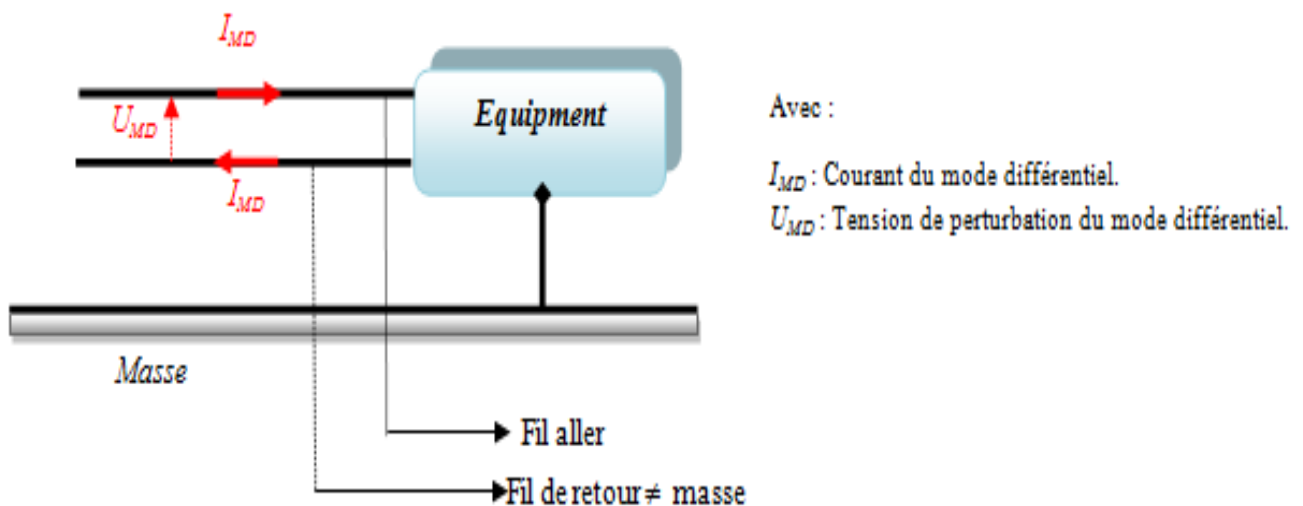


Figure I.4 : Mode différentiel.

I.6.1.1.1 Couplage capacitif

Une tension perturbatrice générée par la source va aggraver la victime par une capacité (figure I.5) [8].

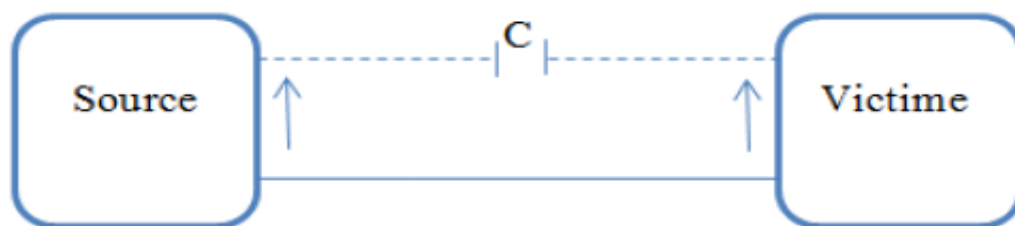


Figure I.5 : Diaphonie capacitive.

I.6.1.1.2 Couplage inductif

Couplage de circuits effectué sans conducteur électrique, à distance, sous l'effet d'un champ magnétique

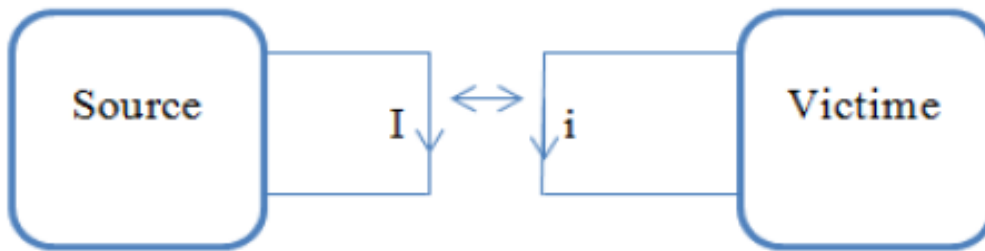
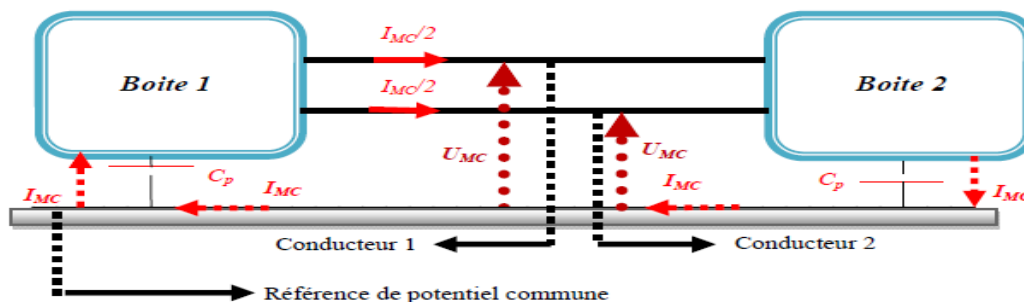


Figure I.6 : Diaphonie inductive.

I.6.1.2 Mode commun (asymétrique)

Avec le couplage conducteur en mode commun, la propagation se fait essentiellement via la masse et la boucle de masse, ce qui peut entraîner un couplage d'impédance commune. Dans ce mode, la propagation du bruit (courant de mode commun I_{MC}) se propage à tous les conducteurs actifs. Elle est réalisée sur les deux conducteurs dans le même sens. Le courant de mode commun reflue à travers la référence de potentiel commun via les capacités parasites C_p (figure I.7).



Avec :

C_p : Capacité parasite.

I_{MC} : Courant du mode commun.

U_{MC} : Tension de perturbation du mode commun.

Figure I.7 : Mode commun.

I.6.1.2.1 Couplage par impédance commune

L'impédance d'un conducteur électrique n'est jamais nulle. Tout courant (utile ou parasite) d'un conducteur crée une tension entre ses extrémités. Ce phénomène est particulièrement stricte pour les bas niveaux (capteurs, mesures) ou les hauts débits (vidéo, radio) (figure I.8) [5].

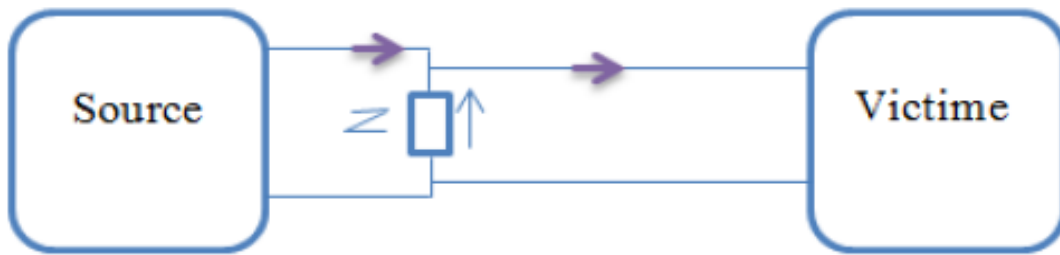


Figure I.8 : Couplage par impédance commune.

I.6.2 Couplage par rayonnement

Les circuits électriques lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel ou parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et la distance par rapport à la source. La description du champ électromagnétique généré par un système est souvent difficile car chaque système contient en général plusieurs sources qui contribuent au rayonnement [4]. Il peut y avoir un certain nombre de boucles de courant, dont chacun peut être assimilé à un dipôle magnétique. D'autre part, il peut y avoir une contribution importante des courants en mode commun circulant dans les câbles de connexion. Ces derniers peuvent être assimilés à des dipôles électriques.

- ✚ L'émission en champ magnétique, exprimée en A/m, est engendrée par un circuit électrique à basse impédance parcouru par un courant I .
- ✚ L'émission en champ électrique, exprimé en V/m, est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel V .

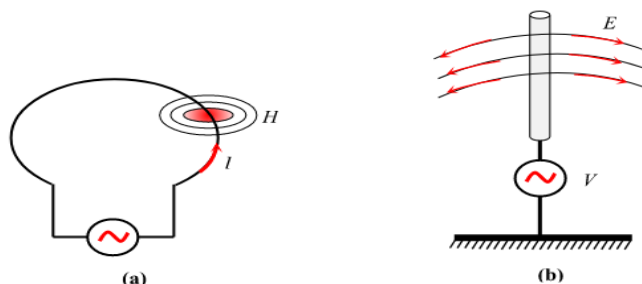


Figure II.9: Emissions en champ magnétique (a) et en champ électrique (b)

I.6.2.1 Couplage par champ électrique

Un champ électrique variable engendre sur les conducteurs parallèles à ses lignes de champ un courant électrique. Ce phénomène est appelé couplage champ à câble. Dans le cas du réseau filaire cuivré, les lignes aériennes se comportent comme de véritables

antennes vis-à-vis des multiples champs électriques alentours, qui y induisent des courants parasites de mode commun. Le réseau électrique domestique présente un comportement identique face aux perturbateurs électromagnétiques présents dans les habitations [6]

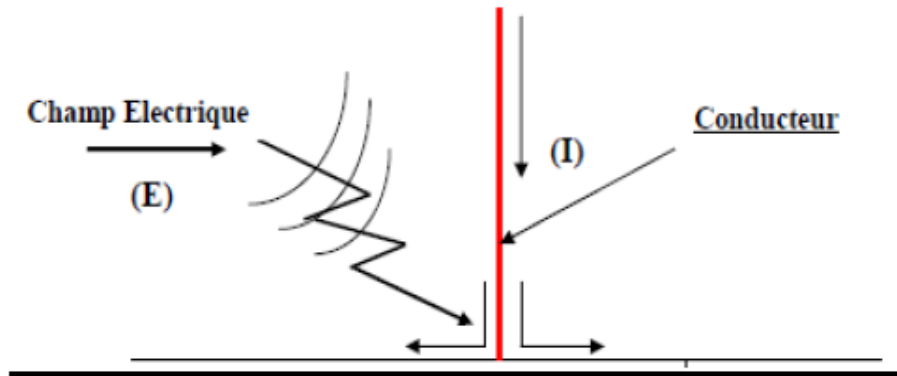


Figure I.10 : Couplage d'un champ électrique E sur un conducteur

I.6.2.2 Couplage par champ magnétique

Un champ électrique E variable appliqué sur un circuit conducteur ouvert fait apparaître une tension V. Le couplage par champ électrique est équivalent au couplage par l'intermédiaire d'une capacité. Une différence de tension variable entre ces deux circuits va générer un courant électrique de l'un vers l'autre à travers la capacité parasite (figure I.10) [7].

Champ H

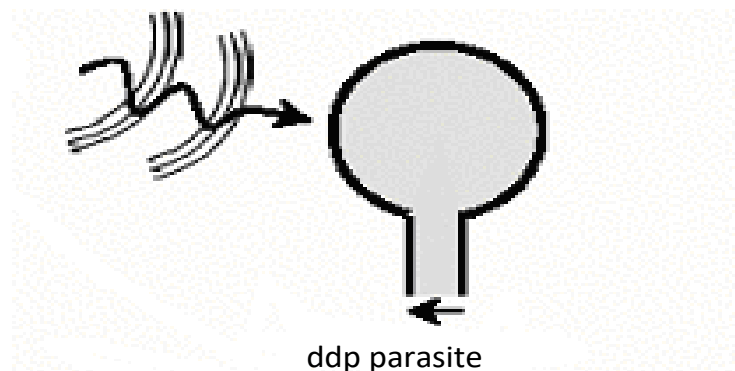


Figure I.11 : Emission en champ magnétique.

I.7 Perturbations électromagnétique

Selon leur contenu fréquentiel, les perturbations électromagnétiques peuvent être classées en deux catégories : les perturbations basses fréquences (BF) et les perturbations hautes fréquences (HF).

I.7.1 Perturbations basses fréquences

Les perturbations basse fréquence "BF" se retrouvent dans l'installation principalement sous forme conduite (câbles ...) souvent longue (quelques dizaines de ms). Dans certains cas, ce phénomène peut être permanent (harmonique).

La conduite d'énergie peut être importante et se traduit par le dysfonctionnement voire la destruction des appareils interconnectés [4].

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 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 entretenu, le champ magnétique à basse fréquence est habituellement généré au voisinage immédiat des victimes.

I.7.2 Perturbations hautes fréquences

Les perturbations haute fréquence «HF» se retrouvent dans l'installation principalement sous forme rayonné (air ...). Le temps de montée de l'impulsion < 10 ns. Et inférieur à des nanosecondes

Ce phénomène peut apparaître de façon permanente (redresseurs, horloges...).

L'énergie rayonnée est généralement faible et se traduit par le dysfonctionnement des matériels environnants [4].

I.7.2.1 Perturbations HF en mode conduit

Les phénomènes conduits se compliquent sérieusement en hautes fréquences, cela ne signifie pas qu'on doit sacrifier les basses fréquences au profit des hautes fréquences, il convient bien entendu de respecter à la fois les bonnes règles BF et HF.

Les perturbations conduites HF sont délicates à mesurer, quel que soit le matériel de mesure et l'expérience de l'opérateur, les mesures HF sont entachées d'erreurs très supérieures à celles commises en BF vu que les perturbations HF sont sévères, fréquentes, peu intuitives et remettent en cause les façons traditionnelles de câbler les circuits.

I.7.2.2 Perturbations HF en mode rayonné

Les perturbations rayonnées finissent toujours après couplage sous forme de perturbations conduites. Il est toujours intéressant de connaître les sources de rayonnement de champs HF, car parfois un simple éloignement réduit ou supprime les risques de dysfonctionnement.

I.8 Types de CEM

I.8.1 CEM 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 CEM 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 CEM 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 en CEM

La conception de moyens de protection est le noyau central de toute la CEM, tant au niveau industriel qu'au niveau de la recherche fondamentale. Théoriquement le rôle de la protection en CEM est de découpler le système sensible (victime) de son environnement électromagnétique. Cela revient à connaître les éléments susceptibles d'affecter négativement le fonctionnement de l'élément victime et à les éliminer ou, du moins, à les éloigner électriquement et magnétiquement [5].

Protéger un équipement, c'est éliminer toutes les énergies, les surtensions et les surintensités induites par une agression donnée, atténuer les champs en vue de lui assurer une bonne fiabilité et une longue vie, et de limiter les interventions de maintenance.

I.9.1 Action directe sur l'élément perturbateur

Ce type de protection est applicable quand on a accès à la source de perturbation (perturbation artificielle). La protection, dans ce cas-là, consiste à réduire l'intensité des signaux perturbateurs à un niveau admissible tel qu'il est imposé par les normes CEM, en vue

d'assurer une cohabitation entre l'élément perturbateur et son environnement. Deux moyens de protection sont d'usage courant dans ce cas de figure :

- ✚ Le blindage des parties rayonnantes de l'élément perturbateur.
- ✚ Le filtrage électrique.

I.9.2 Action sur l'élément perturbé

Dans le cas où la perturbation est inaccessible (perturbation atmosphérique par exemple), l'action sur l'élément à protéger s'impose. Ceci revient à le doter de toutes les mesures propres à le durcir vis à vis de son environnement (blindage, filtrage).

I.9.3 Action sur le moyen de couplage

Le troisième moyen consiste à réduire le phénomène de captation des signaux parasites par les lignes et câbles et leur acheminement vers les charges.

I.10 CEM des convertisseurs statiques

I.10.1 Problématique de CEM 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 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 [5].

I.10.2 Modélisation CEM en électronique de puissance

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. 10.2 .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.10.3 Normalisation CEM en électronique de puissance

Dans l'étude de la CEM les exigences sur les limites des perturbations provoquées par un équipement électrique sont présentées par des normes bien définies. Les normes CEM sont divisées en deux catégories selon la plage des fréquences occupées. Donc on distingue : les normes basses fréquences et les normes hautes fréquences. Chacune d'elles est définie pour un certain nombre d'harmoniques et pour une plage de fréquences donnée, par des limites en fonction du type d'appareil

I.10.3.1 Normes basses fréquences

Ce premier type fait références aux niveaux limites d'émission d'harmoniques basses fréquences (BF) dans le réseau électrique pour diverses catégories d'appareils. Donc les appareils électriques doivent respecter des limites en amplitude d'harmonique bien déterminées. En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de l'laboratoire d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré [10].

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en réduisant les effets néfastes dus aux perturbations sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'institution IEEE (« Institute of Electrical and Electronics Engineers »).

Au niveau international, les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Selon la littérature, les équipements électriques sont classés par catégories en quatre classes (A, B, C et D) à savoir :

- ✚ La classe A inclut les équipements triphasés équilibrés, les appareils électroménagers et les équipements audio.
- ✚ La classe B inclut les outils portatifs et les équipements non professionnels de soudure à arc électrique.
- ✚ La classe C inclut les équipements d'éclairage pour une puissance d'entrée active supérieure à 25W, les équipements d'éclairage à décharge ayant une puissance active d'entrée inférieure ou égale à 25W.
- ✚ La classe D inclut les équipements ayant une puissance active d'entrée inférieure ou égale à 600W (ordinateurs individuels, moniteurs d'ordinateur individuel et récepteurs de télévision).

II.10.3.2 Normes hautes fréquences

Dans cette section nous allons présenter les normes spécifiant les niveaux des émissions HF conduites. Parmi les normes concernées on peut citer : la norme EN61000-6-3/4, la norme EN55011 et la norme EN55022. Ces spécifications sont divisées en deux catégories principal, qu'ils sont désignées par les appellations "Classe A", et "Classe B".

- ✚ Classe A : pour les appareils destinés à être utilisés dans les secteurs industriels.
- ✚ Classe B : pour les appareils destinés à être utilisés dans les secteurs domestiques, et l'industrie légère.

La figure ci-dessous montre les limites des émissions conduites imposées par ces normes.

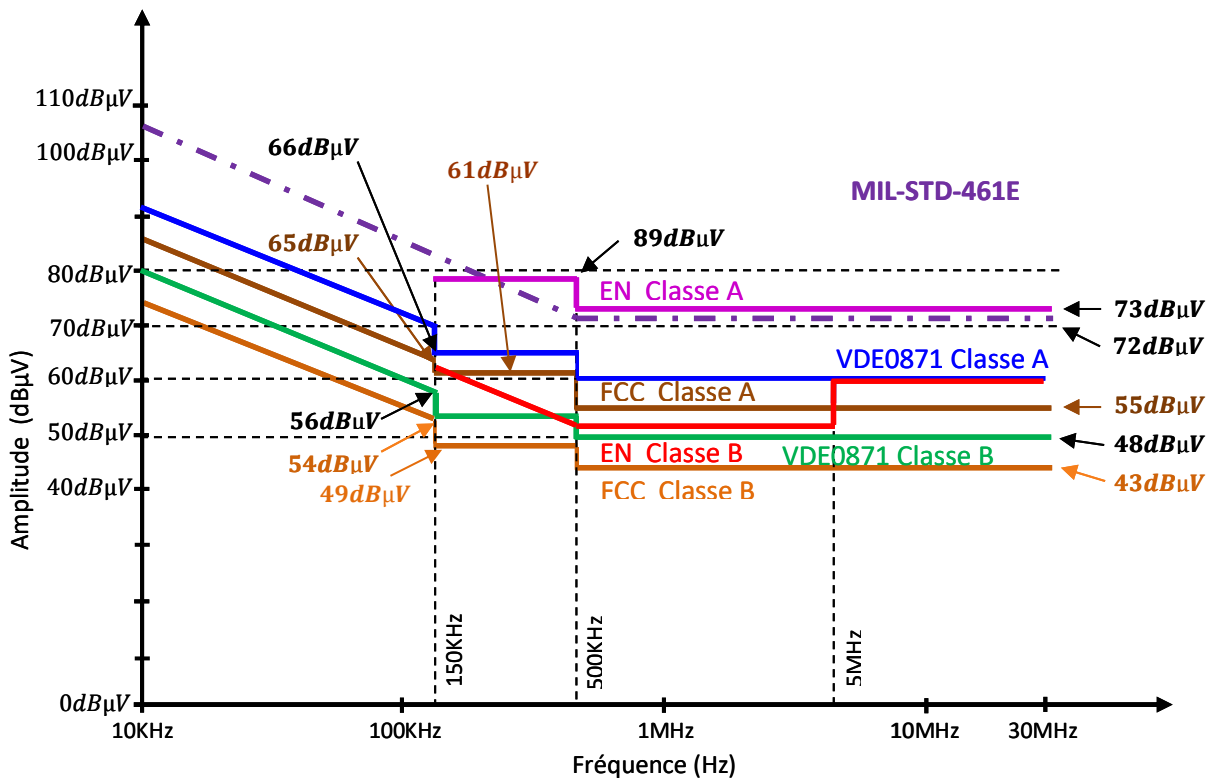


Figure I.12: Limites relatives aux émissions conduites.

