



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPEREUR  
ET DELA 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/2024

## MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

**MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Electrotechnique Industrielle**

Par

Mr DJEBBOUR Ali

Mr GNAOUI Islam

**Réduction des perturbations électromagnétiques conduites hautes  
fréquences générées par un convertisseur statique**

Soutenu le / / 2024 devant le jury composé de

Président :	Mr BENTOUNES	Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr SOUAG	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteuse :	Mme REZINI	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2023/2024

## Résumé :

La pollution électromagnétique constitue un défi majeur pour la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques. Les convertisseurs statiques, en tant que charges non linéaires, sont une source importante de cette pollution, émettant des perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées significatives du point de vue de la compatibilité électromagnétique (CEM).

Cette étude vise à analyser et à définir la signature CEM des perturbations électromagnétiques conduites à haute fréquence, générées par divers convertisseurs statiques (redresseur, hacheur, et leur combinaison). L'objectif final est de proposer des solutions pour atténuer ces perturbations et ainsi protéger les éléments vulnérables, notamment le réseau électrique auquel ces convertisseurs sont connectés.

La recherche se concentre sur l'identification et la caractérisation des sources de perturbations électromagnétiques produites par ces dispositifs d'électronique de puissance. L'étude examine séparément un redresseur et un hacheur abaisseur, puis leur association. Elle se termine par l'exploration de diverses méthodes de réduction de ces perturbations, en particulier l'utilisation de filtres CEM passifs. Tous les résultats de simulation, obtenus via le logiciel Pspice, ont été validés en les comparant aux normes spécifiques applicables aux dispositifs étudiés.

## Mots clés :

Compatibilité électromagnétique, dispositifs d'électronique de puissance, perturbations conduites, hautes fréquences, normalisation et réglementation, filtrage CEM.

## ملخص

يشكل التلوث الكهرومغناطيسي تحديًا كبيرًا لجودة الطاقة في الشبكات الكهربائية. تعتبر المحولات الثابتة، كونها أحمال غير خطية، مصدرًا مهمًا لهذا التلوث، حيث تصدر اضطرابات كهرومغناطيسية موصلة ومشعة كبيرة من وجهة نظر التوافق الكهرومغناطيسي (CEM).

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل وتحديد توقيع التوافق الكهرومغناطيسي للاضطرابات الكهرومغناطيسية الموصلة عالية التردد، التي تنتجها محولات ثابتة متنوعة (مقوم، مقطوع، ومزيج بينهما). الهدف النهائي هو اقتراح حلول لتخفيف هذه الاضطرابات وبالتالي حماية العناصر المعرضة للخطر، ولا سيما الشبكة الكهربائية التي ترتبط بها هذه المحولات.

يركز البحث على تحديد وتصنيف مصادر الاضطرابات الكهرومغناطيسية التي تنتجها هذه الأجهزة الإلكترونية للطاقة. يركز هذا العمل الذي قمنا به على دراسة بشكل منفصل لمقوم وللمقطع والخافض، ثم تجميع بينهما. تختتم الدراسة باستكشاف طرق مختلفة لتقليل هذه الاضطرابات، خاصة استخدام مرشحات التوافق الكهرومغناطيسي. تم التحقق من جميع نتائج المحاكاة، التي تم الحصول عليها عبر برنامج Pspice، بمقارنتها بالمعايير المحددة القابلة للتطبيق على الأجهزة المدروسة.

## الكلمات المفتاحية :

التوافق الكهرومغناطيسي، أجهزة الإلكترونيات الاستطاعة ، الاضطرابات الكهرومغناطيسية المتنقلة عن طريق الأسلاك ، الترددات العالية، مرشح التوافق الكهرومغناطيسي.

## Summary:

Electromagnetic pollution presents a major challenge to power quality in electrical networks. Static converters, as non-linear loads, are a significant source of this pollution, emitting substantial conducted and radiated electromagnetic disturbances from the perspective of electromagnetic compatibility (EMC). This study aims to analyze and define the EMC signature of high-frequency conducted electromagnetic disturbances generated by various static converters (rectifier, chopper, and their combination). The ultimate goal is to propose solutions to mitigate these disturbances and thereby protect vulnerable elements, particularly the electrical network to which these converters are connected. The research focuses on identifying and characterizing the sources of electromagnetic disturbances produced by these power electronics devices. The study separately examines a rectifier and a step-down chopper, followed by their combination. It concludes with the exploration of various methods to reduce these disturbances, particularly the use of passive EMC filters. All simulation results, obtained via Pspice software, have been validated by comparing them to specific standards applicable to the devices studied.

## Keywords :

Electromagnetic compatibility, power electronic devices, conducted disturbances, high frequencies, standards and regulations, EMC filtering.

# Remerciement

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

*Nous tenons à exprimer notre gratitude toute particulière envers notre encadrante, Madame **REZINI Saliha**, pour son accompagnement assidu et sa direction éclairée tout au long de notre travail. Sa bienveillance nous a permis de bénéficier de son savoir étendu ainsi que de ses conseils avisés. Nous lui sommes reconnaissants pour son soutien indéfectible, ses observations judicieuses qui ont contribué à l'amélioration substantielle de notre mémoire, et grâce auxquels nous avons pu atteindre les objectifs que nous nous étions fixés.*

*Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à Monsieur **BENTOUNES Adda**, qui nous a fait l'insigne honneur d'accepter de présider notre jury. Sa présence distinguée confère à notre travail un lustre particulier, et nous sommes infiniment reconnaissants de la considération qu'il a bien voulu nous accorder en assumant cette éminente fonction.*

Nous souhaitons également témoigner notre plus vive reconnaissance à Monsieur **SOUAG Slimane**, éminent membre du jury, qui nous fait l'honneur insigne de bien vouloir porter son regard expert sur notre travail

Nous désirons en outre exprimer notre plus sincère gratitude envers l'ensemble du corps professoral du Département d'Electrotechnique de l'Université de Mostaganem. Notre reconnaissance s'adresse tout particulièrement aux éminents pédagogues qui ont contribué avec dévouement à notre formation académique. Nous leur sommes redevables de nous avoir prodigué un enseignement d'une qualité exceptionnelle, façonnant ainsi notre esprit critique et notre rigueur scientifique.

***Merci à tous***

**Avec un énorme plaisir, un cour ouvert et une immense joie, nous dédions ce travail**

**À nos très chers parents qui nous ont soutenus tout au long de notre vie.**

**À tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.**

**À toute notre famille.**

# sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>8</b>
<b>CHAPITRE I .....</b>	<b>10</b>
<b>I Introduction.....</b>	<b>11</b>
I.1 LA COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE .....	11
I.1.1 Exemples de problèmes CEM.....	11
I.2 LES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES .....	12
I.2.1 Source.....	12
I.2.1.1 Classification des sources de perturbations .....	12
I.2.2 Victime .....	14
I.2.3 Couplage.....	14
I.2.3.1 Couplage par conduction.....	15
I.2.3.2 Couplage par rayonnement .....	16
I.3 TYPES DE PERTURBATIONS .....	17
I.3.1 Les harmoniques .....	17
I.3.2 Les variations de fréquence .....	18
I.3.3 Les fluctuations de tension .....	18
I.3.4 Les creux de tension et les coupures brèves.....	19
I.3.5 Les surtensions.....	19
I.3.6 Le déséquilibre de tension .....	19
I.3.7 Composante continue dans les réseaux alternatifs.....	20
I.3.8 Rayonnement des lignes d'énergie.....	20
I.3.9 L'enclenchement et le court-circuit des lignes aériennes.....	20
I.3.10 Décharges électrostatiques .....	20
I.3.11 Le court-circuit.....	21
I.3.12 Courant de mode commun des convertisseurs statique .....	21
I.3.13 Manœuvres d'appareils de coupures .....	21
I.4 LA CEM EN L'ELECTRONIQUE DE PUISSANCE .....	22
I.4.1 Classification des émissions des convertisseurs statiques.....	23
I.4.2 Effets des perturbations électromagnétique dans les convertisseurs statiques (Exemple).....	23
I.5 NORMALISATION .....	24
I.5.1 Les types de normes en CEM .....	25
I.5.1.1 Normes basses fréquences .....	25
I.5.2 Normes hautes fréquences .....	25
I.6 CONCLUSION.....	26
<b>CHAPITRE II .....</b>	<b>27</b>
<b>II Introduction.....</b>	<b>28</b>
II.1 PRINCIPE DE LA PROTECTION EN CEM .....	28
II.1.1 Action directe sur l'élément perturbateur .....	28
II.1.2 Action sur l'élément perturbé .....	28
II.1.3 Action sur le moyen de couplage .....	29
II.2 REDUCTION DES PERTURBATIONS EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE.....	29
II.2.1 Perturbations en mode conduit.....	29
II.2.1.1 Solutions adoptées en basses fréquences.....	29
II.2.1.2 Solutions adoptées en hautes fréquences.....	37
II.2.2 Perturbations en mode rayonnées .....	38
II.3 CONCLUSION.....	38
<b>Chapitre 3.....</b>	<b>39</b>
<b>III Introduction.....</b>	<b>40</b>

III.1 HYPOTHESES LIEES AUX DISPOSITIFS .....	40
III.2 ETUDE DE LA CEM D'UN PONT REDRESSEUR MONOPHASE NON COMMANDE.....	40
III.2.1    Considération théorique.....	41
III.2.1.1    Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne .....	41
III.2.2    Mise en évidence et simulation des perturbations conduites HF générés par un pont redresseur	43
III.2.2.1    Présentation et analyse des résultats obtenus.....	45
III.3 ETUDE CEM D'UN HACHEUR SERIE.....	47
III.3.1    Considération théorique.....	47
III.3.2    Mise en en évidence et simulation des perturbations conduites HF générées un hacheur série.....	48
III.3.2.1    Présentation et analyse des résultats obtenus.....	50
III.4 ETUDE CEM DE L'ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR.....	52
III.4.1    Mise en en évidence et simulation des perturbations conduites HF générée par l'association redresseur-hacheur .....	52
III.4.1.1    Présentation et analyse des résultats obtenus.....	55
III.5 REDUCTION DES PERTURBATIONS EM HAUTES FREQUENCES EMISES PAR LES CONVERTISSEURS STATIQUES-APPLICATION A L'ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR.....	57
III.5.1    Principe des filtres CEM passifs .....	57
III.5.2    Conception des filtres CEM passifs .....	58
III.5.3    Dimensionnement des filtres CEM passifs .....	58
III.5.4    Calcul des éléments du filtre CEM passif.....	59
III.5.5    Algorithme de calcul des éléments du filtre CEM passif.....	60
III.5.6    Procédure de conception d'un filtre CEM passif .....	62
III.6 REDUCTION DES PERTURBATIONS EMISES PAR L'ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR PAR L'AJOUT D'UN FILTRE CEM-MISE EN ŒUVRE ET SIMULATION .....	63
III.6.1    Présentation et analyse des résultats obtenus .....	63
III.7 CONCLUSION .....	66
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>68</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>70</b>