I.11 conclusion

La pollution électromagnétique est un problème majeur dans le domaine de l'électronique de puissance, résultant d'une gestion insuffisante des énergies résiduelles au sein des convertisseurs statiques et de l'interaction avec l'environnement électrique par le biais de composants parasites. Malheureusement, la compatibilité électromagnétique, essentielle pour le bon fonctionnement de l'électronique de puissance, a souvent été négligée. Cependant, cette situation évolue et suscite de plus en plus d'attention. Ainsi, dans ce chapitre, notre objectif est de mettre en évidence les aspects clés liés à la compatibilité électromagnétique, tels que le la

source de perturbation, la victime et le couplage. Dans le chapitre suivant, nous allons faire une synthèse détaillée sur les ponts redresseurs

Chapitre II

Synthèse sur les montages redresseurs

II.1 Introduction

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 (diodes). On parle alors dans ce cadre précis de « redressement non commandé », comme il est possible aussi d'utiliser des composants actifs (thyristors) permettant d'opérer un redressement des tensions du réseau dont les caractéristiques dépendent d'un signal de commande réglé par l'utilisateur « redressement commandé ».

Ce chapitre présente tout d'abord le fonctionnement des (diodes) et les (thyristors) et leurs caractéristiques importantes, pour ensuite présenter l'ensemble des structures des circuits qui réalisent cette opération « redresseurs » [11].

II.2 Electronique de puissance

L'électronique de puissance est une branche de l'ingénierie électrique qui concerne l'étude, la conception, le contrôle et l'utilisation des dispositifs électroniques pour la conversion et la gestion de l'énergie électrique. Elle se concentre sur les circuits et les systèmes électroniques qui manipulent de grandes quantités de puissance électrique, généralement dans le but de convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre.

II.3 Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques, également connus sous le nom de convertisseurs d'énergie électrique, sont des dispositifs électroniques utilisés pour convertir l'énergie électrique d'une forme à une autre. Ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications, y compris les systèmes d'alimentation électrique, les véhicules électriques, les appareils électroniques, les énergies renouvelables, etc.

Les convertisseurs statiques permettent de modifier les caractéristiques de l'énergie électrique, telles que la tension, le courant et la fréquence, afin de répondre aux besoins spécifiques du système ou de l'appareil électrique.

II.3.1 Types de convertisseurs statiques

II.3.1.1 Les convertisseurs AC-DC « redresseurs »

Le convertisseur dit AC/DC joue un rôle important dans le redressement des tensions et des courants pour les rendre continus.

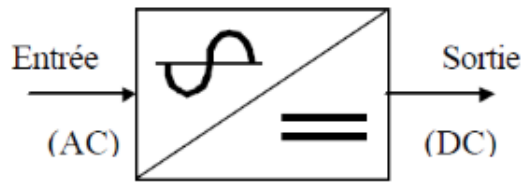


Figure II.1: Conversion AC-DC.

II.3.1.2 Les convertisseur DC-AC « onduleurs »

Les convertisseurs AC/DC permettent l'adaptation d'une source alternative vers une charge continue

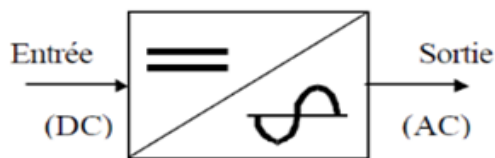


Figure II.2: Conversion DC-AC.

II.3.1.3 Les convertisseur AC-AC « gradateurs »

Un convertisseur AC-AC Il permet de contrôler la valeur moyenne d'un signal sinusoïdal en revanche Il utilise les composants de puissance commandés (Transistor, Thyristor...etc.)

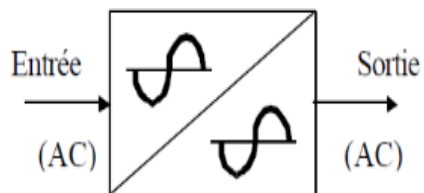


Figure II.3: Conversion AC-AC

II.3.1.4 Les convertisseur DC-DC «Hacheur»

Le convertisseur DC-DC est un dispositif d'électronique de puissance qui met en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés (Thyristor, Triac). Il permet de modifier la valeur de la tension moyenne d'une source de tension continue avec un rendement élevé

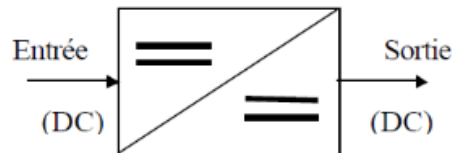


Figure II.4: Conversion DC-DC.

II.3.2 Convertisseurs réversibles

Les convertisseurs réversibles sont capables de fonctionner dans les deux sens, c'est-à-dire de convertir l'énergie d'une forme à une autre et inversement. Ces convertisseurs sont généralement utilisés dans des applications où la conversion bidirectionnelle de l'énergie est nécessaire. Par exemple, les convertisseurs réversibles sont couramment utilisés dans les systèmes de stockage d'énergie, les réseaux électriques intelligents et les véhicules électriques. Un exemple de convertisseur réversible est le convertisseur de puissance bidirectionnel (BC-DC). Il peut convertir l'énergie électrique d'un courant continu (DC) à un courant alternatif (AC) et vice versa. Cela permet de recharger une batterie en utilisant l'énergie du réseau électrique ou de convertir l'énergie de la batterie en énergie utilisable par les appareils électriques.

II.4 Interrupteurs de puissance non commandables [12]

II.4.1 Diode de puissance

II.4.1.1 Présentation

La diode de puissance (Figure II.5) est un composant non commandable (ni à la fermeture ni à l'ouverture). Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ($V_{AK} < 0$) à l'état bloqué. Elle n'est pas réversible en courant et ne supporte qu'un courant dans le sens anode-cathode positif à l'état passant ($i_{AK} > 0$).

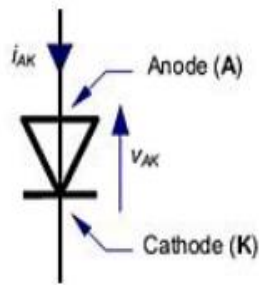


Figure II.5 : Diode de puissance.

II.4.1.2 Fonctionnement de la diode parfait

Le fonctionnement de la diode s'opère suivant deux modes Figure (II.6)

- diode passante (ou ON), tension $V_{AK} = 0$ pour $i_{AK} > 0$
- diode bloquée (ou OFF), tension $i_{AK} = 0$ pour $V_{AK} < 0$

On dit aussi que la diode a une caractéristique à deux segments.

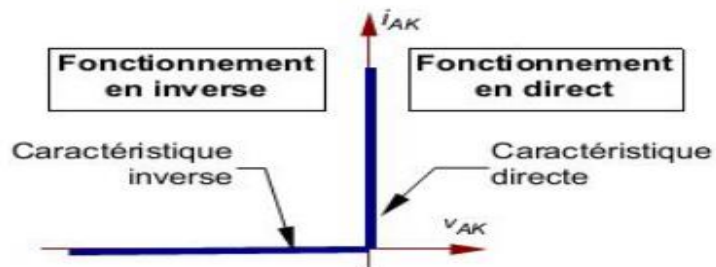


Figure II.6: Fonctionnement de la diode parfait.

II.5 Interrupteurs de puissance commandables

À l'opposé de la diode, dont toutes les commutations sont spontanées l'électronique de puissance dispose d'une gamme de composants, qui sont commandable à l'amorçage ainsi qu'au blocage. Ce sont des interrupteurs à deux segments [13].

Parmi c'est interrupteurs nous citons de:

- Transistor bipolaire.
- MOSFET.
- IGBT.
- GTO.
- Thyristor.

II.5.1 Le thyristor

II.5.1.1 Présentation

Actuellement, les thyristors sont principalement utilisés dans les applications forte puissance. Les limites courant/tension que peuvent tenir les thyristors les plus performants atteignent aujourd'hui environ 4 kV et 3 kA. Bien entendu, de façon à dépasser ces limites, il est possible de grouper en série ou en parallèle ces composants. Les principaux domaines d'application sont le contrôle en vitesse des machines DC, les chargeurs de batterie ainsi que les liaisons à courant continu de forte puissance (HVDC) [14].

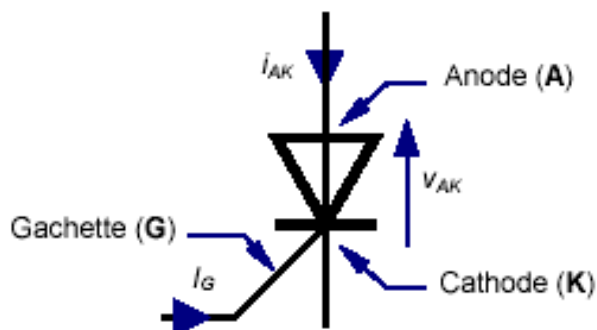


Figure II.7 : thyristor de puissance

II.5.1.2 Caractéristique statique

La figure (II.8) représente la caractéristique statique d'un thyristor. L'amorçage du composant se fait à tension positive et commande adéquate sur la gâchette. Plus la tension aux bornes du thyristor sera positive au moment de l'amorçage, moins le courant de gâchette devra être élevé pour amorcer dans de bonnes conditions le thyristor. La tension aux bornes d'un thyristor est donc négative ou positive. Une fois le thyristor amorcé, il ne se bloquera que par annulation du courant le traversant. Le blocage est donc spontané, de la même façon que pour une diode. Le courant minimum pour que le thyristor reste passant est appelé courant de maintien (Latching current : I_L).

L'intérêt des thyristors réside donc dans le fait qu'il est possible de fixer l'instant d'amorçage du composant (à l'inverse d'une diode). Il est donc possible d'agir sur les formes d'ondes en sortie du convertisseur AC/DC et donc de fixer la valeur moyenne de la tension de sortie.

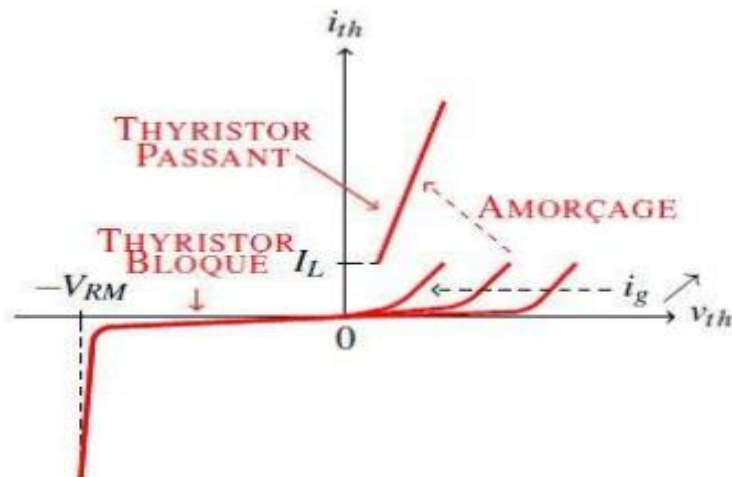


Figure II.8 : Caractéristique d'un thyristor [14]

II.6 Montages redresseurs

II.6.1 Introduction

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui permettent la conversion de l'alternatif en continu (AC/DC). Ils sont alimentés par une source de tension alternative et fournissent un courant continu à un récepteur connecté à leur sortie.

Le classement des redresseurs dépend de plusieurs facteurs, notamment la nature de la source génératrice (monophasée ou triphasée), le type de redresseur (non commandé à diodes ou commandé à thyristors) et la commande des thyristors (angle de retard à l'amorçage par rapport à la commutation naturelle des diodes).

II.6.2 Types des montages redresseurs

II.6.2.1 Redresseurs non commandé « Redresseurs tout diodes »

La tension de sortie du montage redresseur non commandés ne dépend que de la structure du convertisseur et des tensions d'entrée. Ils ne sont pas réversibles et l'échange de puissance se fait dans le sens alternatif-continu.

II.6.2.2 Redresseurs commandé « Redresseurs tout thyristors »

La tension de sortie du montage redresseur commandés dépend d'un paramètre supplémentaire, qui est l'angle de retard à l'amorçage. Ils sont réversibles et peuvent fonctionner comme des onduleurs non autonomes lors de l'échange de puissance dans le sens continu-alternatif.

II.7 Redressement non commandé

II.7.1 Redressement non commandé simple alternance

L'opération de redressement consiste à éliminer la partie négative ou positive (au choix) d'une tension alternative. Le redressement simple ou mono alternance consiste juste en l'élimination de la partie non désirée de la tension par l'utilisation d'une diode en série avec chaque tension (en réalité le redressement consiste de façon absolue à rendre le courant de sortie du circuit unidirectionnel). Cette opération peut être menée à partir d'une tension monophasée, ou bien d'un système diphasé ou triphasé. [11].

II.7.1.1 Redresseur non commandé monophasé simple alternance P1

C'est le cas le plus simple à examiner, mais aussi le moins avantageux. En conséquence, son étude n'est souvent qu'un prétexte à la compréhension des mécanismes de base.

- Le schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (II.9).
- La tension $V_e(t)$ est imposée telle que :

$$V_e(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.1})$$

avec $\omega = 2\pi f$

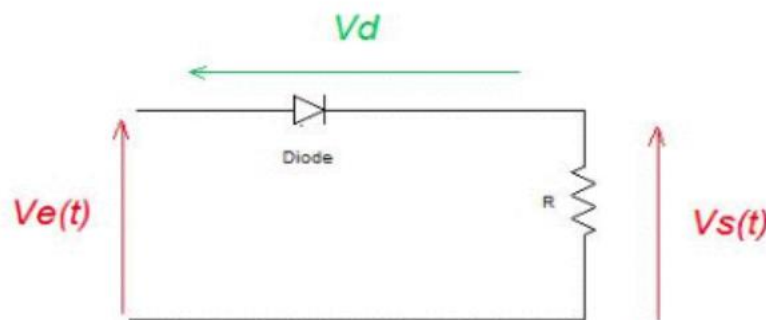


Figure II.9 : Redresseur P1 non commandé.

II.7.1.2 Redresseur non commandé triphasé simple alternance P3

La version triphasée du redressement précédent est très simple à envisager, puisqu'elle consiste juste à interposer une diode en série avec chaque phase d'un système triphasé.

- Le schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (II.10).
- Les tensions $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$, sont imposées telle que :

$$\begin{cases} V_1(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) & (\text{II.2}) \\ V_2(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) & (\text{II.3}) \\ V_3(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) & (\text{II.4}) \end{cases}$$

Avec $\omega = 2\pi f$.

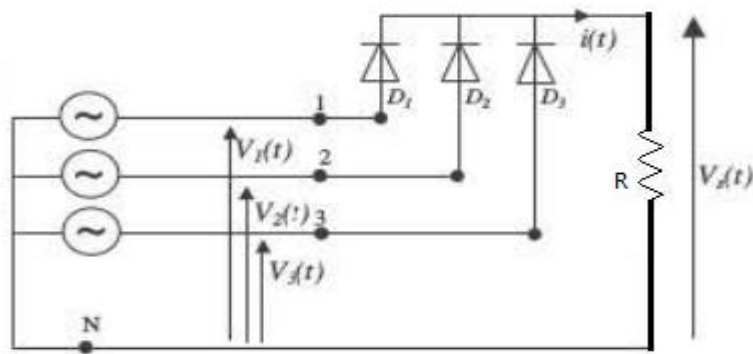


Figure II.10 : Redresseur P3 non commandé

II.7.2 Redressement non commandé double alternance

Dans ce cas, l'opération de redressement consiste à reporter les parties négatives ou positives (au choix) des tensions d'entrée en valeurs positives. Ceci n'est possible que par des associations de deux diodes par phase, ce qui est caractéristique des structures dites « double ». On parle, ainsi, souvent de pont redresseur double ou encore PD2 en monophasé et PD3 en triphasé [2].

II.7.2.1 Redresseur non commandé monophasé double alternance PD2

Ce style de pont, également appelé (pont de Grez) est la structure incontournable extrêmement classique du redressement monophasé.

- Le schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (II.10).
- La tension $V_e(t)$ est imposée telle que :

$$V_e(t) = V_m \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{II.5})$$

Avec $\omega = 2\pi f$.

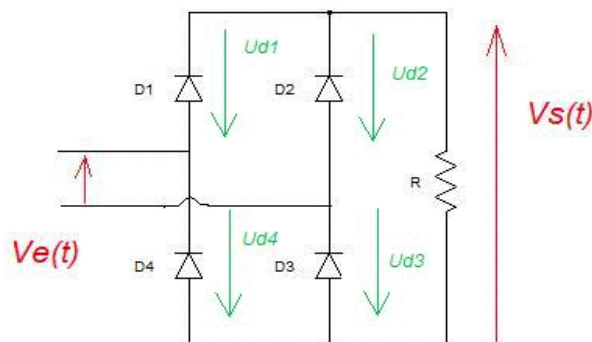


Figure II.11 : Redresseur PD2 non commandé

II.7.2.2 Redresseur non commandé triphasé double alternance PD3

Ce type de pont, également incontournable et extrêmement classique dans le redressement triphasé, est la structure la plus avantageuse, car elle présente une tension de sortie dont les

ondulations naturelles sont à la fois très faible et de fréquence assez importante, ce qui est intéressant dans une option de filtrage

- Le schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (I.11)..
- Les tensions $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$, sont imposées telle que :

$$\begin{cases} V_1(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) & \text{(II.6)} \\ V_2(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) & \text{(II.7)} \\ V_3(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) & \text{(II.8)} \end{cases}$$

Avec $\omega = 2\pi f$.

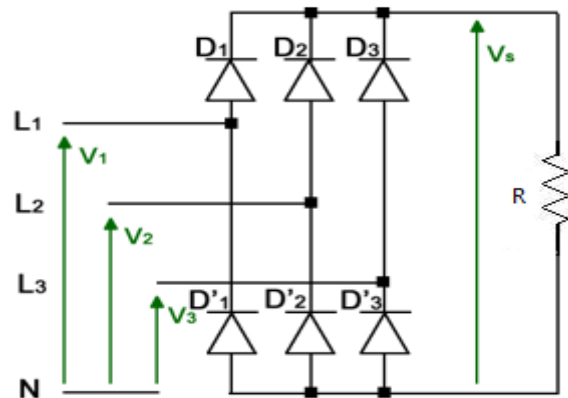


Figure II.12 : Redresseur PD3 non commandé.

II.8 Redressement commandé

II.8 .1 Redressement commandé simple alternance

Le redressement commandé simple, consiste toujours en l'élimination de la partie non désirée par l'utilisation d'un thyristor en série avec chaque source de tension. L'angle de retard à l'amorçage permet dans ce contexte d'opérer une variation de la tension moyenne en sortie. Cette opération peut être menée à partir d'une tension monophasée, ou bien d'un système diphasé ou triphasé [2].

II.8 .1.1 Redresseur commandé monophasé simple alternance P1

Le cas le plus simple à examiner et souvent le prétexte, comme ici, pour comprendre les mécanismes mis en jeu dans les thyristors.

- Le schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (II.12).
- La tension $V_e(t)$ est imposée telle que :

$$V_e(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad \text{(II.9)}$$

avec $\omega = 2\pi f$.

- θ_0 est l'angle de retard à l'amorçage imposé par la commande.

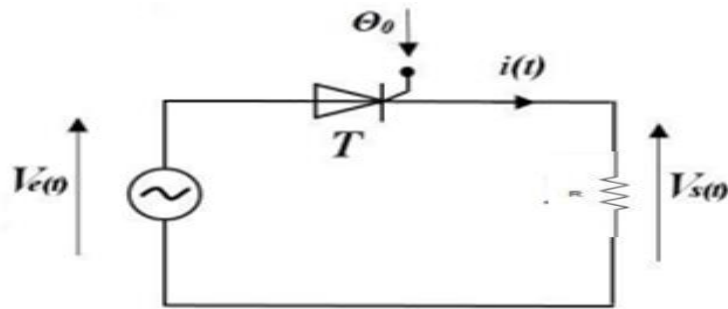


Figure II.13 : Redresseur P1 commandé.

II.8 .1.2 Redresseur commandé triphasé simple alternance P3

La version commandée du redresseur P3 revient également à remplacer chaque diode par un thyristor. Elle est très simple à envisager puisqu'elle consiste juste à interposer un thyristor en série avec chaque phase d'un système triphasé.

- Le schéma électrique correspondant est représenté sur la figure (II.13).
- θ_0 est l'angle de retard à l'amorçage imposé par la commande.
- Les tensions $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$, sont imposées telle que :

$$V_1(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \quad (II.10)$$

$$V_2(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (II.11)$$

$$V_3(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (II.12)$$

Avec $\omega = 2\pi f$

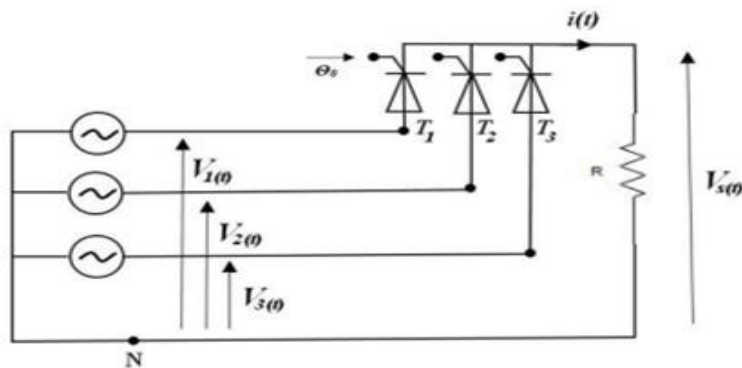


Figure II.14 : Redresseur P3 commandé

II.8 .2 Redressement commandé double alternance

Avec le même travail que dans le cas des redresseurs simples, Diodes à double structure par thyristors

II.8 .2 .1 Redresseur commandé monophasé double alternance PD2

Ce style de pont, également appelé (pont de Graetz) est la structure incontournable extrêmement classique du redressement monophasé.

- Le schéma électrique correspondent est représenté sur la figure (II.14).
- θ_0 est l'angle de retard à l'amorçage imposé par la commande.
- Les thyristors T1 et T4 sont commandés simultanément. Les transistors T2 et T3 sont aussi commandés simultanément mais avec un décalage de π .
- La tension $V_e(t)$ est imposée telle que :

$$V_e(t) = V. \sqrt{2}. \sin(\omega t) \quad (\text{II.13})$$

Avec $\omega = 2\pi f$.

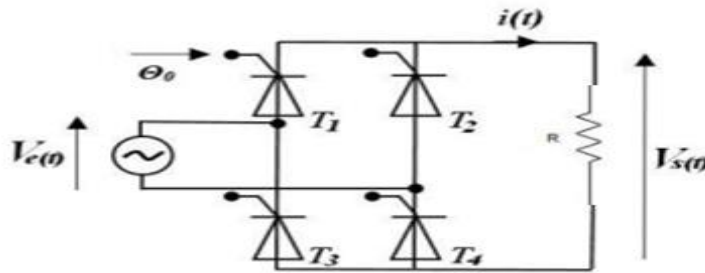


Figure II.15 : Redresseur PD2 commandé

II.8 .2 .2 Redresseur commandé triphasé double alternance PD3

La structure (tout thyristor) du pont triphasé PD3 en pont est extrêmement classique dans le redressement triphasé.

- Le schéma électrique correspondent est représenté sur la figure (II.15).
- θ_0 est l'angle de retard à l'amorçage imposé par la commande.
- Les tensions $V_1(t)$, $V_2(t)$, $V_3(t)$, sont imposées telle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_1(t) = V. \sqrt{2}. \sin(\omega t) \quad (\text{II.14}) \\ V_2(t) = V. \sqrt{2}. \sin(\omega t - 2\pi/3) \quad (\text{II.15}) \\ V_3(t) = V. \sqrt{2}. \sin(\omega t + 2\pi/3) \quad (\text{II.16}) \end{array} \right.$$

Avec $\omega = 2\pi f$.

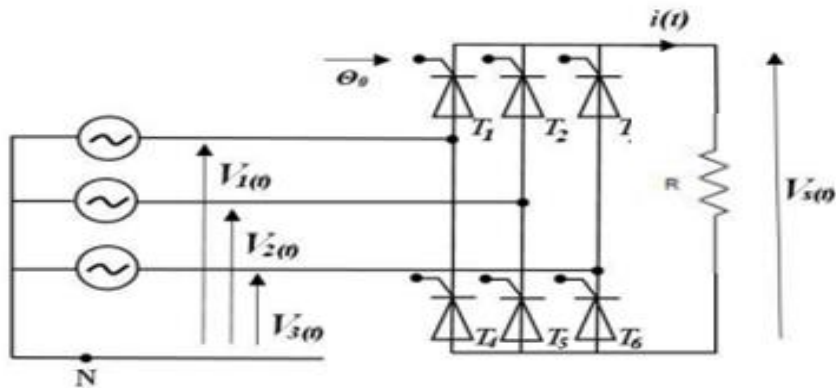


Figure II.16 : Redresseur PD3 commandé

II.9 Autres types de redresseur de montage redresseur

Il existe d'autres types de redresseur tels que :

- ✚ Redresseur avec diode de roue libre (monophasé ou triphasé)
- ✚ Redresseur mixte (monophasé ou triphasé)
- ✚ Redresseur triphasé série (à thyristors ou à diodes)
- ✚ Redresseur à MLI.

II.10 Applications des redresseurs

Les redresseurs sont utilisés dans de nombreux appareils et systèmes électriques. Voici quelques exemples d'appareils utilisant des redresseurs :

- ✚ Ordinateurs.
- ✚ Téléviseurs.
- ✚ Chargeurs de batterie.
- ✚ Variateurs de vitesse des machines électriques.
- ✚ Domaine des énergies renouvelables.
- ✚ Véhicule électrique.

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les diverses structures de convertisseurs AC-DC. Les convertisseurs de type PD3 offrent des formes d'ondes de tension et de courant nettement meilleures que celles des convertisseurs de type PD2. Étant donné leur utilisation fréquente, le prochain chapitre sera consacré à l'étude des perturbations électromagnétiques haute fréquence générées par ces

Chapitre III

Etude et simulation des perturbations EM générées par les ponts redresseurs

III.1 Introduction

Les équipements électriques comportent des composants de puissance à commutation qui produisent et émettent des perturbations électromagnétiques (EM) hautes fréquences (HF). Ces dernières interfèrent avec la réception des signaux utiles, et peuvent causer des défauts de fonctionnement des systèmes et des équipements voisins. Suivant les lois de commande, les tensions et les courants au sein des dispositifs d'électronique de puissance disposent d'un spectre riche en harmoniques, avec lequel les composantes hautes fréquences se couplent aisément par la moindre capacité parasite, ou la moindre inductance mutuelle entre deux portions du circuit, produisant ainsi de fortes perturbations électromagnétiques en mode différentiel et en mode commun. Ces perturbations sont observées sur la gamme de fréquences de [9kHz-30MHz].

Afin d'étudier les perturbations (HF) générées par un pont redresseur, nous allons présenter dans cette partie les deux principaux modes de propagation pour l'interférence électromagnétique (IEM) à savoir: le mode différentiel (MD) et le mode commun (MC). À ce stade, il est nécessaire de déterminer quelles sont les grandeurs électriques qui caractérisent le fonctionnement du pont. Sachant que les perturbations sont mesurées grâce au réseau stabilisateur d'impédance (RSIL), deux grandeurs possèdent l'ensemble des informations concernant le convertisseur et la charge: il s'agit du courant de ligne et de la tension d'entrée aux bornes du pont.

L'étude des perturbations EM HF générées par les ponts redresseurs monophasés et triphasés est effectuée à travers des simulations basées sur la méthode indirecte (simulations temporelles suivies d'analyses fréquentielles). Aussi, nous présentons une étude de mise en évidence des effets perturbateurs engendrés par ces ponts. L'étude s'appuie sur le tracé des formes d'ondes des grandeurs d'entrée des ponts redresseurs (tension et courant). Quatre simulations différentes sont effectuées séparément à savoir :

- La simulation d'un pont redresseur monophasé non commandé.
- La simulation d'un pont redresseur monophasé commandé.
- La simulation d'un pont redresseur triphasé non commandé.
- La simulation d'un pont redresseur triphasé commandé (tout thyristors et mixte).

A noter enfin que les simulations et le traitement de la perturbation est réalisé grâce au logiciel PSPICE.

III.2 Hypothèses liées aux dispositifs étudiés

Les modèles habituellement utilisés en électronique de puissance s'appuient sur les composants passifs et actifs basés sur des modèles basses fréquences c'est-à-dire ne prenant pas en compte les éléments parasites (résistance, inductance et capacité). Cependant, à haute fréquence, ces modèles ne sont plus valables car les composants parasites conditionnent le comportement physique des composants passifs et actifs.

Dans ce travail, nous abordons la modélisation des perturbations EM conduites hautes fréquences. Pour simplifier cette tâche nous considérons les hypothèses suivantes :

- Les redresseurs 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 Considérations théoriques

Un cas simple de perturbation conduite émise par un convertisseur est présenté à la figure III.1. Dans cette figure V_N représente la tension perturbatrice du convertisseur. Z_1 et Z_2 représentent les impédances des chemins de propagation de bruit, Z_{c1} est l'impédance entre le dispositif et la terre. Les résistances R_{c1} et R_{c2} représentent la charge du bruit. Ce sont des résistances normalisées (50Ω) aux bornes desquelles on effectuera la mesure des tensions parasites créés au niveau de la victime. La méthode des mailles est bien adaptée pour mettre en équation les courants perturbateurs traversant les lignes de puissance et la terre, ces derniers sont donnés par les équations suivantes [15, 16, ..., 21]:

$$i_1 = -I_{MC} + I_{MD} \quad (III.1)$$

$$i_2 = -I_{MC} - I_{MD} \quad (III.2)$$

$$i_G = 2I_{MC} \quad (III.3)$$

Sachant que les normes liées aux interférences EM indiquent les limites de tension du bruit sur une résistance de 50Ω , on peut établir donc les équations suivantes pour les deux tensions V_1 et V_2 aux bornes des deux résistances R_{c1} et R_{c2} :

$$V_1 = R_c(-I_{MC} + I_{MD}) \quad (III.4)$$

$$V_2 = R_c(-I_{MC} - I_{MD}) \quad (III.5)$$

Avec : $R_{c1} = R_{c2} = R_c$

Les expressions mathématiques des chutes de tension aux bornes de la résistance R_c dues au courant de mode différentiel (MD) et au courant de mode commun (MC) sont représentées par les relations suivantes :

$$U_{MC} = -R_c I_{MC} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (III.6)$$

$$U_{MD} = R_c I_{MD} = \frac{V_1 - V_2}{2} \quad (III.7)$$

Les tensions V_1, V_2 et U_{MC}, U_{MD} sont liées par les équations suivantes:

$$V_1 = U_{MC} + U_{MD} \quad (III.8)$$

$$V_2 = U_{MC} - U_{MD} \quad (III.9)$$

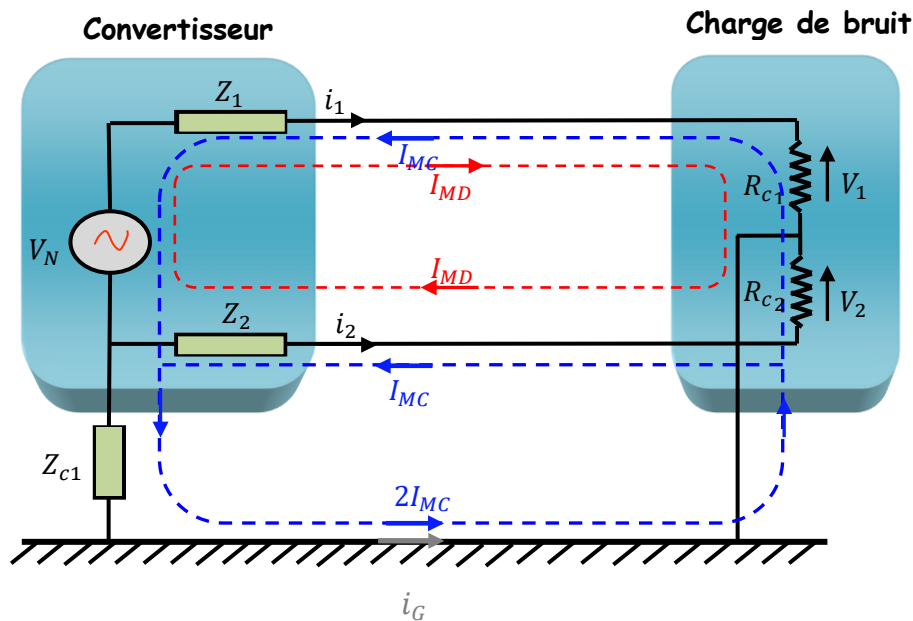


Figure III.1: Pollution en mode différentiel et en mode commun

III.3.2 Pont redresseur monophasé non commandé

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation, correspondant à un pont redresseur monophasé à base de diodes, en vue de mettre en évidence les perturbations EM générées par ce pont et transmises au réseau électrique. Les diodes utilisées sont de référence BYT12P-600.

Le modèle utilisé comprend un RSIL monophasé spécifié par la norme FCC (figure III.1, annexe III), les composants actifs utilisés sont des diodes parfaites. Les pistes sont représentées par des résistances et inductances parasites : R_{p1}, L_{p1}, R_{p2} et L_{p2} . Les couplages parasites entre les radiateurs (dissipateurs thermiques) des semi-conducteurs de puissance et le plan de masse sont représentés par les capacités parasites C_{p1} . Les couplages entre les pistes et le plan de masse sont représentés par les capacités parasites C_{p2} comme indiqué sur la figure III.2. Les données de simulations utilisées sont consignées dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Données de simulations utilisées

U_{Res} (V)	f (Hz)	R_{Res} (Ω)	L_{Res} (μH)	R_{Ch} (Ω)	C_{Ch} (μF)
220	50	0.4	500	50	900
L_{p1} (nH)	L_{p2} (nH)	R_{p1} (m Ω)	R_{p2} (m Ω)	C_{p1} (pF)	C_{p2} (pF)
450	360	1.35	1.10	100	20

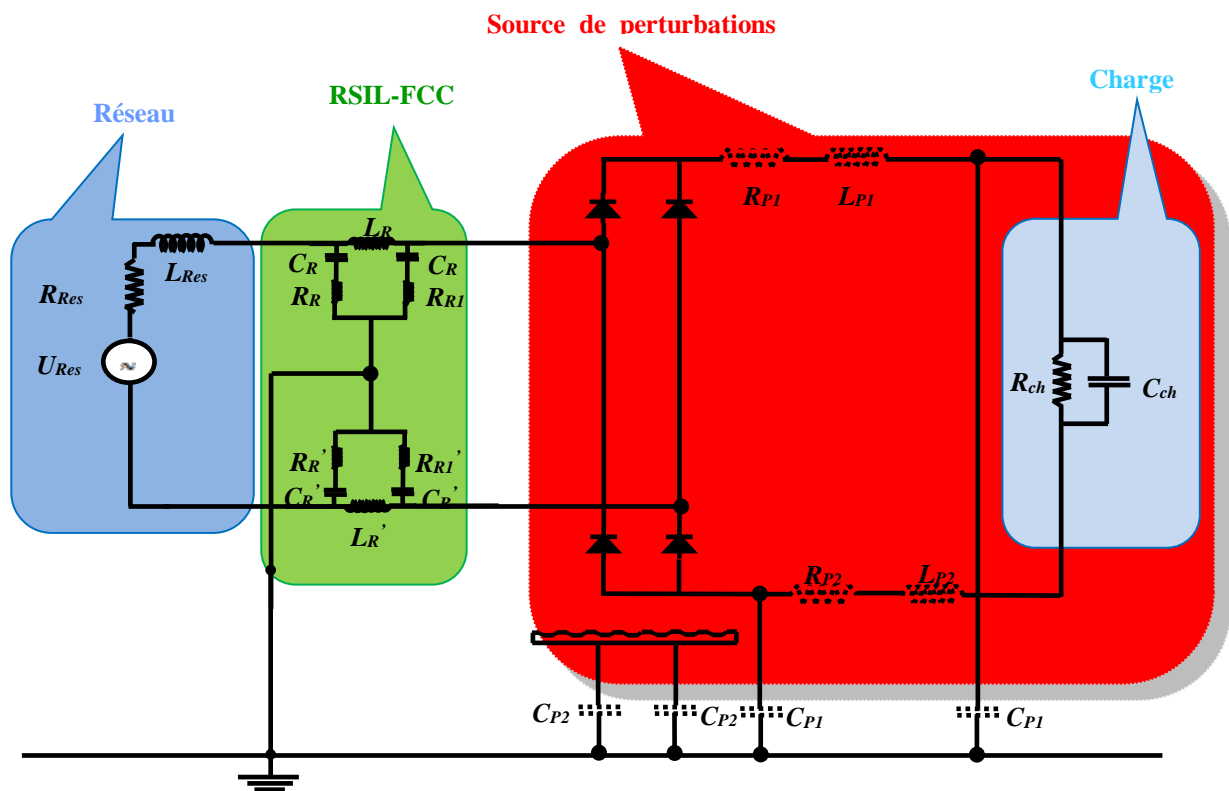


Figure III.2: Schéma électrique du pont redresseur non commandé monophasé – Modèle hautes fréquences

Présentation et analyse des résultats obtenus

Les figures III.3 et III.4 illustrent les variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé ainsi que celles du courant de ligne. La figure III.5 montre les variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure au niveau du RSIL qui représente l'image des perturbations EM totales engendrées par le pont redresseur. Dans la figure III.6 nous avons tracé le spectre fréquentiel des perturbations totales ainsi que le gabarit des spécifications de la norme *FCC (Title 47, Part 15)*.