## Liste des figures

### LISTE DES FIGURES

<b>FIGURE I.1</b> : TRANSMISSION DES PERTURBATIONS.....	12
<b>FIGURE I.2</b> : MODE COMMUN.....	15
<b>FIGURE I.3</b> : MODE DIFFERENTIEL.....	15
<b>FIGURE I.4</b> : EMISSIONS EN CHAMP MAGNETIQUE (A) ET EN CHAMP ELECTRIQUE (B) .....	16
<b>FIGURE I.5</b> : CHAMP PROCHE ET CHAMP LOINTAIN.....	16
<b>FIGURE I.6</b> : FONDAMENTAL ET HARMONIQUES .....	17
<b>FIGURE I.7</b> : VARIATION DE FREQUENCE .....	18
<b>FIGURE I.8</b> : FLUCTUATION DE TENSION –FLICKER.....	18
<b>FIGURE I.9</b> : CREUX DE TENSION ET COUPURES BREVES .....	19
<b>FIGURE I.10</b> : DESEQUILIBRE DE TENSION.....	20
<b>FIGURE I.11</b> : DECHARGE ELECTROSTATIQUE.....	21
<b>FIGURE I.12</b> : TROIS NIVEAUX D’ENVIRONNEMENT CEM DU CONVERTISSEUR.....	24
<b>FIGURE I.13</b> : LIMITES RELATIVES AUX EMISSIONS CONDUITES.....	26
<b>FIGURE II.1</b> : TRANSFORMATEUR A SECONDAIRE ZIGZAG ET ATTENUATION DES HARMONIQUES MULTIPLES DE 3 .....	30
<b>FIGURE II.2</b> : BRANCHEMENT D’UN FILTRE RESONANT .....	31
<b>FIGURE II.3</b> : BRANCHEMENT D’UN FILTRE AMORTI.....	31
<b>FIGURE II.4</b> : PRINCIPE DE CONNEXION D’UN FILTRE ACTIF .....	32
<b>FIGURE II.5</b> : FILTRE ACTIF PARALLELE .....	32
<b>FIGURE II.6</b> : FILTRE ACTIF SERIE .....	33
<b>FIGURE II.7</b> : FILTRE COMBINE PARALLELE-SERIE (UPQC).....	33
<b>FIGURE II.8</b> : SCHEMA DU PONT REDRESSEUR DODECAPHASE .....	34
<b>FIGURE II.9</b> : CORRECTION DU FACTEUR DE PUISSANCE .....	35
<b>FIGURE II.10</b> : TOPOLOGIE D’UN PONT REDRESSEUR MLI.....	36
<b>FIGURE II.11</b> : SCHEMA SYNOPTIQUE D’UN REDRESSEUR TRIPHASE A INJECTION DE COURANT.....	36
<b>FIGURE II.12</b> : ASI FONCTIONNANT EN DOUBLE CONVERSION.....	37
<b>FIGURE II.13</b> : EXEMPLE D’UN FILTRE CEM .....	38
<b>FIGURE III.1</b> : PONT REDRESSEUR MONOPHASE A DIODE NON COMMANDE AVEC UNE CHARGE R.....	41
<b>FIGURE III.2</b> : SCHEMA DE PRINCIPE DE MESURE DES PERTURBATIONS ELECTROMAGNETIQUES CONDUITES .....	42
<b>FIGURE III.3</b> : TOPOLOGIE D’UN RSIL SUIVANT LA NORME FCC .....	42
<b>FIGURE III.4</b> : SCHEMA ELECTRIQUE DU PONT REDRESSEUR NON COMMANDE MONOPHASE – MODELE HAUTES FREQUENCES.....	44
<b>FIGURE III.5</b> : VARIATIONS TEMPORIELLES DE LA TENSION A L’ENTREE DU PONT REDRESSEUR.....	45
<b>FIGURE III.6</b> : VARIATIONS TEMPORIELLES DU COURANT DE LIGNE .....	46
<b>FIGURE III.7</b> : TENSION AUX BORNES DE LA RESISTANCE EQUIVALENTE DE MESURE DU RSIL .....	46
<b>FIGURE III.8</b> : SPECTRE DES PERTURBATIONS TOTALES LOCALISEES SUR LE RSIL.....	46
<b>FIGURE III.9</b> : HACHEUR SERIE AVEC CHARGE RESISTIVE.....	47
<b>FIGURE III.10</b> : SCHEMA ELECTRIQUE D’UN HACHEUR ABAISSEUR – MODELE HAUTES FREQUENCES.....	49
<b>FIGURE III.11</b> : FORME D’ONDE DE LA TENSION A L’ENTREE DU HACHEUR .....	50
<b>FIGURE III.12</b> : FORME D’ONDE DU COURANT A L’ENTREE DU HACHEUR.....	50
<b>FIGURE III.13</b> : VARIATIONS TEMPORIELLES DE LA TENSION AUX BORNES DE LA RESISTANCE EQUIVALENTE DU RSIL.....	51
<b>FIGURE III.14</b> : SPECTRE FREQUENTIEL DES PERTURBATIONS TOTALES LOCALISEES SUR LE RSIL.....	51
<b>FIGURE III.15</b> : SCHEMA DE L’ASSOCIATION REDRESSEUR- HACHEUR – MODELE HAUTES FREQUENCES.....	54
<b>FIGURE III.16</b> : FORME D’ONDE DE LA TENSION A L’ENTREE DU PONT REDRESSEUR CORRESPONDANT.....	55
<b>FIGURE III.17</b> : FORME D’ONDE DU COURANT DE LIGNE RELATIVE AU PONT REDRESSEUR SEUL ET A CELLE DE L’ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR .....	55
<b>FIGURE III.18</b> : TENSION AUX BORNES DE LA RESISTANCE EQUIVALENTE DE MESURE DU RSIL .....	56
<b>FIGURE III.19</b> : SPECTRES FREQUENTIELS DE LA TENSION AUX BORNES DE LA RESISTANCE EQUIVALENTE DU RSIL CORRESPONDANT AU CAS DU PONT REDRESSEUR SEUL ET A CELUI DE L’ASSOCIATION REDRESSEUR- HACHEUR .....	57
<b>FIGURE III.20</b> : DIFFERENT CONCEPTION DES FILTRES CEM PASSIFS .....	58
<b>FIGURE III.21</b> : TOPOLOGIE D’UN FILTRE CEM.....	59
<b>FIGURE III.22</b> : MODELES EQUIVALENTS DU FILTRE CEM DU MODE DIFFERENTIEL ET .....	60
<b>FIGURE III.23</b> : ALGORITHME DE DIMENSIONNEMENT DE FILTRE CEM PAR LE PRINCIPE DE SEPARATION DU.....	61
<b>FIGURE III.24</b> : VARIATIONS TEMPORIELLES DE LA TENSION A L’ENTREE DU PONT REDRESSEUR, CORRESPONDANT A L’ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR, AVEC ET SANS FILTRE CEM.....	64



## Liste des figures

<b>FIGURE III.25 :</b> VARIATIONS TEMPORELLES DU COURANT DE LIGNE, CORRESPONDANT A L'ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR, AVEC ET SANS FILTRE CEM.....	64
<b>FIGURE III.26 :</b> VARIATIONS TEMPORELLES DE LA TENSION AUX BORNES DE LA RESISTANCE EQUIVALENTE DE MESURE DU RSIL, CORRESPONDANT A L'ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR, AVEC ET SANS FILTRE CEM.....	65
<b>FIGURE III.27 :</b> AGRANDISSEMENT (ZOOM) DE LA FIGURE 61 EN AMPLITUDE.....	65
<b>FIGURE III.28:</b> ANALYSE SPECTRALES DES VARIATIONS TEMPORELLES DE LA TENSION AUX BORNES DE LA RESISTANCE EQUIVALENTE DE MESURE DU RSIL, AVEC ET SANS FILTRE CEM, RELATIVES A L'ASSOCIATION REDRESSEUR-HACHEUR.....	65

# *Introduction général*

---

*Introduction générale*

---

L'électronique de puissance est devenue un domaine crucial dans notre société moderne, en raison de la demande croissante en énergie électrique et du besoin pressant d'optimiser son utilisation. Cette discipline offre des solutions uniques pour contrôler et gérer efficacement l'énergie électrique, répondant ainsi aux enjeux contemporains de l'efficacité énergétique [1].

La prolifération rapide des équipements d'électronique de puissance dans divers secteurs a cependant engendré de nouveaux défis. Dans le domaine professionnel et militaire, on retrouve ces dispositifs dans les systèmes embarqués, les variateurs de vitesse, les systèmes de chauffage et de contrôle d'énergie. Du côté grand public, ils sont omniprésents dans les appareils domestiques, les automobiles et les ordinateurs [2]. Cette omniprésence a malheureusement pour corollaire une multiplication des sources de perturbations électromagnétiques.

Au cœur de cette problématique se trouve l'utilisation des semi-conducteurs de puissance en mode interrupteur. Ce mode de fonctionnement, bien qu'il permette d'atteindre des rendements énergétiques très élevés, est à l'origine de nombreuses perturbations électromagnétiques. Ces perturbations sont principalement dues aux commutations rapides des semi-conducteurs, qui génèrent des variations brusques de tension et de courant [3].

Les perturbations électromagnétiques ainsi créées se propagent de diverses manières [3]:

- Vers la source d'alimentation du convertisseur, pouvant affecter la qualité du réseau électrique.
- Vers la charge alimentée par le convertisseur, risquant de perturber son fonctionnement.
- Par rayonnement dans l'environnement proche, bien que cette part soit généralement plus faible.

Face à ces enjeux, la communauté scientifique et technique s'est mobilisée, donnant naissance à un domaine d'étude spécifique : la compatibilité électromagnétique (CEM) en électronique de puissance. Les objectifs de ce domaine sont multiples :

- Limiter la génération de perturbations par les convertisseurs.
- Mieux contrôler et minimiser les effets indésirables de ces perturbations.
- Développer des solutions et des directives de conception applicables à l'échelle industrielle.

Pour répondre à ces objectifs, nous proposons une étude approfondie structurée en trois chapitres distincts :

**Chapitre 1** : Ce chapitre inaugural offre une présentation détaillée des concepts fondamentaux de la compatibilité électromagnétique. Il explore en profondeur l'origine

## Introduction générale

des perturbations électromagnétiques spécifiques à l'électronique de puissance et analyse leurs divers chemins de propagation. Cette partie pose les bases théoriques essentielles à la compréhension des enjeux traités dans les chapitres suivants.

**Chapitre 2** : Le deuxième chapitre se concentre sur l'examen des solutions existantes et émergentes pour atténuer les perturbations électromagnétiques en électronique de puissance.

**Chapitre 3** : Le chapitre final est consacré à une étude approfondie basée sur la simulation numérique. Il commence par l'identification et la caractérisation des perturbations électromagnétiques conduites hautes fréquences générées par :

- Un pont redresseur non commandé.
- Un hacheur série.
- L'association redresseur-hacheur.

Suite à cette analyse, nous proposons et évaluons une solution optimisée pour minimiser ces perturbations. Les résultats de nos simulations sont rigoureusement validés en les confrontant aux normes actuelles de compatibilité électromagnétique, spécifiquement celles applicables au mode conduit haute fréquence.

Pour finir, notre mémoire se termine par une conclusion générale de notre étude.

# *CHAPITRE I*

*Fondements de la Compatibilité Électromagnétique*

## I Introduction

En effet, tous les systèmes électriques et électroniques sont soumis à des perturbations qui proviennent de l'énergie parasite qui franchit d'une manière non intentionnelle leurs frontières, cette énergie parasite est appelée perturbation électromagnétique. Les perturbations électromagnétiques deviennent de plus en plus gênantes pour les systèmes électriques et/ou électroniques. Ces perturbations peuvent être aussi une source de perturbations pour les systèmes voisins ou les autres utilisateurs du même système. Ceci donne naissance à une discipline nommée la compatibilité électromagnétique (CEM) [1].

À l'heure actuelle, la CEM des systèmes électriques et électroniques revêt une importance capitale. La CEM examine la capacité des équipements électriques à coexister harmonieusement, sans provoquer d'interférences électromagnétiques. Les sources d'interférences peuvent être multiples, nécessitant des stratégies de mitigation variées. Pour réguler les émissions d'interférences électromagnétiques et assurer la compatibilité entre différents appareils, un ensemble de normes et de régulations a été élaboré à l'échelle mondiale. Ces normes établissent les limites admissibles d'émissions électromagnétiques et précisent les méthodes de test à suivre. Les produits électroniques font l'objet de tests de CEM afin de confirmer leur conformité aux normes de compatibilité électromagnétique en vigueur.

### I.1 La compatibilité électromagnétique

La compatibilité électromagnétique (CEM) c'est la science qui étudie le fonctionnement correct d'un système électrique ou électronique en présence d'autres systèmes dans son environnement et on dit qu'un appareil ou un système électrique ou électronique est compatible électro- magnétiquement avec son environnement proche ou la lointain, si son fonctionnement n'est pas altéré par les perturbations électrique et magnétique générées par ce dernier. Réciproquement, l'environnement ne doit pas être perturbé par l'appareil ou le système, si tout fonctionne correctement, il y a une compatibilité électromagnétique (CEM) [2].

En vrai, il existe toujours un niveau de perturbations électromagnétique émis par l'appareil ou le système électrique, il devra alors être inférieur à un certain seuil prédéfini par les normes de compatibilité électromagnétique [2].

D'un autre côté, l'appareil ou le système doit montrer une immunité, c'est à dire qu'il doit pouvoir supporter un niveau de perturbations minimal sans entraîner de dysfonctionnements.

L'étude en CEM comprend donc [3]:

- 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.

#### I.1.1 Exemples de problèmes CEM

Les problèmes pris en compte par la CEM sont nombreux, en voici quelques-uns :

- L'usage du téléphone portable peut nuire au bon fonctionnement de certains appareils, c'est pourquoi il est strictement interdit dans les hôpitaux, les stations-service, les avions.
- Une automobile moderne contient plus d'un kilomètre de fils électriques, elle se comporte comme une antenne qui émet et capte des ondes E.M.

## I.2 Les perturbations électromagnétiques

Tout phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif ou d'un système [4]. Une perturbation électromagnétique peut être un bruit, un signal non désiré ou une modification du milieu propagations lui-même. Le champ électrique s'exprime en V/m, son émission est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée. Le champ magnétique s'exprime en A/m. Son émission est engendrée par un circuit bas impédance parcouru par un courant  $i$  [5].

Un problème de perturbation EM met en jeu trois éléments (figure I.1) :



**Figure I.1 :** Transmission des perturbations

### I.2.1 Source

Tout appareil, qui émet une perturbation électromagnétique, est qualifié de source. Parmi les principales causes de perturbations, on cite : la distribution d'énergie électrique, les ondes hertziennes, les décharges électrostatiques et la foudre [6].

#### I.2.1.1 Classification des sources de perturbations

Les sources des perturbations électromagnétiques peuvent être classées selon :

- Nature des perturbations.
- La fréquence du signal perturbateur.
- La durée du signal perturbateur.
- Support de transmission.

##### I.2.1.1.1 Classification des sources de perturbations suivant leur nature

Les perturbations peuvent être classées sous deux formes, les sources artificielles et les sources naturelles [3].