L'analyse des courbes présentées dans les figures III.3, III.4 et III.5 montre la présence d'une distorsion des formes d'onde de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne. Nous constatons également l'apparition d'un phénomène oscillatoire de fréquence et d'amplitude importantes au blocage des diodes. Ce phénomène est dû à la coupure brutale du courant, imposée par la commutation des diodes.

Par ailleurs, le phénomène oscillatoire observé sur la forme d'onde de la tension et du courant d'entrée du pont se retrouve sur la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL.

L'analyse du spectre fréquentiel des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL, montre clairement que le niveau des perturbations ne dépasse pas celui du gabarit imposé par la norme **FCC classe A**, ce qui est tout à fait acceptable et ne nécessite donc pas de mesures de réduction des perturbations.

En revanche, il dépasse celui du gabarit imposé par la norme **FCC classe B** dans l'intervalle allant de 9 kHz à 100 kHz , ce qui nous oblige à prévoir des mesures de réduction dans cette plage de fréquence pour les appareils domestiques et médicaux appartenant à cette classe.

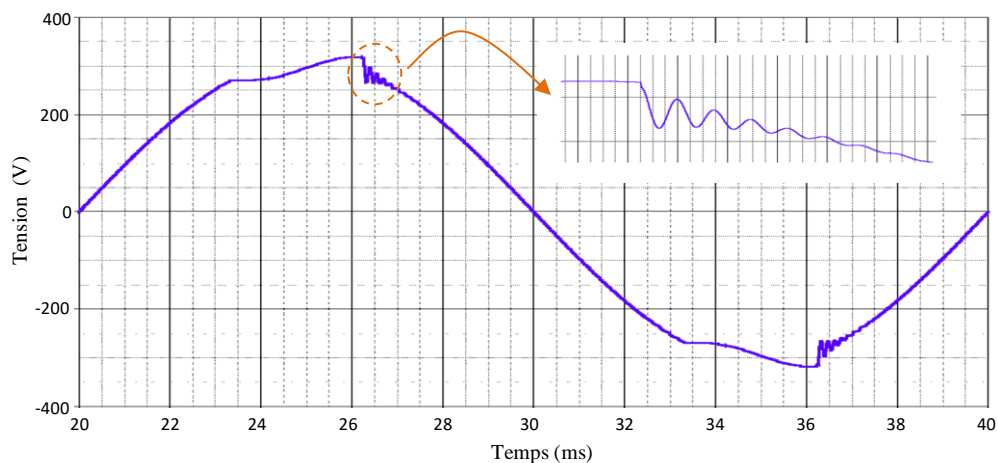


Figure III.3: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé à diodes

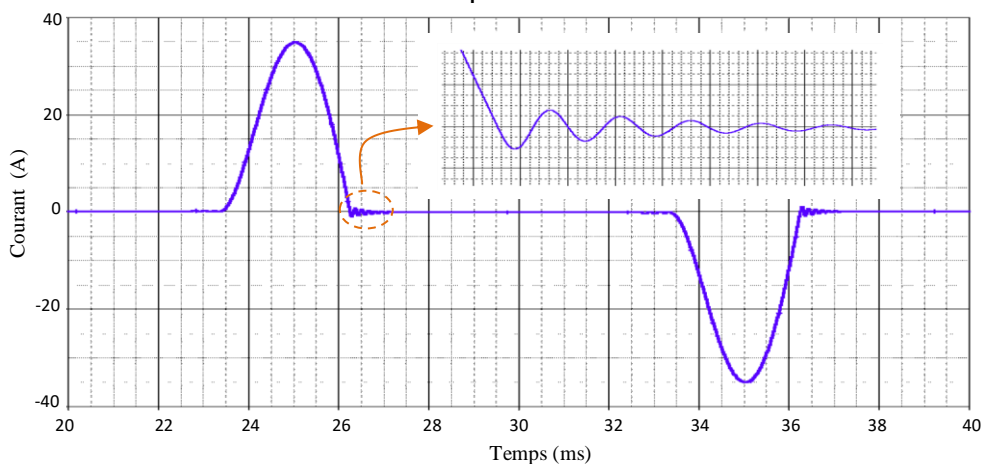


Figure III.4: Variations temporelles du courant de ligne

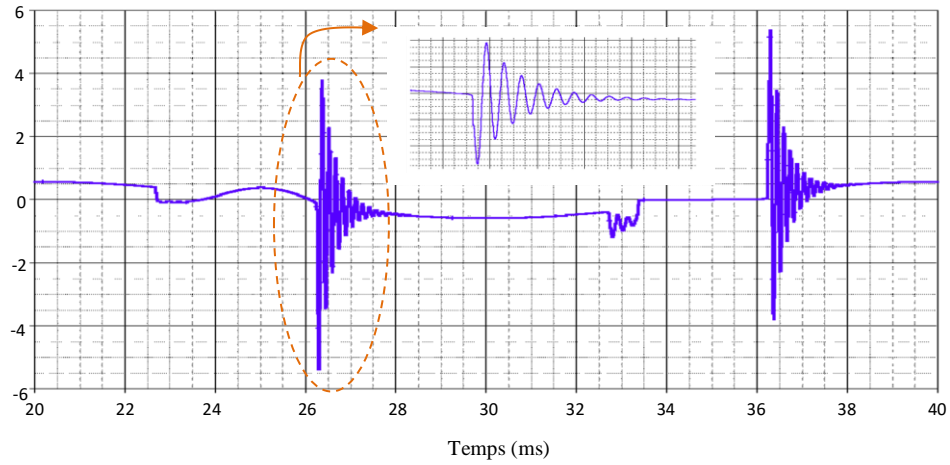


Figure III.5: Tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL

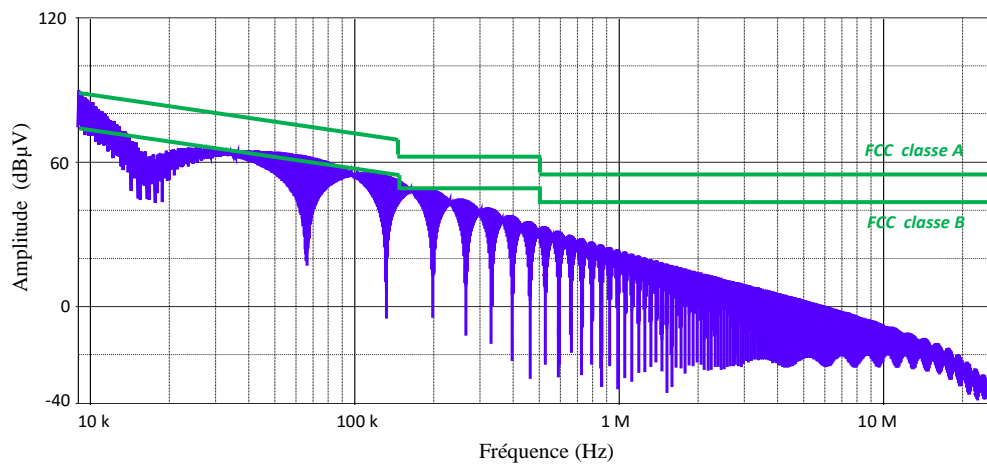


Figure III.6: Spectre des perturbations totales localisées sur le RSIL

III.3.2.1 Influence de certains paramètres sur le comportement CEM du réseau

Dans cette section nous allons étudier l'influence de la variation des paramètres de la charge et de l'inductance du réseau électrique, sur le comportement CEM de ce dernier. Les valeurs des paramètres variés sont consignées dans le tableau III.2.

Tableau III.2: Valeurs des paramètres de simulation utilisés

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

Présentation et analyse des résultats obtenus

La simulation a consisté en la variation de manière séparée des paramètres de la charge (résistance, capacité) ainsi que la variation de l'inductance du réseau électrique et la visualisation des formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur, du courant de ligne et de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL. Ainsi dans les figures III.7, III.8, III.11, III.12, III.15 et III.16 nous présentons respectivement les formes d'ondes obtenues de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne alors que dans les figures III.9, III.10, III.13, III.14, III.17 et III.18, nous présentons les allures temporelle de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL suivi des analyses spectrales de Fourier correspondantes.

Analyse des résultats concernant la variation de la résistance de charge

L'analyse des résultats obtenus montrent que l'augmentation de cette résistance entraîne une augmentation de l'amplitude de la tension à l'entrée du pont dans l'intervalle de temps [22.55 ms – 26.25 ms] et une diminution de l'amplitude du courant de ligne (figures III.7 et III.8). Par ailleurs, on constate que les amplitudes du phénomène oscillatoire et le temps de conduction des diodes diminuent en fonction de l'augmentation de la résistance de charge (figures III.7 et III.8). Quant au phénomène oscillatoire observé sur la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL, son amplitude a diminué en fonction de l'augmentation de la résistance de charge. L'amplitude des fréquences du spectre des perturbations totales a aussi diminué en fonction de l'augmentation de la résistance de charge (figures III.10).

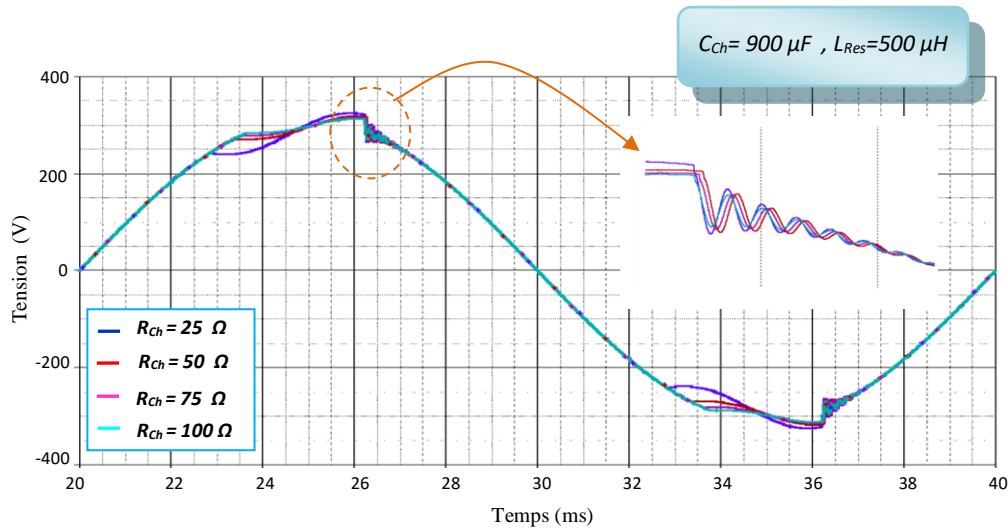


Figure III.7: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé pour différentes valeurs de R_{ch}

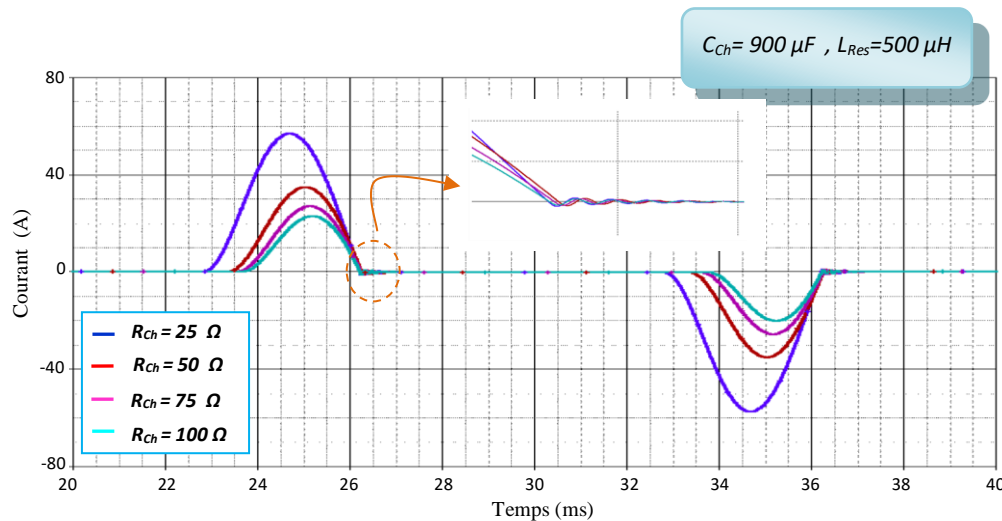


Figure III.8: Variations temporelles du courant de ligne pour différentes valeurs de R_{ch}

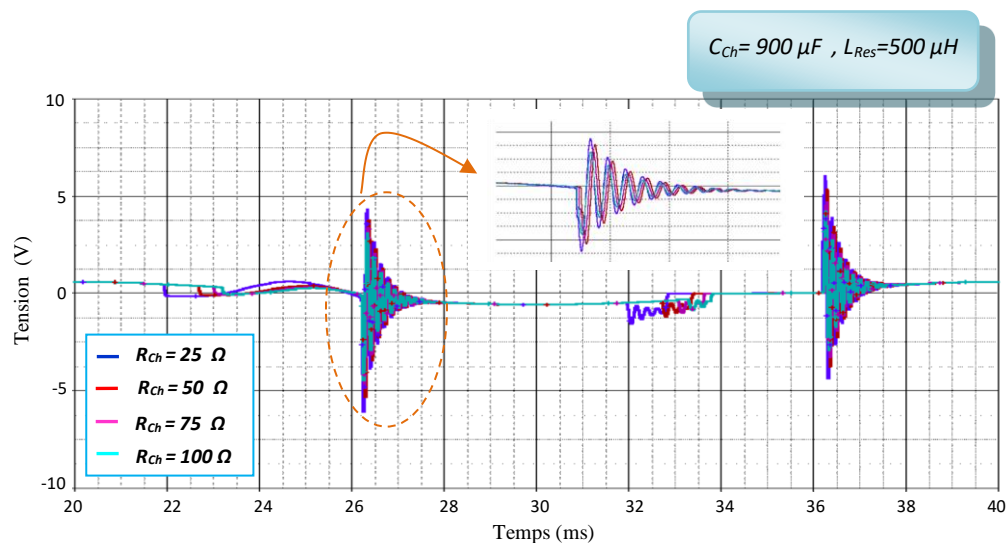


Figure III.9: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de R_{ch}

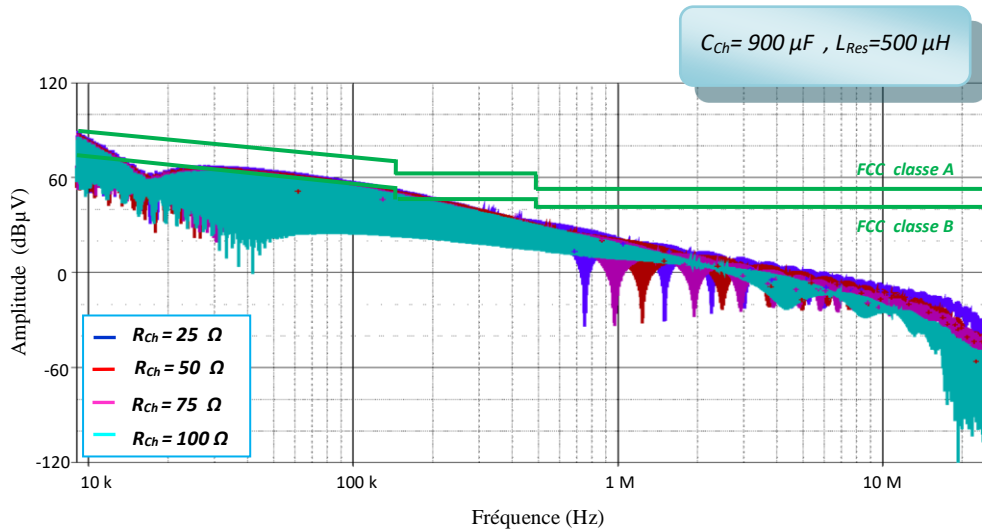


Figure III.10: Spectres des perturbations totales localisées sur le RSIL pour différentes valeurs de R_{ch}

Analyse des résultats concernant la variation de la capacité de charge :

L'augmentation de la capacité de charge entraîne une diminution de l'amplitude de la tension à l'entrée du pont ainsi que celle du courant de ligne avec une translation dans le temps du phénomène oscillatoire associé à ces deux grandeurs et une faible diminution de l'amplitude du phénomène oscillatoire. Ainsi, pour la tension aux bornes de la résistance du RSIL (perturbations totales) on constate que l'augmentation de la capacité de charge entraîne une légère augmentation de l'amplitude du phénomène oscillatoire. L'analyse spectrale des perturbations totales a permis de mettre en évidence l'effet lié à l'augmentation de la capacité à travers l'augmentation des amplitudes des fréquences du spectre. De plus, nous observons, pour la capacité valant $300 \mu F$, une déformation des formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé, du courant de ligne et de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL (figures III.11, III.12 et III.13). Le spectre de cette dernière, dans le cas de la capacité $300 \mu F$ est assez riche en fréquences dont les amplitudes sont plus faibles que celles obtenues dans le cas des autres capacités.