**I.2.1.1.1 Sources naturelles**

Les sources naturelles des perturbations EM sont des sources d'origine externe exprimées en termes de rayonnement sous forme de champs électromagnétiques permanents et transitoires. Ces perturbations elles proviennent de phénomènes électrostatiques et de phénomènes aléatoires, peuvent agir sur les caractéristiques des systèmes de télécommunication mobile. Parmi les sources de ces bruits on trouve :

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

**I.2.1.1.2 Sources artificielles**

Les sources des perturbations industriels sont diverses, elles sont générées par les installations de l'activité industrielle électrique ou domestique (lignes électriques, dispositifs de commutation, moteurs, etc...). Ces perturbations régulières sont plus importantes que les perturbations d'origine naturelle, elles prennent les formes continues dues aux équipements fonctionnant en régime permanent ou les formes impulsives dues aux équipements perturbés en régime transitoire.

**I.2.1.1.2 Classification des sources de perturbations suivant leur fréquence**

Les perturbations électromagnétiques peuvent également être classées selon la valeur de la fréquence du signal perturbateur. Deux catégories de perturbations existent, les perturbations basses fréquences (BF) et perturbations hautes fréquences (HF) [3].

**I.2.1.1.2.1 Perturbations basses fréquences**

Les perturbations BF pour une plage de fréquences inférieures de 1 à 5 MHz. Ces perturbations se propagent essentiellement sous forme conduite par câble. Elles sont souvent de longues durées (quelques dizaines de ms). L'énergie conduite peut être importante se traduisant, en plus du dysfonctionnement, par un risque de destruction du matériel.

**I.2.1.1.2.2 Perturbations hautes fréquences**

Les perturbations HF pour une plage de fréquences supérieures à 30MHz. Ces perturbations se propagent essentiellement dans l'air sous forme rayonnée. Elles sont caractérisées par un front de montée très court (<10ms). L'énergie conduite est faible et se traduit par le risque de dysfonctionnement du matériel environnant.

**I.2.1.1.3 Classification des sources de perturbations suivant la durée****I.2.1.1.3.1 Perturbations permanentes**

Ce sont les perturbations provenant essentiellement [3]:

- D'émetteur radio (par rayonnement direct, ou par induction sur les câbles).
- Du champ magnétique généré par les lignes d'alimentation.



- De la déformation de la tension de l'alimentation (harmoniques, ondulation DC...).

En général, dans la réglementation, l'immunité de l'appareil doit être suffisante pour éviter une dégradation de fonction au-delà de la spécification pendant l'exposition à ce type de perturbations.

#### **I.2.1.1.3.2 Perturbations transitoires**

Ce sont des perturbations provenant essentiellement [3]:

- De décharges électrostatiques.
- D'ondes de foudre.
- De commutations électriques dans le réseau d'énergie.
- De creux de tension.

#### **I.2.1.1.4 Classification des sources de perturbations selon leur support de transmissions**

Les perturbations électromagnétiques sont aussi classées selon leur mode de propagation. Ce dernier sera abordé dans la section I.4.3.

### **I.2.2 Victime**

L'élément perturbé caractérisé par sa susceptibilité ou son immunité, peut être un système électrique ou organisme vivant, Pour un système électrique les effets des perturbations électromagnétiques peuvent aller d'un simple dysfonctionnement à la destruction des composants les plus sensibles. Pour les organismes vivants, les tissus exposés à un fort rayonnement peuvent subir un échauffement qui peut entraîner la mort des cellules [3].

### **I.2.3 Couplage**

Le couplage est le chemin de transmission des perturbations électromagnétiques de la source vers la victime [6]. L'identification du mode de transmission des perturbations est l'élément essentiel à la bonne analyse des phénomènes de la CEM [1].

Le couplage des perturbations s'opère de deux manières distinctes : par conduction ou par rayonnement.

1. Les perturbations conduites impliquent la transmission du signal à travers un conducteur en utilisant des matériaux conducteurs comme vecteur.
2. Les perturbations rayonnées sont transmises par une onde électromagnétique (champ électrique, champ magnétique, champ électromagnétique) et utilisent comme support les milieux diélectriques. Regarde la figure I.4.

Dans le premier cas les perturbations interviennent soit en mode commun (MC) soit en mode différentiel (MD). Dans le second cas les perturbations sont rayonnées soit en mode couplage champ lointain soit en mode couplage champ proche [1].

### I.2.3.1 Couplage par conduction

#### I.2.3.1.1 Mode commun

Le mode commun (noté MC) ou mode parallèle (mode asymétrique) correspond souvent à un mode parasite. Sa tension est définie comme étant égale à la valeur moyenne de la tension entre les différents fils et la masse. Le courant de mode commun se divise entre les différents fils de liaison dans le même sens comme indique la figure I.2. Il est égal au courant qui s'écoule à la masse [7].

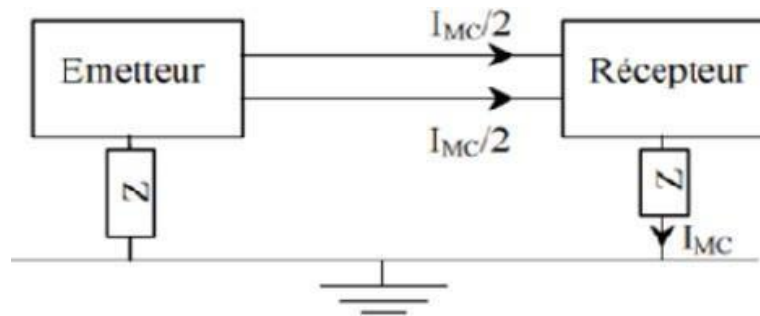


Figure I.2 : Mode commun

#### I.2.3.1.2 Mode différentiel

Les signaux utiles sont généralement transmis en mode différentiel (noté MD), appelé aussi mode série (mode symétrique). Le courant différentiel se boucle sur les deux fils de liaison. Il circule en sens opposé sur chacun des fils comme indique la figure I.3 [7].

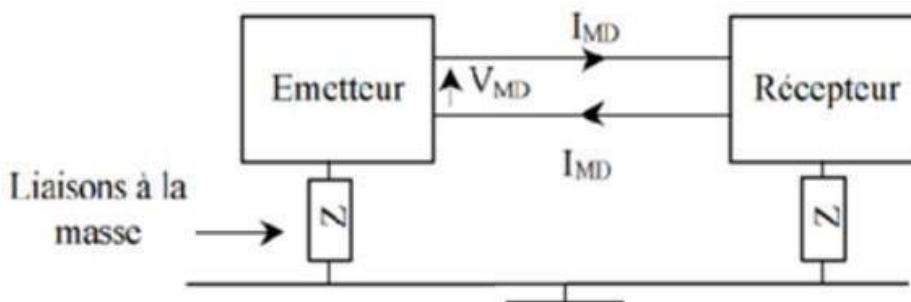


Figure I.3 : Mode différentiel

I.2.3.2 Couplage par rayonnement

Les circuits électriques, lorsqu'ils sont soumis à des différences de potentiel donc parcourus par des courants, produisent des champs électromagnétiques dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la nature, la fréquence et de la distance par rapport à la source. En basses fréquences, c'est le champ magnétique qui pose problème qu'il soit impulsif ou entretenu, il est habituellement généré au voisinage immédiat des victimes. En hautes fréquences, les parasites sont plus redoutables et leurs effets sont plus inquiétants en transitoire.

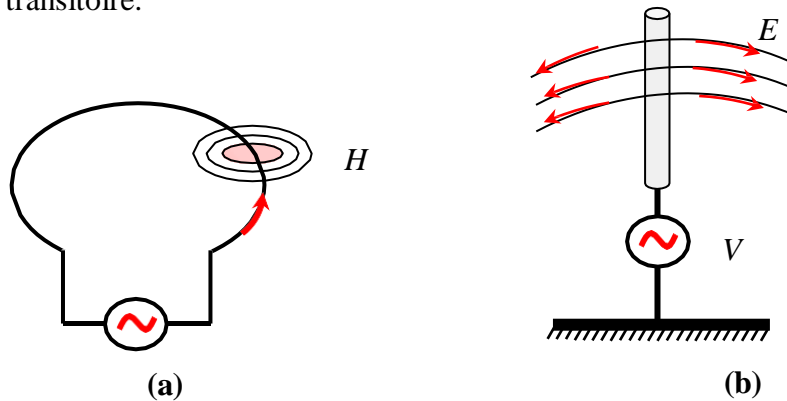


Figure I.4 : Emissions en champ magnétique (a) et en champ électrique (b)

On distingue deux champs [3] :

Le champ dit proche où les deux champs (champ magnétique et champ électrique) sont faiblement liés : un des champs est plus important que l'autre.

Le champ dit lointain où l'onde électromagnétique est plane : les deux champs (champ magnétique et champ électrique) sont fortement liés.

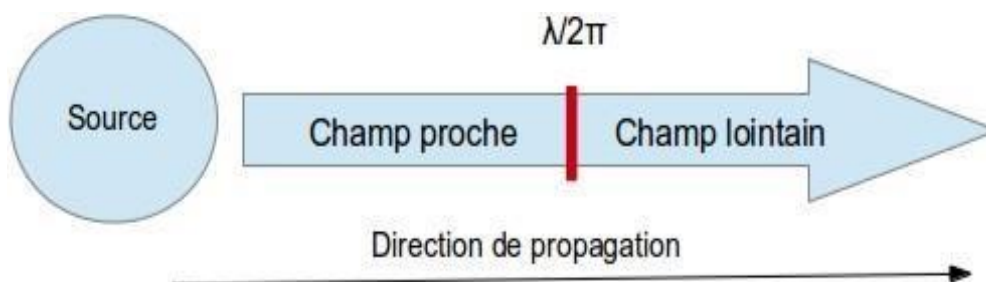


Figure I.5 : Champ proche et champ lointain

### I.2.3.2.1 La zone de champs proche

Dans la zone proche de l'émetteur où la fréquence est faible, le champ électrique et le champ magnétique sont découplés et agissent indépendamment les uns des autres et sont mesurables et se calculent séparément [8].

### I.2.3.2.2 La zone de champs lointaine

Dans la zone lointaine de l'émetteur ( $> \lambda/6$ ), où la fréquence est élevée, le champ électrique et le champ magnétique sont perpendiculaires à la fois entre eux et à la direction de propagation. Leur mesure et leur calcul se font d'une manière couplée. Ils forment une onde électromagnétique [8].

## I.3 Types de perturbations

Les principaux acteurs de perturbation sont :

### I.3.1 Les harmoniques

Dans de nombreux cas, le courant consommé par les charges n'a plus une forme de sinusoïde pure. La distorsion en courant implique une distorsion de la tension dépendant également de l'impédance de source. Les perturbations dites harmoniques sont causées par l'introduction sur le réseau électrique de charges non-linéaires comme les équipements à base d'électronique de puissance (variateurs, convertisseurs statiques, gradateurs de lumière, postes de soudure). Plus généralement, tous les matériels incorporant des redresseurs et des électroniques de découpage déforment les courants et créent des fluctuations de tension sur le réseau de distribution basse tension. C'est la concentration de nombreux pollueurs en harmoniques qui génère énormément de perturbations sur le réseau [3].

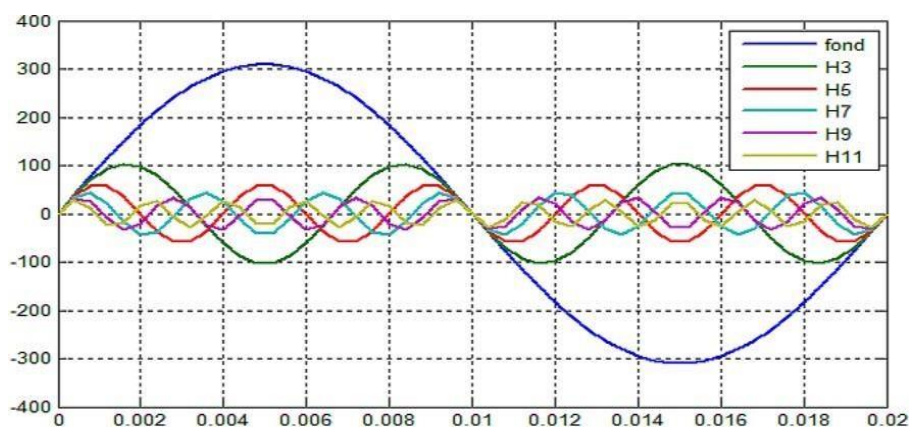


Figure I.6 : Fondamental et harmoniques

### I.3.2 Les variations de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source autonome (groupe électrogène). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport.

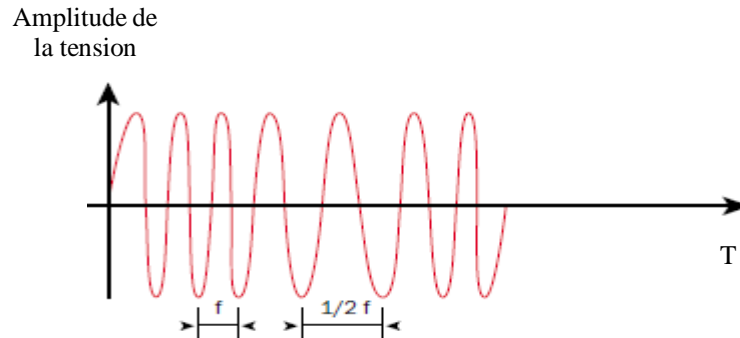


Figure I.7 : Variation de fréquence

### I.3.3 Les fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques (aléatoires) de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de  $\pm 10\%$  et se produisant sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants [3]. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareils dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensités, visibles au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de  $1\%$  de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé Flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.8.