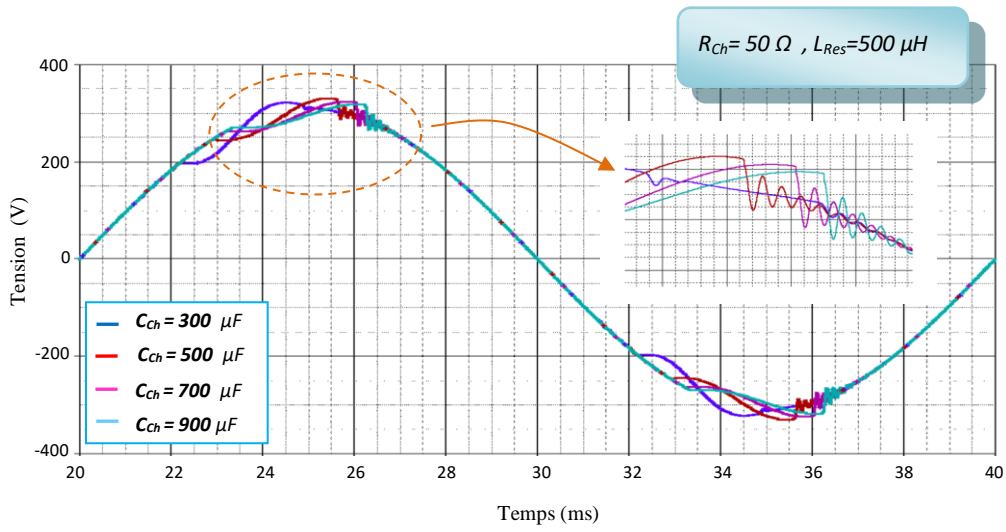


Figure III.11: Formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé pour différentes valeurs de C_{ch}

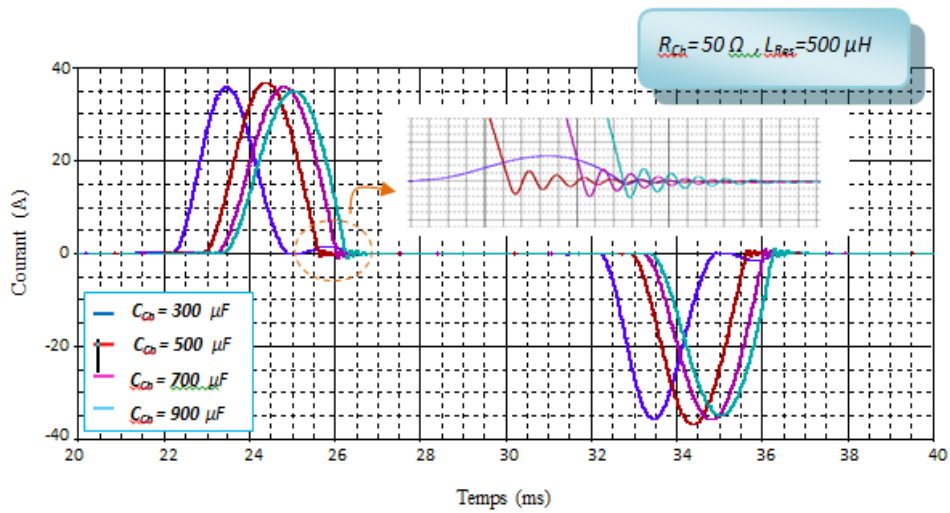


Figure III.12: Formes d'ondes du courant de ligne pour différentes valeurs de C_{ch}

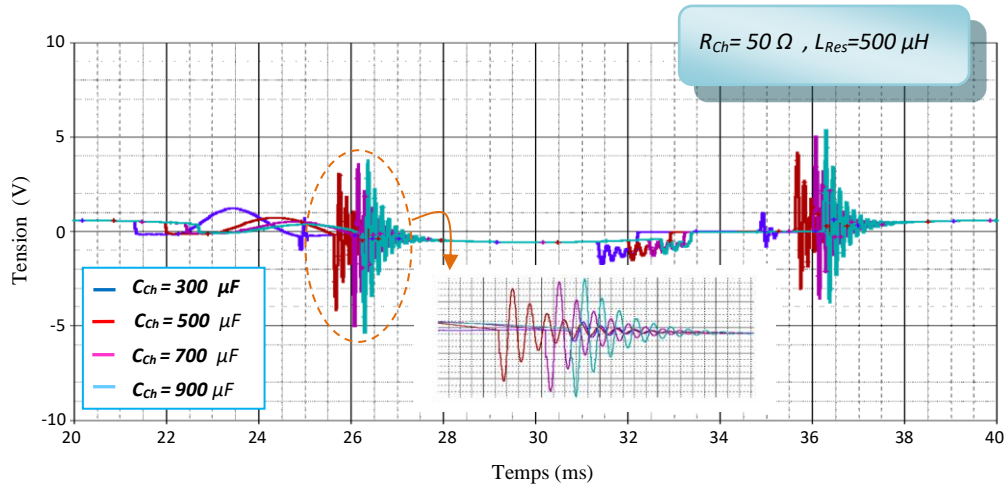


Figure III.13: Formes d'ondes de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de C_{ch}

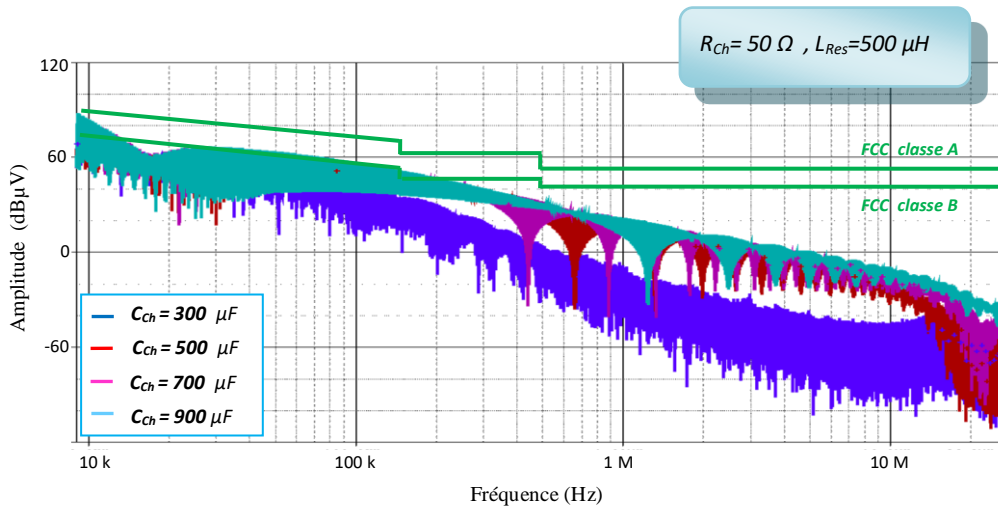


Figure III.14: Spectres des perturbations totales localisées sur le RSIL pour différentes valeurs de C_{ch}

Analyse des résultats concernant la variation de l'inductance du réseau électrique :

Enfin, l'augmentation du troisième paramètre à savoir l'inductance du réseau électrique a engendré une translation dans le temps du phénomène oscillatoire, observé sur les formes d'ondes tracées, et une augmentation de son amplitude ainsi que celle de la période de conduction des diodes (figures III.15, III.16 et III.17).

Nous pouvons ainsi constater que l'augmentation de cette inductance engendre une diminution de l'amplitude de courant et une augmentation des amplitudes du phénomène oscillatoire correspondant à la tension aux bornes de la résistance du RSIL. L'analyse des différents spectres obtenus, pour différentes valeurs d'inductance du réseau, correspondant à cette tension montre une réduction des amplitudes de ces spectres au fur et à mesure que l'inductance augmente pour des fréquences inférieures à 200kHz. Au-delà, de cette fréquence on constate une augmentation des amplitudes de ces spectres.

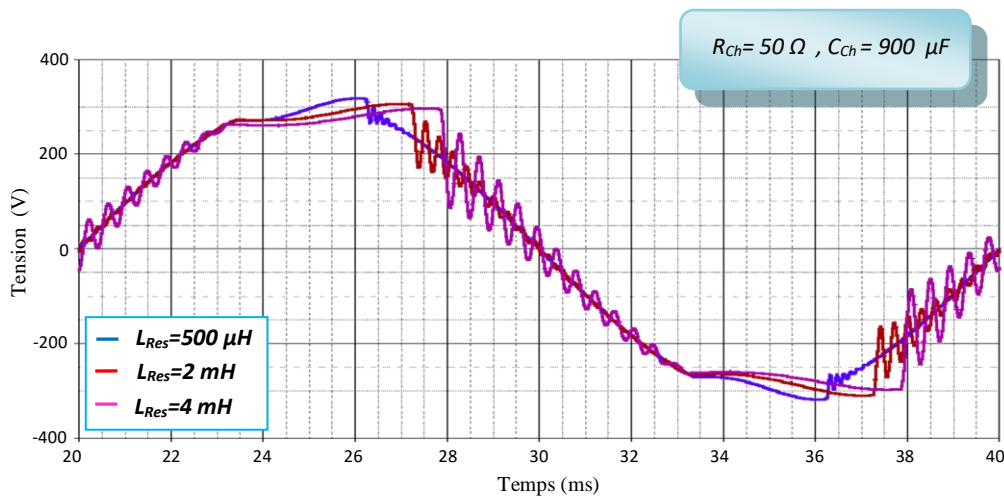


Figure III.15: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})

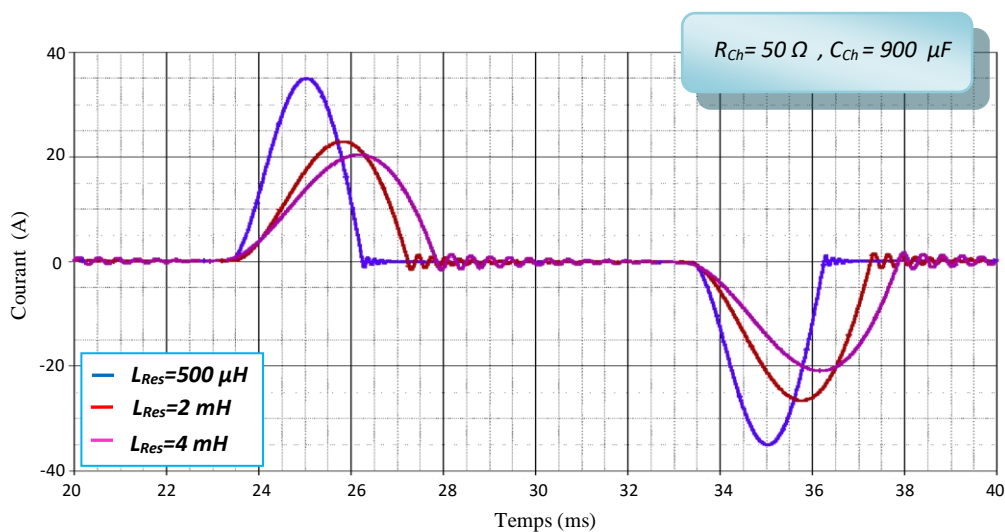


Figure III.16: Variations temporelles du courant de ligne pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})

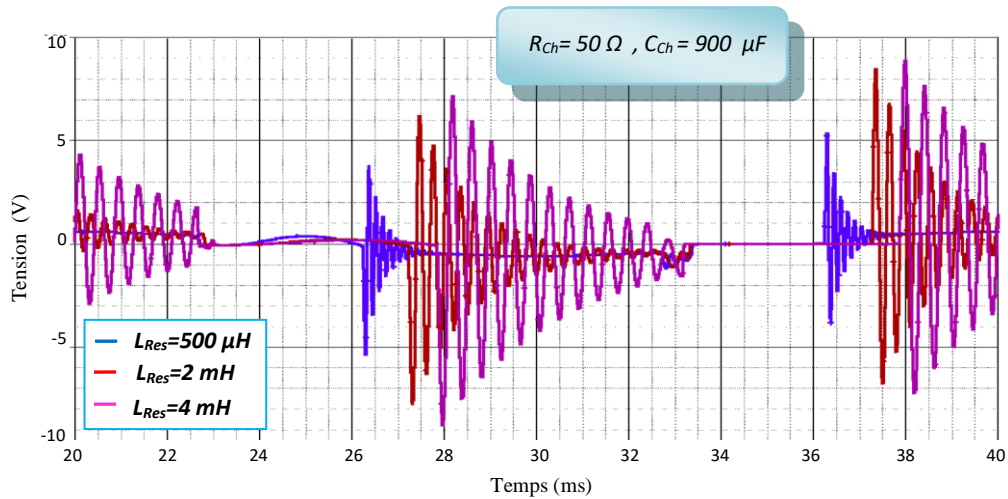


Figure III.17: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})

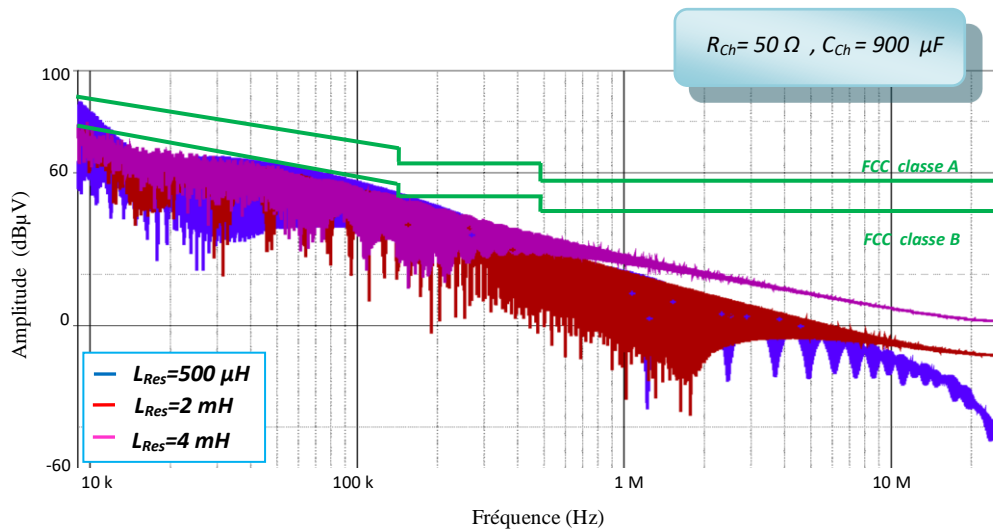


Figure III.18: Spectres des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL pour différentes valeurs de l'inductance du réseau électrique (L_{Res})

III.3.3 Pont redresseur monophasé commandé

Dans ce paragraphe, nous nous attachons à étudier les perturbations EM HF créées par un pont redresseur commandé sur le comportement du réseau électrique. De ce fait, pour évaluer le spectre des perturbations relatif au convertisseur en question nous avons simulé, sous PSPICE, le circuit représenté à la figure III.2 dans lequel nous avons remplacé les diodes par des thyristors de type 2N2219. Ainsi, nous avons 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

Aux figures III.19 et III.20 nous avons reporté les formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur commandé et du courant de ligne, sur lesquelles on peut facilement voir l'effet perturbateur du pont redresseur matérialisé par la distorsion de ces formes d'ondes à l'instant de l'amorçage des thyristors. L'effet perturbateur du pont redresseur (à base de thyristors) sur le réseau électrique peut être constaté sur les formes d'ondes des perturbations conduites totales canalisées vers la résistance équivalente de mesure du RSIL et sur leur spectre fréquentiel. Ainsi, nous avons représenté respectivement sur les figures III.21 et III.22, les variations temporelles des perturbations conduites totales canalisées vers la résistance équivalente de mesure du RSIL et le spectre en fréquence correspondant. L'analyse de ces variations temporelles montre une variation rapide de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL à l'instant d'amorçage des thyristors. Sur le plan fréquentiel, le spectre des perturbations totales obtenu n'est pas très riche en harmoniques. De plus, les niveaux des perturbations ne dépassent pas les limites imposées par la norme CEM *FCC* dans la zone 2. En revanche, dans la zone 1, on remarque que les amplitudes des harmoniques du spectre des perturbations dépassent les limites imposées par la norme *FCC* ce qui nécessite une action de protection adéquate que nous traiterons au chapitre suivant.

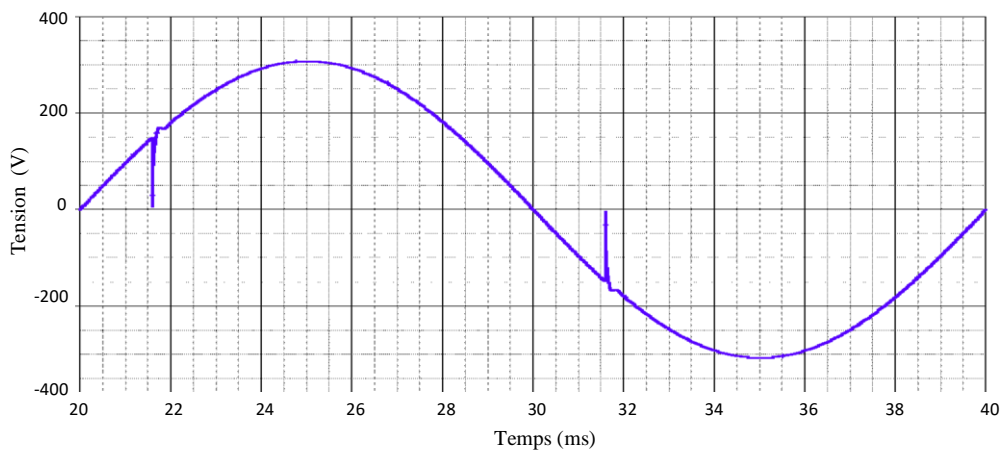


Figure III.19: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé

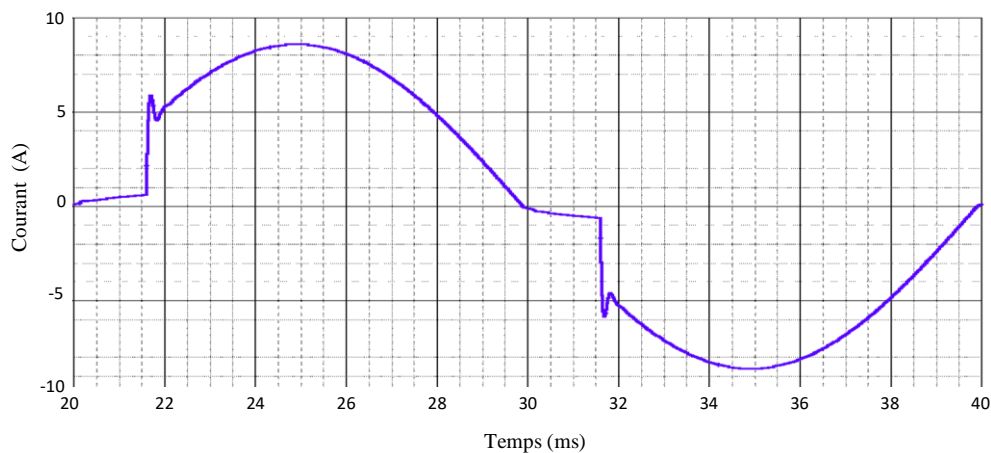


Figure III.20: Variations temporelles du courant de ligne relatives au pont redresseur monophasé commandé

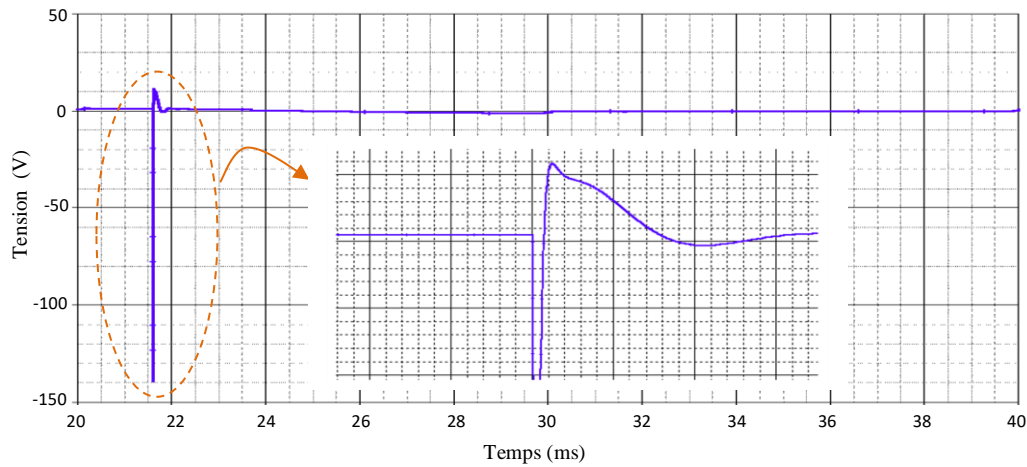


Figure III.21: Forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relative au pont redresseur monophasé commandé

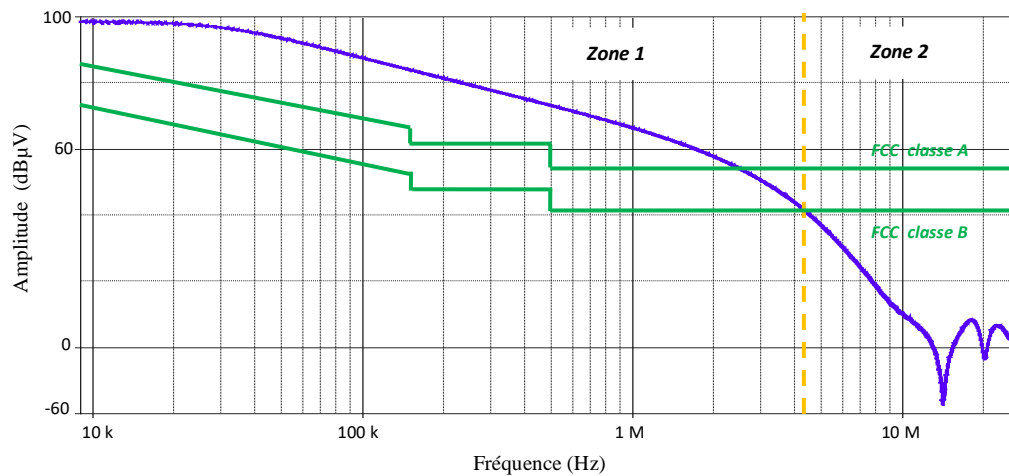


Figure III.22: Spectre des perturbations totales localisées sur le RSIL relatif au pont redresseur monophasé commandé

III.3.3.1 Influence de la variation d'angle d'amorçage des thyristors

Dans cette section, nous examinons l'influence de l'angle d'amorçage des thyristors sur le comportement CEM du réseau électrique. Ainsi, nous faisons varier cet angle en lui donnant les valeurs suivantes : $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 45^\circ$ et $\alpha = 60^\circ$. Nous avons tracé, pour chaque valeur de ce dernier, les formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur, celles du courant de ligne et la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL.