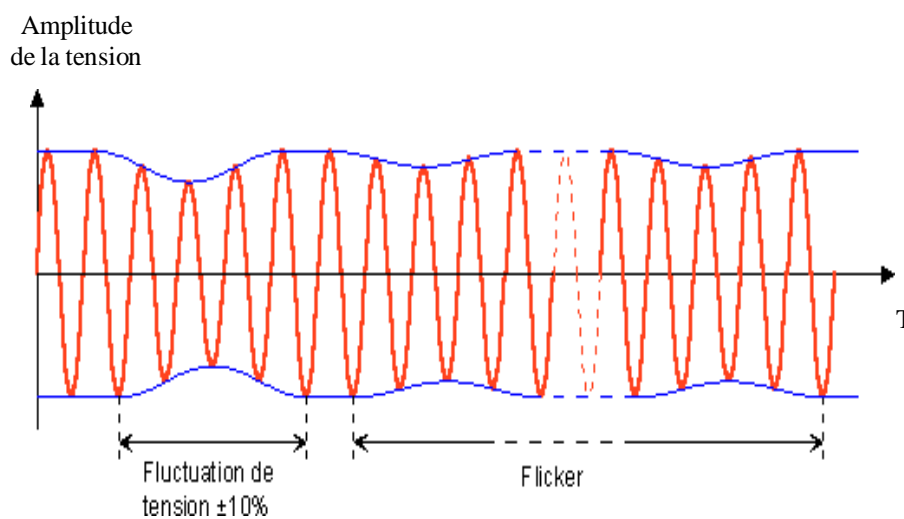


Figure I.8 : Fluctuation de tension –Flicker

### I.3.4 Les creux de tension et les coupures brèves

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension. Il est caractérisé par sa profondeur et sa durée. La norme européenne EN 50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée d'une demi-période à 50 Hz soit de 10 ms jusqu'à 1 mn [3].

Les coupures longues sont supérieures à 3 mn. Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution.

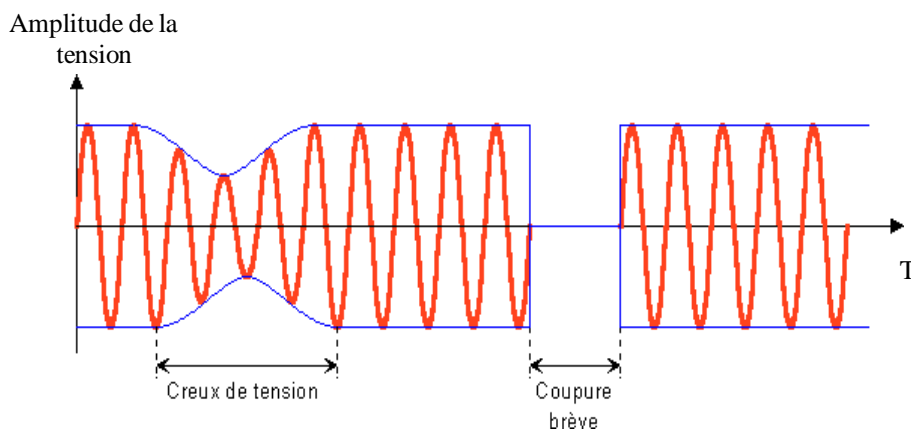


Figure I.9 : Creux de tension et coupures brèves

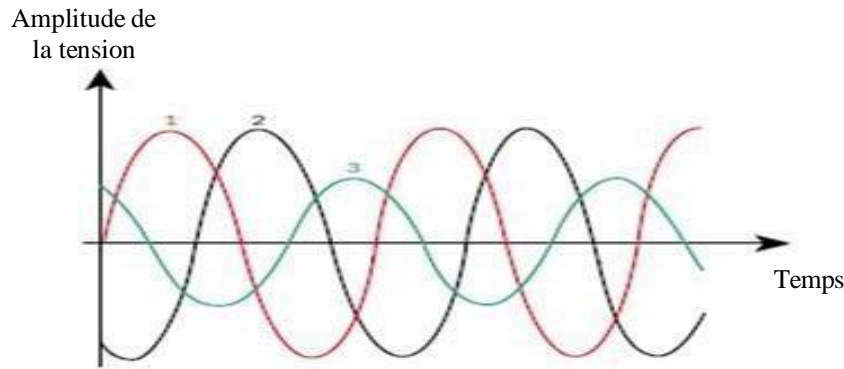
### I.3.5 Les surtensions

On parle de surtension dès lors que la tension appliquée à un équipement sort d'un gabarit probablement défini. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts-circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. Elles peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions ou par des manœuvres sur le réseau. Elles se caractérisent généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires.

### I.3.6 Le déséquilibre de tension

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et sont déphasées de  $\pm 120^\circ$ . Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré. Le déséquilibre est généralement dû à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques [3].

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$ . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont.



**Figure I.10 :** Déséquilibre de tension

### I.3.7 Composante continue dans les réseaux alternatifs

Dans les réseaux alternatifs, la présence de certaines charges telles, que des redresseurs, peut engendrer une composante continue [3].

### I.3.8 Rayonnement des lignes d'énergie

Les caténaïres, en traction électrique, et les lignes HT aériennes sont des antennes longues et efficaces de champ magnétique. La boucle rayonnante est la surface entre le conducteur allé et le conducteur retour. Une ligne de  $20\text{ kV}$  supporte typiquement un courant nominal de  $500\text{ A}$  et une ligne de  $400\text{ kV}$  environ  $2\text{ kA}$ . Le champ rayonné par une ligne longue est inversement proportionnel avec le carré de l'éloignement  $D$  (distance du point d'observation par rapport à la ligne). Cette décroissance, qui reste rapide, est toutefois plus lente que pour les sources localisées [3].

### I.3.9 L'enclenchement et le court-circuit des lignes aériennes

Un phénomène sévère en basse fréquence peut apparaître lors du réenclenchement d'une ligne électrique aérienne à haute tension en défaut. Une ligne longue à vide génère en son extrémité une surtension pouvant atteindre deux fois la tension nominale. Sur une ligne en court-circuit, un courant oscillatoire s'établit entre les conducteurs « aller » et « retour ». L'effet d'un tel phénomène est d'induire une tension dans chaque boucle de masse. Pour une ligne de  $20\text{ kV}$ , la tension crête induite peut atteindre  $1\text{ kV}$  crête dans un cas défavorable.