Présentation et analyse des résultats obtenus

Sur les figures III.23 et III.24 nous présentons les variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne pour différentes valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors. L'analyse de ces variations temporelles montre une distorsion de ces formes d'ondes. Cette distorsion est d'autant plus importante que l'angle d'amorçage est grand. Cette augmentation de l'angle d'amorçage, entraîne une croissance notable de l'amplitude du pic de courant de ligne au moment de l'amorçage des thyristors. Dans les figures III.25 et III.26, nous avons tracé respectivement les variations temporelles des perturbations conduites totales canalisées vers la résistance équivalente du RSIL et les spectres fréquentiels de ces variations temporelles pour différents angles d'amorçage. D'après ces figures, nous constatons que l'accroissement de cet angle entraîne une augmentation de l'amplitude des variations temporelles, à l'instant d'amorçage des thyristors, et une augmentation de l'amplitude des fréquences du spectre correspondant à ces variations temporelles avec réduction de leur nombre. D'autre part, on remarque aussi que les niveaux des perturbations ne dépassent pas les limites imposées par la norme *FCC* dans la zone 2. En revanche, dans la zone 1, on remarque que les amplitudes des harmoniques du spectre des perturbations dépassent les limites imposées par la norme *FCC* ce qui là aussi nécessite des mesures de réduction que nous aborderons dans le prochain chapitre.

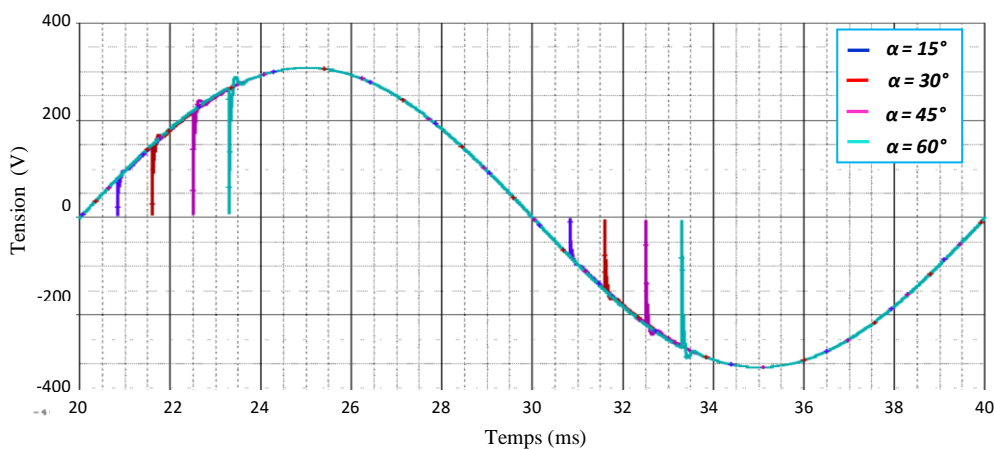


Figure III.23: Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé commandé, pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α)

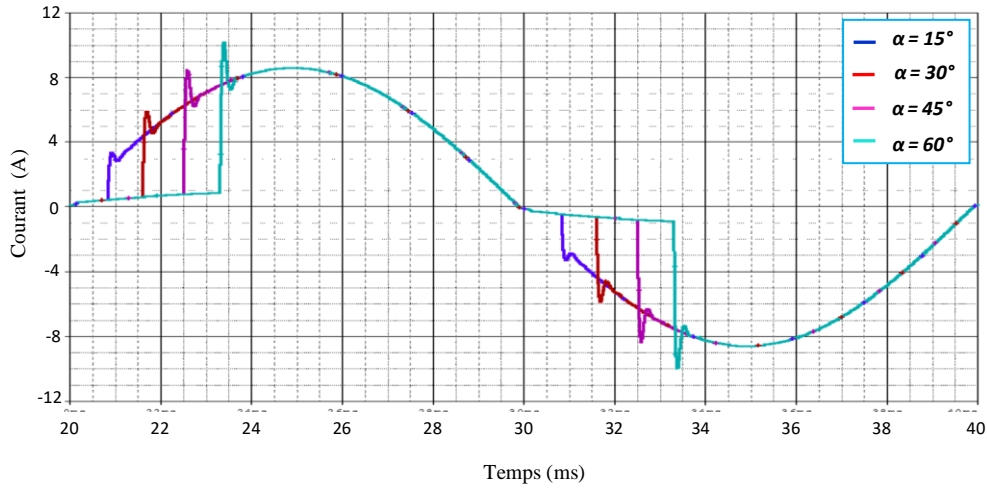


Figure III.24: Variations temporelles du courant de ligne du pont redresseur monophasé commandé, pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α)

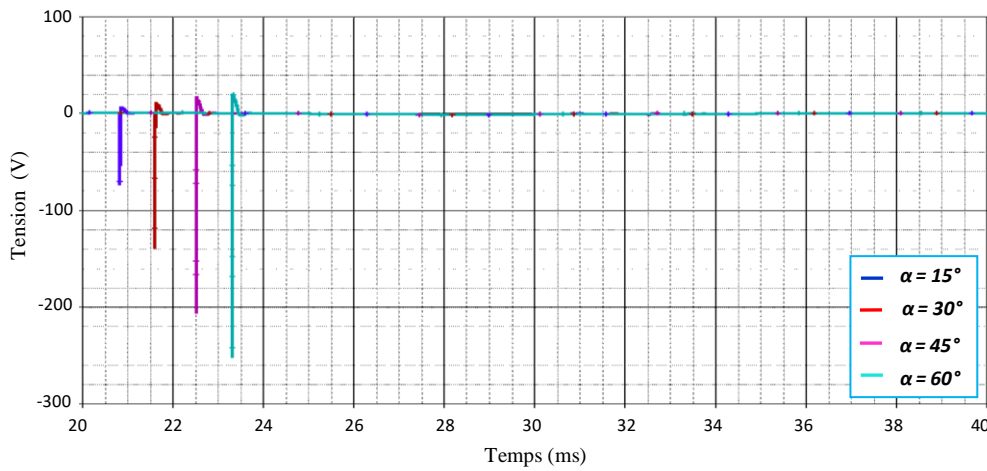


Figure III.25: Tensions aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relatives au pont redresseur monophasé commandé, pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α)

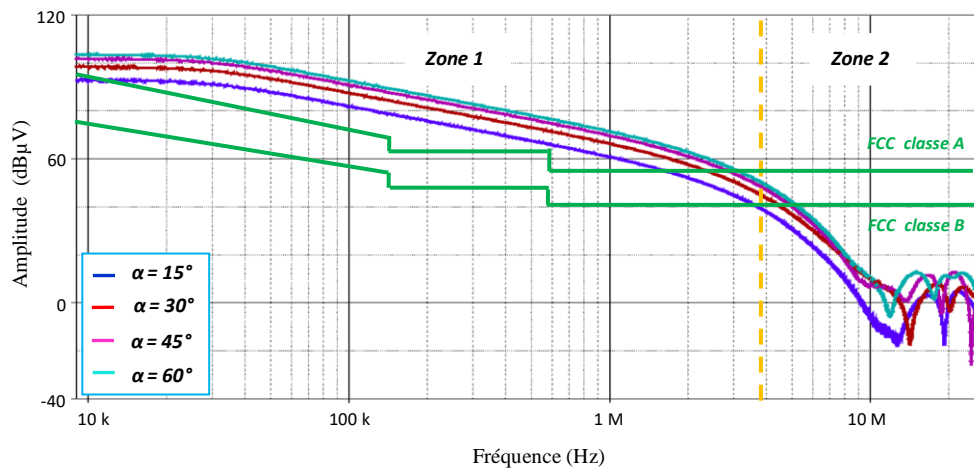


Figure III.26: Spectres des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL, relatifs au pont redresseur monophasé commandé pour plusieurs valeurs d'angle d'amorçage (α)

III.4 Simulation d'un pont redresseur triphasé

III.4.1 Considérations théoriques

A cause des contraintes de CEM, la mesure de l'émission de perturbations EM conduites, en régime triphasé, constitue un problème majeur à surmonter en vue du développement des dispositifs d'électronique de puissance triphasés, tels que les ponts redresseurs, doit obéir fs d'électronique de puissance connectés au réseau électrique.

En effet, la conception aux règles définies par les normes internationales. Aussi, l'évaluation qualitative et quantitative des perturbations EM, engendrées par ces dispositifs en mode commun et en mode différentiel, est d'une importance capitale car elle permet une bonne définition des techniques de contrôle des émissions et un meilleur dimensionnement des filtres CEM [22].

Afin d'obtenir des mesures de perturbations EM conduites haute fréquence, comparables et conformes aux normes CEM, un RSIL triphasé doit être utilisé. Afin d'établir les équations liées aux perturbations, en mode différentiel et en mode commun, engendrées par un pont redresseur triphasé, nous nous sommes basés sur le montage présenté sur la figure III.76. Le montage considéré à la figure III.27 peut être représenté par le schéma électrique équivalent présenté à la figure III.28. Dans ce dernier, les ports d'entrée a , b , et c du dispositif agresseur (pont redresseur triphasé-appareil sous test) sont directement connectés aux ports du réseau stabilisateur d'impédance de ligne (RSIL). Quant aux ports a' , b' et c' , ils sont connectés avec le récepteur de mesure (oscilloscope ou bien analyseur de spectre). Les ports A , B , et C sont connectés avec le réseau électrique.

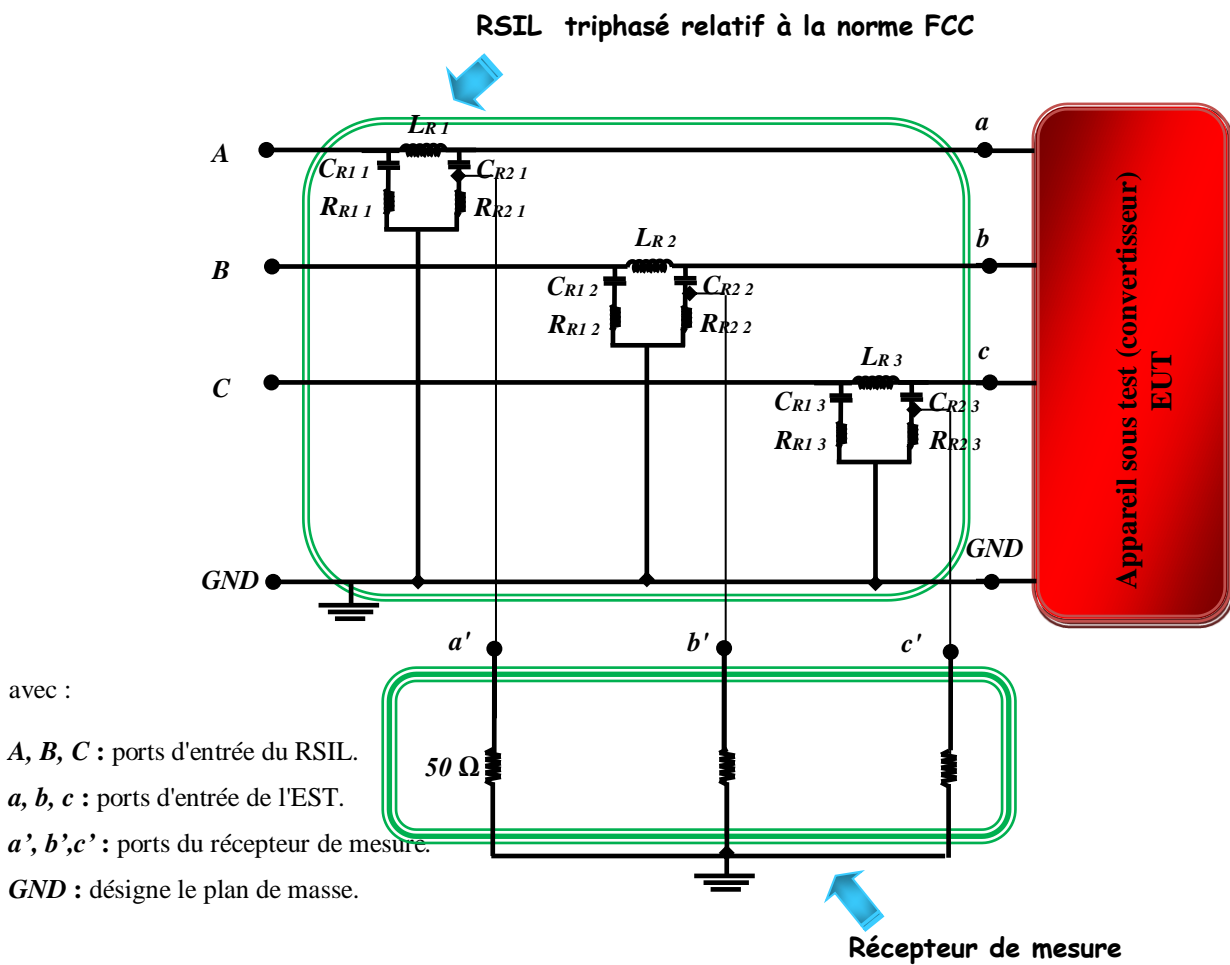


Figure III.27: Configuration triphasée typique de mesure des perturbations EM par un RSIL

Les tensions mesurées U_i aux bornes du récepteur de mesure (50Ω) se composent de deux tensions une composante en mode différentiel et une composante en mode commun [22, 23].

$$U_i = U_{MD_i} + U_{MC} \quad (\text{III.9})$$

avec :

$$i = a, b, c$$

Les deux composantes U_{MD_i} et U_{MC} sont produites par les trois courants de mode différentiel et un courant de mode commun circulant entre le pont redresseur et le récepteur de mesure.

Pour une distribution symétrique du courant de mode commun I_{MC} entre les trois phases, les courants I_i s'écoulant vers le RSIL sont donnés par la relation suivante [22]:

$$I_i = I_{MD_i} + \frac{I_{MC}}{3} \quad (\text{III.10})$$

En outre, la somme des courants de mode différentiel est par définition égale à zéro, et la somme des courants traversant le récepteur de mesure est égale au courant du mode commun [22], [24], ..., [28].

$$I_{MD_a} + I_{MD_b} + I_{MD_c} = 0 \quad (\text{III.11})$$

$$I_a + I_b + I_c = I_{MC} \quad (\text{III.12})$$

Par conséquent, la tension du mode commun U_{MC} peut être évaluée par la sommation des trois tensions U_i :

$$U_a + U_b + U_c = R. (I_a + I_b + I_c) = R. I_{MC} = 3. U_{MC} \quad (\text{III.13})$$

où R désigne la résistance équivalente du récepteur de mesure (typiquement 50Ω).

Pour évaluer les composantes du mode différentiel, la partie mode commun doit être éliminée. Ceci peut être réalisé directement par soustraction des tensions aux bornes du récepteur de mesure comme le montre l'expression suivante :

$$U_a - U_b = U_{MD_a} + U_{MD_b} \quad (\text{III.14})$$

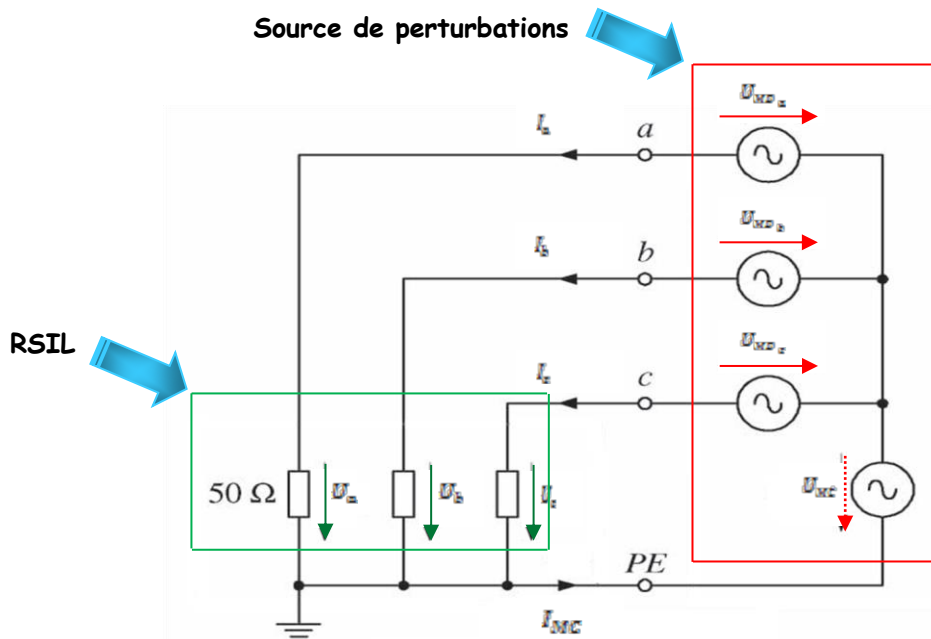


Figure III.28: Schéma électrique (HF) équivalent au montage considéré

III.4.2 Pont triphasé non commandé

Dans cette section, nous étudions les perturbations HF engendrées par le redresseur triphasé non commandé. Pour cela, nous avons simulé sous PSPICE, le circuit de la figure III.29. Ce circuit comprend un RSIL triphasé spécifié par la norme FCC et des diodes parfaites. Les pistes sont représentées par une résistance et une inductance parasites : R_{p1} , R_{p2} , L_{p1} et L_{p2} . Les couplages parasites entre les dissipateurs thermiques des diodes de puissance et le plan de masse sont représentés par les capacités parasites C_{p1} . Les couplages parasites entre les pistes et le plan de masse sont représentés par les capacités parasites C_{p2} . Les valeurs de ces éléments parasites, sont consignées dans le tableau III.3 ci-dessous.

Tableau III.3: Données relatives aux éléments parasites

R_{p1} (m Ω)	R_{p2} (m Ω)	L_{p1} (nH)	L_{p2} (nH)	C_{p1} (pF)	C_{p2} (pF)
1.35	1.1	481	25.6	20	100

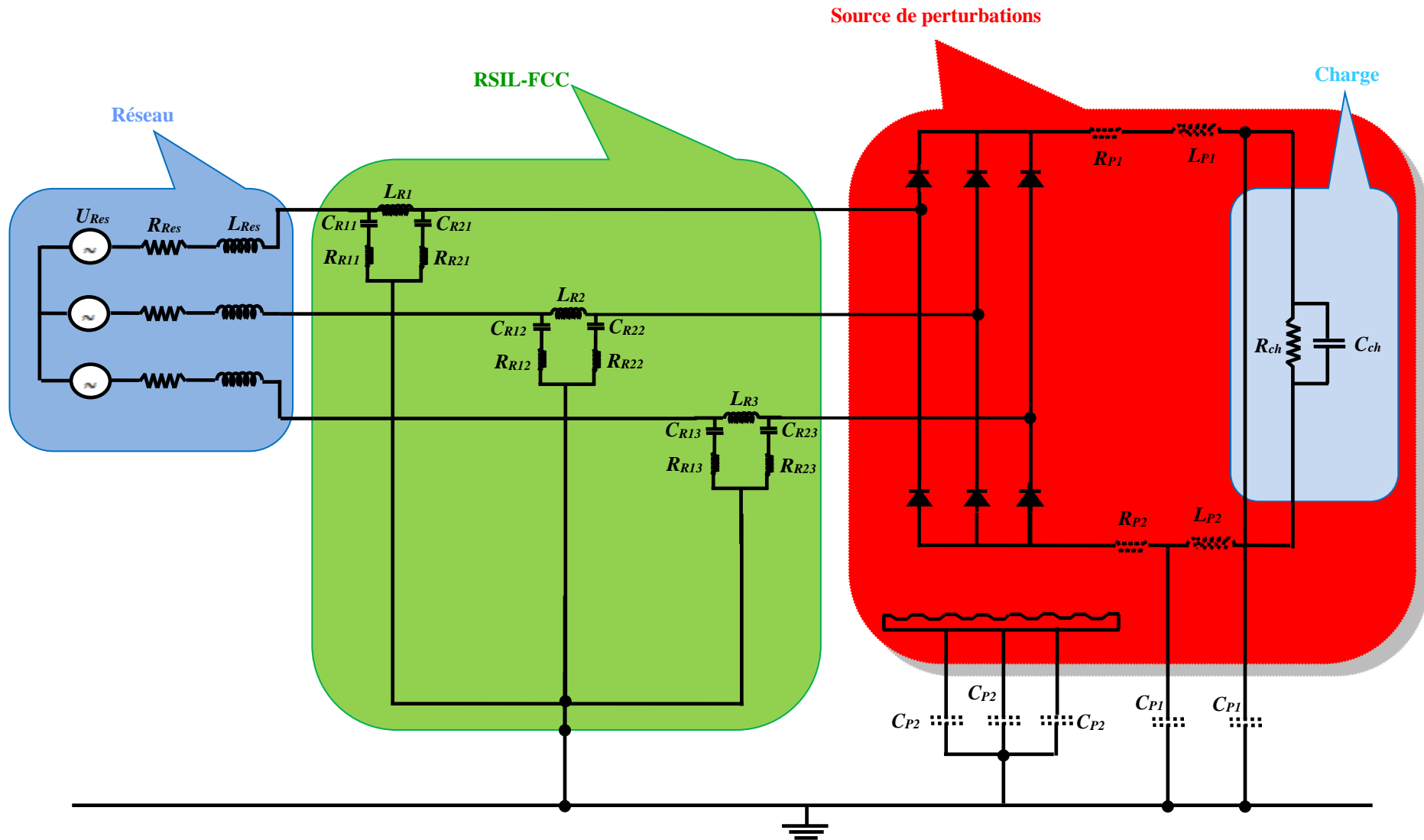


Figure III.29: Structure du pont redresseur triphasé non commandé – Modèle hautes fréquences

Présentation et analyse des résultats obtenus

Dans les figures III.30, III.31 et III.32 nous avons reporté respectivement les variations temporelles, de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur triphasé non commandé, du courant de ligne et de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL. Les analyses spectrales des perturbations totales sont présentées sur la figure III.33. Sur ces analyses spectrales nous avons ajouté le gabarit des spécifications de la norme **FCC (Title 47, Part 15)** afin de pouvoir juger du respect ou non de cette norme en matière de perturbations.

Sur le plan temporel, l'analyse des résultats obtenus montre une déformation de la forme d'onde de la tension (tension composée et tension simple) à l'entrée du pont redresseur triphasé non commandé ainsi que celle du courant de ligne (figures III.30 et III.31). Un phénomène oscillatoire répétitif est observé sur ces formes d'ondes. Ce dernier est dû au blocage des diodes. Ce phénomène est observé aussi sur la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL (figure III.32).

Sur le plan fréquentiel, l'analyse spectrale de la tension, (figure III.33) aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL, montre que le niveau des perturbations ne dépasse pas le niveau maximal de perturbation fixé par le gabarit spécifique à la norme **FCC classe A** (secteur industriel). Cependant, dans l'intervalle allant de 9kHz à 200kHz , il dépasse le niveau spécifié par le gabarit imposé par la norme **FCC classe B** relative au secteur domestique et hospitalier.

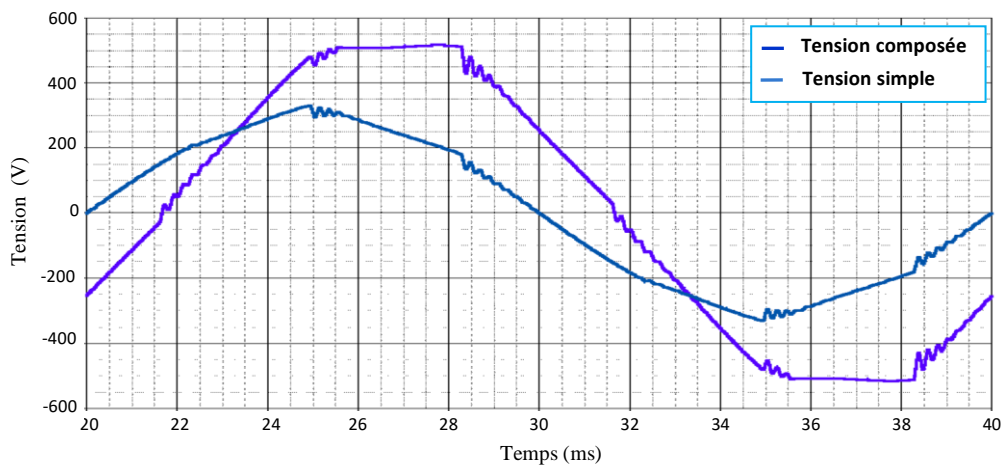


Figure III.30: Variations temporelles de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur non commandé triphasé

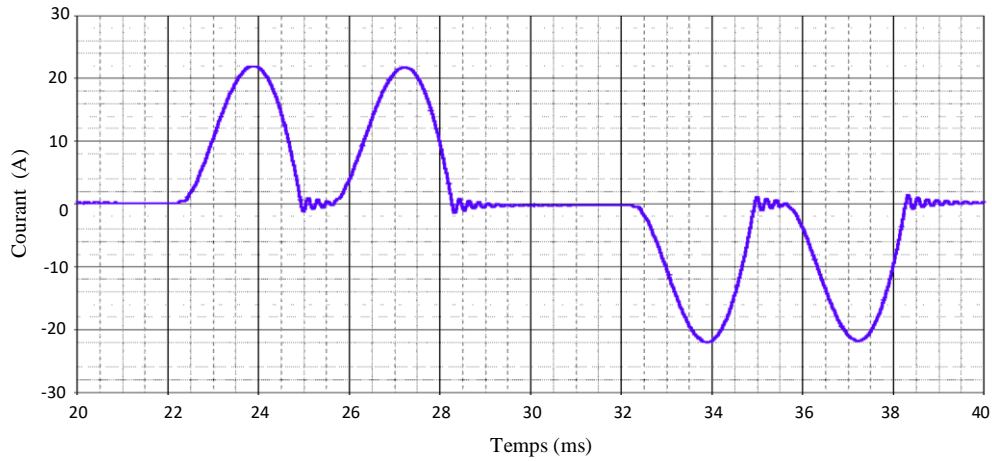


Figure III.31: Variations temporelles du courant de ligne relatives au pont redresseur triphasé non commandé

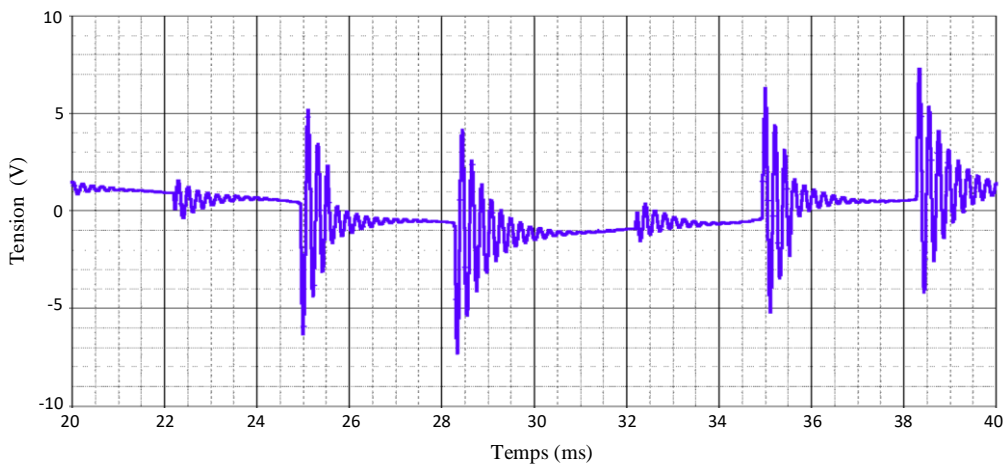


Figure III.32: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relatives au pont redresseur triphasé non commandé

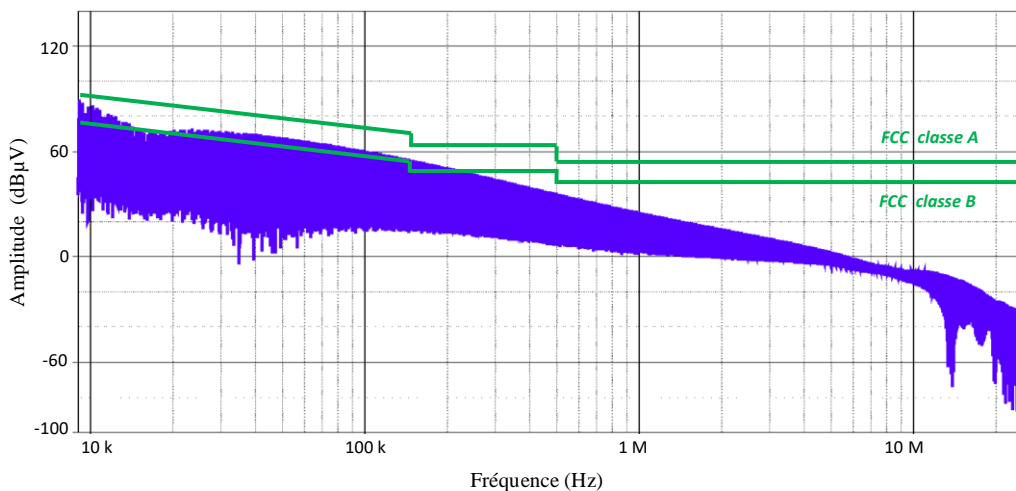


Figure III.33: Spectre fréquentiel des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente du RSIL correspondant au pont redresseur triphasé non commandé

III.4.3 Pont triphasé commandé

Dans la première partie de cette section, nous allons étudier les perturbations EM HF générées par un pont redresseur triphasé commandé. La configuration d'étude est basée sur le circuit présenté à la figure III.29 dans lequel, les diodes ont été remplacées par des thyristors de type 2N2219, et la valeur de la capacité de charge a été fixée à $900nF$. La seconde partie de cette étude est réservée à l'examen des perturbations HF générées par un pont redresseur mixte. Le circuit étudié est le même que celui du redresseur non commandé (figure III.29), dans lequel certaines diodes seulement ont été remplacées par des thyristors.

Présentation et analyse des résultats obtenus

Sur les figures III.34, III.35, III.38 et III.39 nous présentons respectivement les variations temporelles de la tension (simple et composée) à l'entrée du pont redresseur triphasé commandé tous thyristors et à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte. Les figures III.36 et III.40 montrent respectivement les variations temporelles des perturbations EM canalisées vers la résistance équivalente de mesure du RSIL dans le cas du pont redresseur triphasé commandé tous thyristors ainsi que dans le cas du pont redresseur triphasé mixte. Les analyses spectrales de ces perturbations sont présentées dans les figures III.37 et III.41 sur lesquelles nous avons superposé les gabarits spécifiant les limites imposées par la norme *FCC (Title 47, Part 15)*, pour des besoins de comparaison.

Cas du pont redresseur triphasé commandé tout thyristors

L'analyse des variations temporelles montre là aussi une déformation des formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne (figure III.34 et III.35). Nous observons aussi sur les formes d'ondes obtenues, l'apparition d'un phénomène oscillatoire aux instants d'amorçage des thyristors. Quant à la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL nous observons une variation rapide de cette tension accompagnée d'un phénomène oscillatoire lors de l'amorçage des thyristors ayant une cathode commune. Un deuxième phénomène oscillatoire apparaît au moment d'amorçage des thyristors à anode commune (figure III.36).

L'analyse spectrale de cette tension (figure III.83) montre que le niveau des perturbations EM dépasse celui du gabarit autorisé par la norme *FCC (classe A et B)* dans la zone 1, correspondant à la gamme de fréquences comprises entre 9 kHz et 13 MHz . Par contre, dans la zone 2 correspondant à l'intervalle de fréquences comprises entre 13 MHz et 30 MHz , le niveau des perturbations est en dessous des limites spécifiées par la norme *FCC (classe A et B)*.

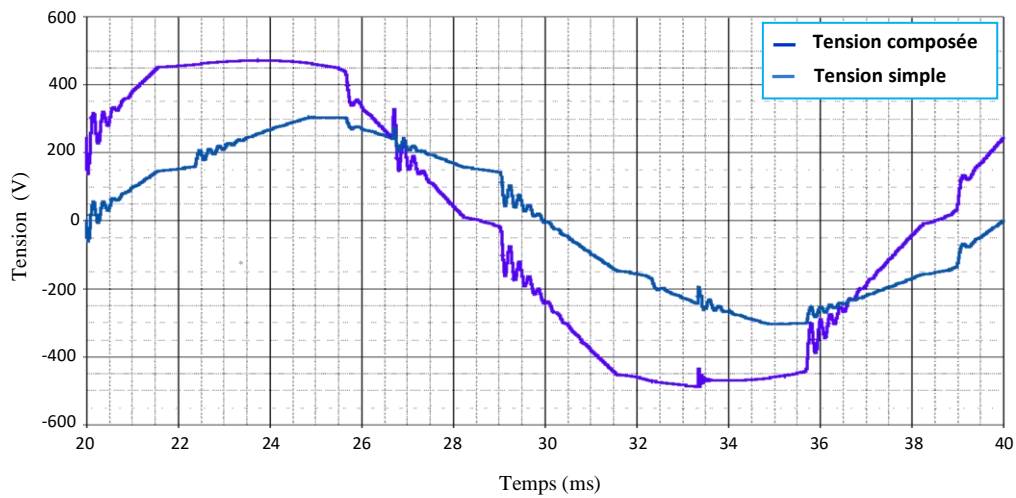


Figure III.34: Forme d'onde de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur commandé triphasé tout thyristors

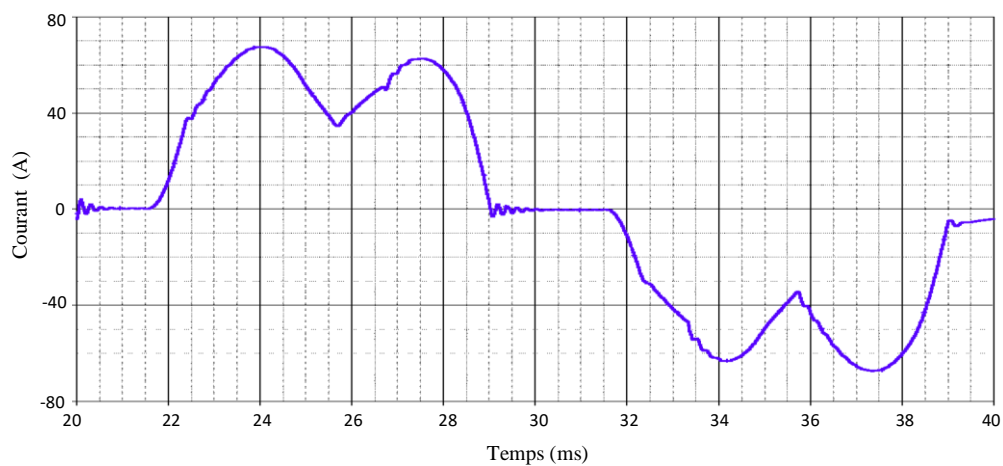


Figure III.35: Forme d'onde du courant de ligne correspondant au pont redresseur commandé triphasé tout thyristors

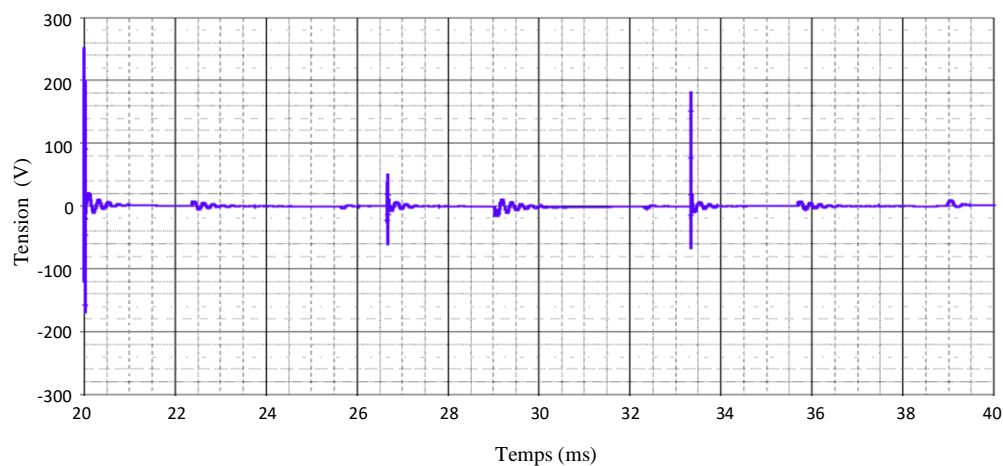


Figure III.36: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL dans le cas du redresseur commandé triphasé tout thyristors

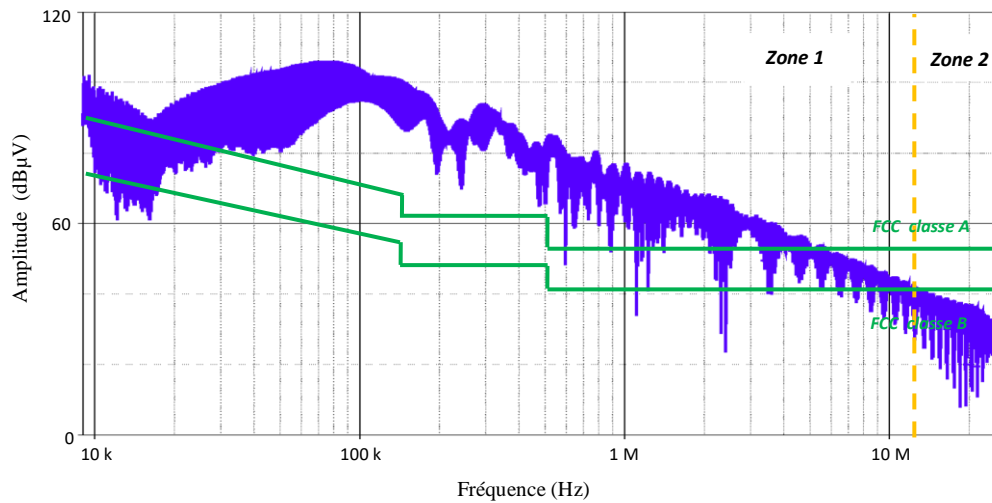


Figure III.37: Spectre des perturbations totales localisées sur la résistance équivalente de mesure du RSIL relatif au pont redresseur commandé triphasé tout thyristors

Cas du pont redresseur triphasé mixte

L'analyse des variations temporelles de la tension à l'entrée du pont, du courant de ligne et des perturbations totales localisées sur la résistance du RSIL (figures III.38, III.39 et III.40), montre de façon claire l'effet perturbateur engendré par le pont redresseur mixte. Cet effet se traduit par la déformation et la dissymétrie des formes d'ondes de la tension à l'entrée du pont et du courant de ligne avec l'apparition de deux phénomènes oscillatoires consécutifs qui se répètent trois fois. Le premier phénomène est dû à l'amorçage des thyristors alors que le deuxième phénomène est dû au blocage des diodes. De plus, nous remarquons l'existence du phénomène oscillatoire dans la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL. Aussi, si on s'intéresse à l'analyse spectrale de cette tension (figure III.41), on peut constater que le niveau des perturbations, dans la zone 1, dépasse le gabarit autorisé par la norme *FCC* et reste conforme à ce gabarit dans la zone 2.

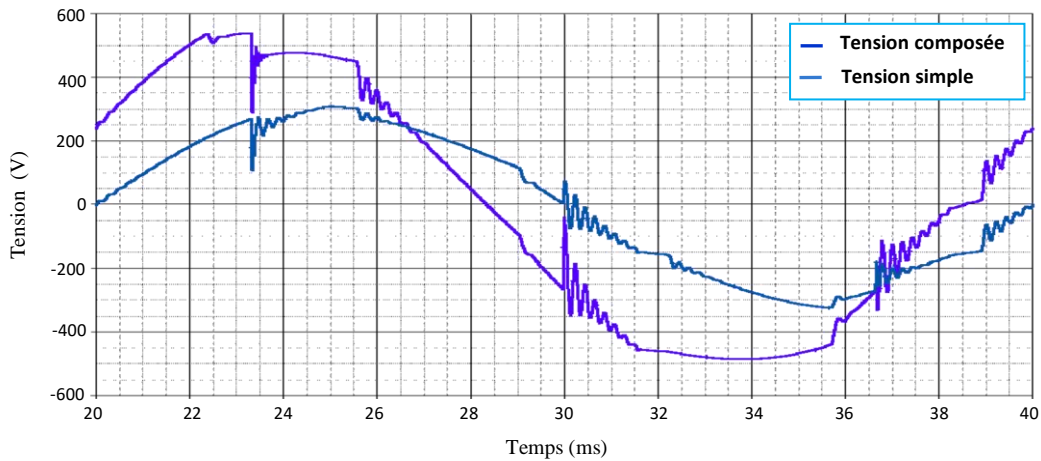


Figure III.38: Variations temporelles de la tension composée et de la tension simple à l'entrée du pont redresseur triphasé mixte

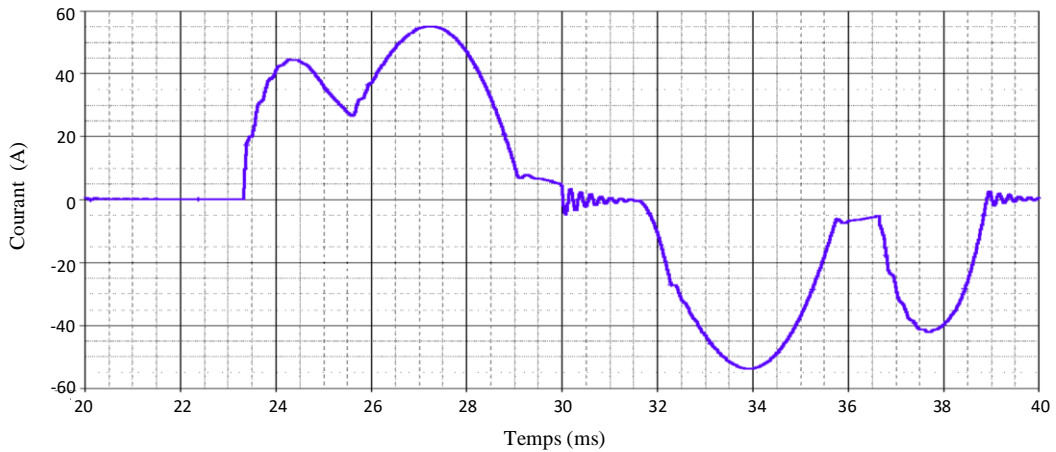


Figure III.39: Variations temporelles du courant de ligne correspondant au pont redresseur triphasé mixte

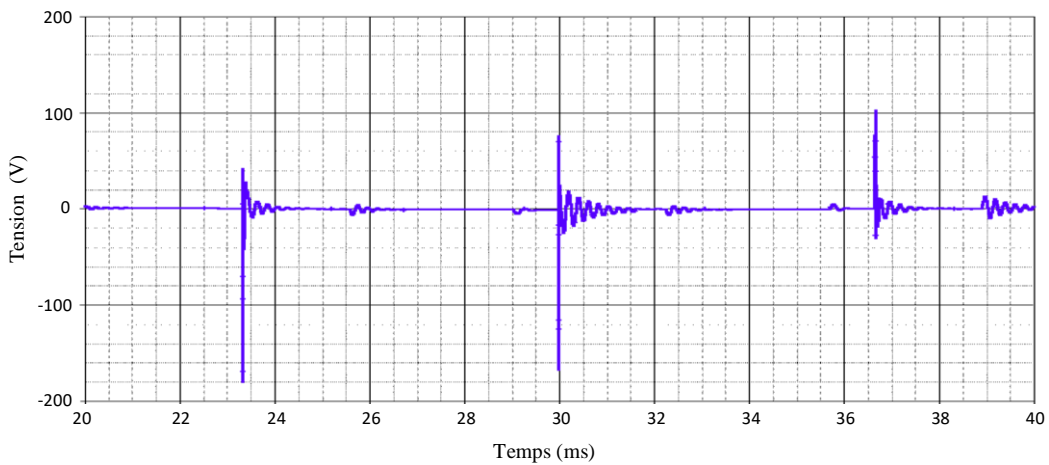


Figure III.40: Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relatives au pont redresseur triphasé mixte

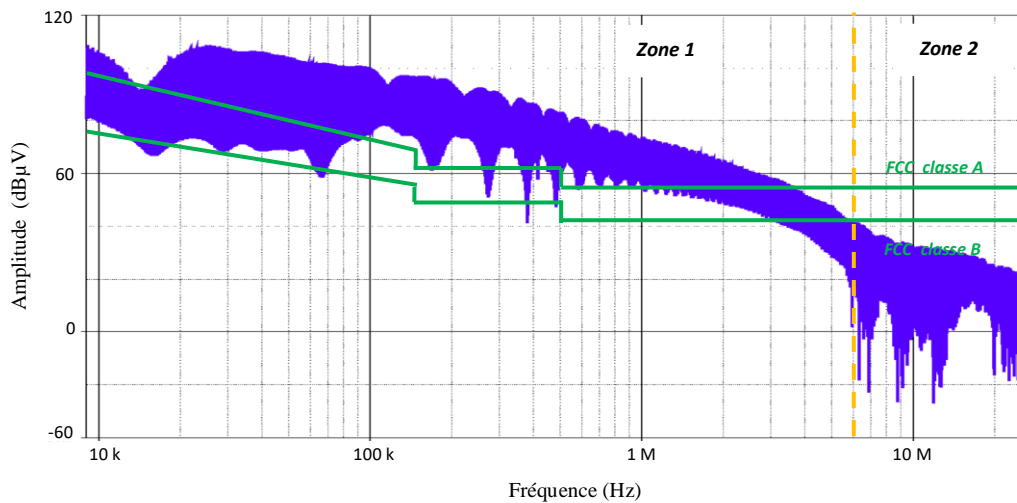


Figure III.41: Spectre des perturbations totales localisées sur la résistance du RSIL relatif au pont redresseur triphasé mixte

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré, dans un premier temps, à l'étude des perturbations électromagnétiques conduites hautes fréquences créées par les redresseur monophasés (non commandés et commandés). Dans une seconde étape nous sommes intéressés à l'étude des perturbations électromagnétiques hautes fréquences générées par les redresseurs triphasés (non commandés et commandés).

Les résultats de simulation obtenus ont montré :

- ✚ Que les ponts redresseurs commandés sont plus polluants que les ponts redresseurs non commandés. En effet, dans les ponts redresseurs commandés, la variation rapide des courants de gâchettes des thyristors entraîne l'obtention de spectres fréquentiels de la tension aux bornes de la résistance du RSIL moins riches en fréquences perturbatrices que ceux relatifs au pont redresseur non commandé (image des perturbations totales).
- ✚ Que les ponts redresseurs triphasés commandés, tout thyristors, génèrent des perturbations EM à partir de 12 MHz alors que les ponts redresseurs triphasés mixtes le font à partir de 6 MHz. Toutefois, l'amplitude de ces perturbations reste en dessous des limites spécifiées par la norme FCC. Au-delà de ces fréquences, l'amplitude des perturbations générées par ces ponts dépasse le niveau du gabarit autorisé par la norme FCC.

Conclusion générale

Les travaux présentés dans cette mémoire concernent l'étude et la caractérisation des perturbations électromagnétiques (en mode conduit) émises par des dispositifs d'électronique de puissance et plus précisément par les ponts redresseurs.

Dans cette étude, nous avons considéré deux types de ponts redresseurs à savoir un redresseur non commandé (interrupteur de puissance utilisé diode) et un redresseur commandé (interrupteur de puissance utilisé thyristor).

Notre travail a consisté en la caractérisation complète, en hautes fréquences, des perturbations émises par ces dispositifs. Cette caractérisation a nécessité une modélisation CEM des différents composants du système formé par le convertisseur et sa victime à savoir le réseau électrique. Cette modélisation qui constitue une étape très importante du travail a été réalisée en tenant compte des différents éléments parasites caractérisant chaque composant ou entité.

A l'issue de cette modélisation nous avons effectué différentes simulations afin d'identifier et de caractériser les perturbations électromagnétiques, hautes fréquences, générées par le convertisseur en question (pont redresseur).

Les résultats obtenus après simulation, nous ont permis de mettre en évidence les sources et les chemins de propagations des perturbations engendrées par ce convertisseur. Tous les résultats de simulations ont été comparés et validés par des gabarits de normes CEM relatifs aux dispositifs étudiés. Nous avons ainsi, montré que les ponts redresseurs présentent une source non négligeable de perturbations électromagnétiques, en hautes fréquences, et qu'ils sont à l'origine de phénomènes oscillatoires apparaissant au moment du blocage des diodes (dans le cas du redresseur non commandé) et à l'instant d'amorçage des thyristors (dans le cas du redresseur commandé).

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
bibliographiques**

- [1] Azzi Mohammed Anouar, « *Etude sur l'impact des perturbations électromagnétiques d'un réseau dc/dc à base des hacheurs buck dans un environnement électrique* », Mémoire de Master, Institut de Technologie, Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2020.
- [2] Bachir Maouche, « *CEM: Terminologie-définition, Contexte et Enjeux* » Cours, université de Béjaia, 2017.
- [3] A. Bendaoud, « *Couplages et technique de protection en CEM* », Cours de module Compatibilité électromagnétique, Université de Djilali Liabes, SBA, 2017.
- [4] Rezini. S « *Qualité d'énergie et compatibilité électromagnétique* », Cours du niveau S3, Electrotechnique industrielle, Université de Mostaganem, 2023.
- [5] Sandrine Roblot, « *Caractérisation des couplages électromagnétiques dans les réseaux filaires cuivre en vue d'optimiser les transmissions à haut débit* » Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [6] B. MAOUCHE, « *Couplages des perturbations* » Cours de compatibilité électromagnétique, Université de Bejaïa, 2017.
- [7] BIDI Manel, « *Compatibilité électromagnétique et réseaux d'énergie, perturbations, effets et solutions* », Thèse de Doctorat, Université des frères Mentouri de Constantine, 2017.
- [8] K.Arzag , « *Couplage des perturbations électromagnétiques rayonnées par un coup de foudre avec des lignes électriques* », Mémoire de Magister, USTO-MB, Oran, Algérie 2008.
- [9] Rezini, S, Azzouz, Z. E. « *Analyse comparative des perturbations EM conduites BF engendrées par les ponts redresseurs triphasés commandés et non commandés* », USTO, Oran, Algérie 2014.
- [10] L. Lasne, « *Electronique de puissance* », Livre, Dunod 2^{ème} édition, Paris, 2015.
- [11] Bentoumi Youssouf Lamine « *Conception d'un système de diagnostic des défauts d'un convertisseur ac-dc alimentant un moteur CC* ». Thèse Doctorat. Université Mohamed Boudiaf de Msila, 2016.
- [12] Fang Lin Luo, Hong Ye, « *Power electronics advanced conversion technologies* », Book printed by CRC Press, Taylor & Francis Group, United States of America, 2010 .
- [13] Yaël THIAUX, « *Conversion AC/DC, amélioration du facteur de puissance* », Institut universitaire de technologie de Nîmes, 2013.
- [14] L. Bessoltane, S.Rezini, Z.Azzouz, « *Etude des perturbations électromagnétiques générées par l'association redresseur - hacheur. Filtrage CEM* » 1^{ère} Conférence internationale sur électronique de puissance et les entraînements électriques, USTO-MB, Oran, 2010.
- [15] S. Rezini, Z. Azzouz, B. Kouadri, « *Study of high frequency electromagnetic disturbances generated by a rectifier and chopper association* », Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 89 NR 7, pp 8-12, 2013.
- [16] P. V. Y. Jayasree, J. C. Priya, G. R. Poojita, G. Kameshwari, « *EMI filter design for reducing common-mode and differential-mode noise in conducted interference* », International journal of electronics and communication engineering, ISSN 0974-2166 Vol. 5, no. 3, pp 319-329, 2012.

- [17] K. M. Muttaqi, M. E. Haque, « *Electromagnetic Interference Generated from Fast Switching Power Electronic Devices* », International journal of innovations in energy systems and power, Vol. 3, no. 1, pp 19-45, 2008.
- [18] D. Sakulhirirak, V. Tarateeraseth, W. Khan-ngern, N. Yoothanom, « *Trade-off between EMI separator and RF current probe for conducted EMI testing* », International conference, ECTI, pp 101-108, 2007.
- [19] G. Asmanis, « *Measurement and modeling of EMI filters high frequency parasitic parameters* », PhD, Faculty of power and electrical engineering, Institute of industrial electronics and electrical engineering, Riga technical university, 2014.
- [20] S. Alexandersson, « *Automotive electromagnetic compatibility. Prediction and analysis of parasitic components in conductor layouts* », PhD, Department of industrial electrical engineering and automation, Lund university, 2008.
- [21] M. L. Heldwein, T. Nussbaumer, J. W. Kolar, « *Novel three-phase CM/DM conducted emission separator* », IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 56, n° 9, pp 3693-3703, 2009.
- [22] M. Hartmann, H. Ertl, J. W. Kolar, « *EMI filter design for high switching frequency three-phase/level PWM rectifier systems* », 25th Annual IEEE, Applied power electronics conference and exposition, February 21-25, 2010.
- [23] M. Hartmann, H. Ertl, J. W. Kolar, « *Numerical analysis of conducted electromagnetic interferences* », International conference on modern power systems MPS, Cluj-Napoca, Romania, pp 277-280, 2008.
- [24] N. Hanigovszki, J. Landkildehus, G. Spiazzi, F. Blaabjerg, « *An EMC Evaluation of the use of unshielded motor cables in AC adjustable speed drive applications* », IEEE Transactions on power electronics, Vol. 21, n° 1, pp 273-281, 2006.
- [25] M. Degano, « *EMI filter design for matrix converters in aerospace applications* », PhD, Nottingham university, 2012.
- [26] T. Friedli, M. Hartmann, J. W. Kolar, « *The essence of three-phase PFC rectifier systems-Part II* », IEEE Transactions on power electronics, Vol. 29, n° 2, pp 543-560, 2014.
- [27] M. L. Heldwein, L. Dalessandro, J. W. Kolar, « *The three-phase common-mode inductor : modeling and design issues* », IEEE Transactions on power electronics, Vol. 58, n° 8, pp 3264-3274, 2011.

Annexe

Topologie du réseau stabilisateur d'impédance de ligne

Les émissions EM conduites hautes fréquences sont transmises en mode commun et en mode différentiel. Le réseau stabilisateur d'impédance de ligne (RSIL) permet la mesure de ces perturbations. Le modèle de ce dernier suivant la norme *FCC* est représenté sur la figure ci-après.

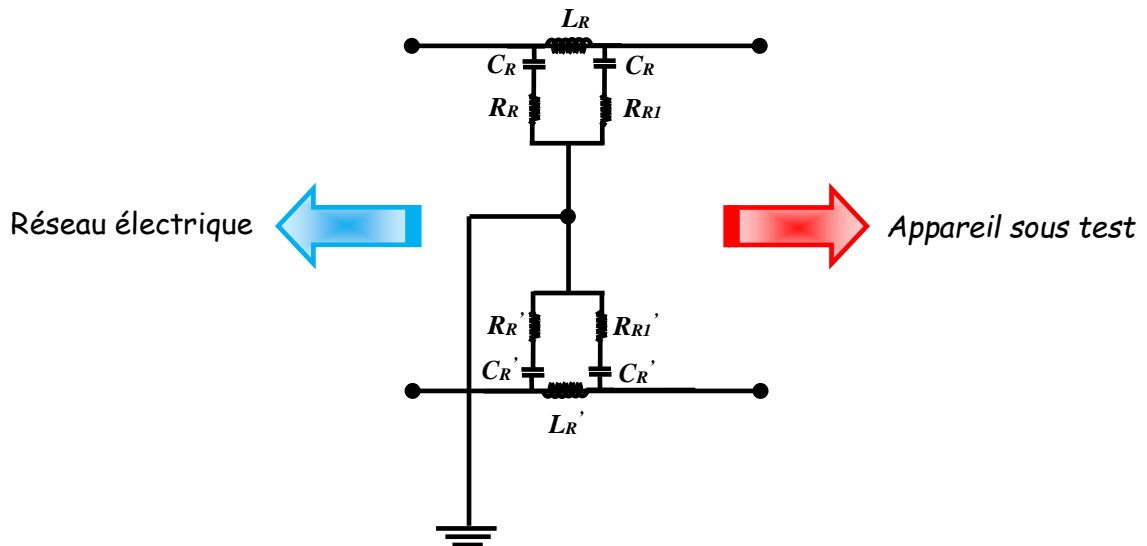


Figure III.1: Topologie d'un RSIL suivant la norme *FCC*

Paramètres du réseau stabilisateur d'impédance de ligne

Les paramètres du modèle de RSIL sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau : Paramètres du RSIL relatif à la norme *FCC*

$L_R = L_R' (\mu H)$	$C_R = C_R' (\mu F)$	$R_{RI} = R_{RI}' (K\Omega)$	$R_R = R_R' (\Omega)$
56	22.5	1	1