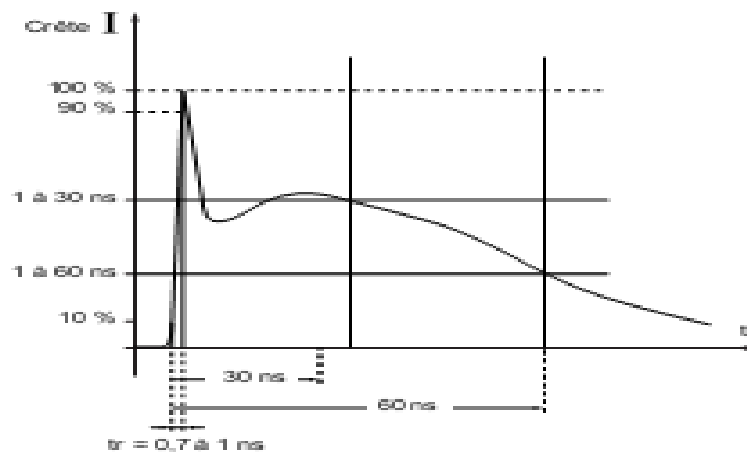
### I.3.10 Décharges électrostatiques

Une décharge électrostatique est un passage de courant électrique d'un objet vers un autre objet ayant un potentiel électrique différent. Ce phénomène se déroule d'une manière

imprévisible et momentanée. En génie électrique, ce terme est employé pour qualifier les courants indésirables qui peuvent endommager les équipements et dont les conséquences sont souvent irréversibles.

Les décharges électrostatiques sont caractérisées par :

- Une très faible durée du temps de montée de l'impulsion 1 ns.
- Durée de l'impulsion 60 ns.
- Caractère isolé du phénomène : 1 décharge.
- Une tension très élevée à l'origine de la décharge (2 à 15 kV)



**Figure I.11** : Décharge électrostatique

### I.3.11 Le court-circuit

Un court-circuit sur une ligne d'alimentation se traduit par plusieurs effets. En conduction, la tension de la ligne tombe à zéro durant le temps d'élimination du défaut. L'équipotentialité de l'installation devient mauvaise durant le temps d'élimination d'un défaut phase-masse. Par ailleurs, le courant de court-circuit génère un champ transitoire sensiblement supérieur au champ nominal. En fin l'action d'un organe de coupure peut créer des impulsions à front raide (en haute tension) ou des surtensions [3].

### I.3.12 Courant de mode commun des convertisseurs statique

Tout convertisseur à découpage (alimentation à découpage, convertisseurs continu-continu, variateur de vitesse...) génère des courants de mode commun HF entre l'entrée d'alimentation et la sortie. La meilleure solution pour réduire ces courants HF est de filtrer tous les câbles du convertisseur par des filtres HF [3].

### I.3.13 Manœuvres d'appareils de coupures

L'amorçage d'un arc dans le vide ou dans le SF6 s'accompagne d'un rayonnement sévère. On estime qu'à 1 m d'un conducteur soumis à un arc sous 10 kV on atteint un champ de l'ordre de 5 kV/m crête. L'amplitude de ce champ est proportionnelle à la tension avant l'arc [3].



## I.4 La CEM en l'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 [3], le principe des convertisseurs est d'assurer une transformation de l'énergie électrique par découpage à des fréquences usuellement de 100 Hz à quelques centaines de kHz et temps de commutation classiquement supérieurs à 100 ns, alors que les circuits numériques dédiés au signal présentent des temps de transition souvent inférieurs à 5 ns. [9].

Les « $di/dt$ » vont créer des impulsions brèves de tensions aux bornes des inductances parasites ou de connexions et par suite perturber par couplage dit par impédance commune les circuits sensibles utilisant les mêmes conducteurs dénommés bus de puissance.

Les « $dv/dt$ » vont créer des impulsions très brèves de courant dans les capacités parasites diverses (couplage carte à châssis par exemple) et occasionner, de même que précédemment. Des perturbations dans les cartes de contrôle-commande.

Dans le contexte de l'électronique de puissance, les aspects CEM vont revêtir trois particularités essentielles, à savoir :

- Les convertisseurs sont à la fois agresseurs et victimes :
  1. Agresseurs principalement par les phénomènes liés aux commutations de la structure de puissance.
  2. Victimes parce que leur carte de contrôle-commande, généralement numérique ou hybride, est auto perturbée par la partie puissance, les perturbations extérieures issues de l'environnement naturel et industriel pouvant également intervenir, mais de manière moindre.
  3. Les convertisseurs sont généralement des perturbateurs (agresseurs) sous la plupart des formes envisagées dans les normes CEM, à savoir :
    1. Les perturbations conduites BF ( $< 2 \text{ KHz}$ ), c'est le cas par exemple des convertisseurs à fréquence réseau.
    2. Les perturbations conduites HF ( $9 \text{ KHz}$  à  $30 \text{ MHz}$ ), qui concernent pratiquement tous les convertisseurs du fait des commutations.
    3. Les perturbations rayonnées ( $30 \text{ MHz}$  à  $1 \text{ GHz}$ ) telles que les perturbations émises par les alimentations à découpage.
- Les ondes temporelles des tensions et courants des convertisseurs de l'électronique de puissance peuvent être classées en plusieurs catégories :
  1. Les ondes périodiques des convertisseurs de puissance à fréquence industrielle, tels que les redresseurs et les gradateurs à contrôle de phase dont les fréquences des signaux sont des multiples de  $50 \text{ Hz}$ .
  2. Les ondes périodiques des convertisseurs de puissance à fréquence de découpage supérieure à  $15 \text{ KHz}$ .

3. Les ondes périodiques des convertisseurs utilisés dans les alimentations à découpage de petite puissance à fréquences comprises entre 30 et 200 KHz.
4. Les signaux numériques des cartes de contrôle-commande des convertisseurs (fréquences en MHz).

**I.4.1 Classification des émissions des convertisseurs statiques**

Soit la classification en tableau 1, selon les fréquences et leurs limites de plage correspondant aux normes en émission [2] :

**Tableau 1** : classification des perturbations par les fréquences

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

**I.4.2 Effets des perturbations électromagnétique dans les convertisseurs statiques (Exemple)**

La compatibilité électromagnétique appliquée au cas de l'électronique de puissance concerne trois niveaux d'environnement du convertisseur. La figure I.12, précise cette hiérarchie [15] :

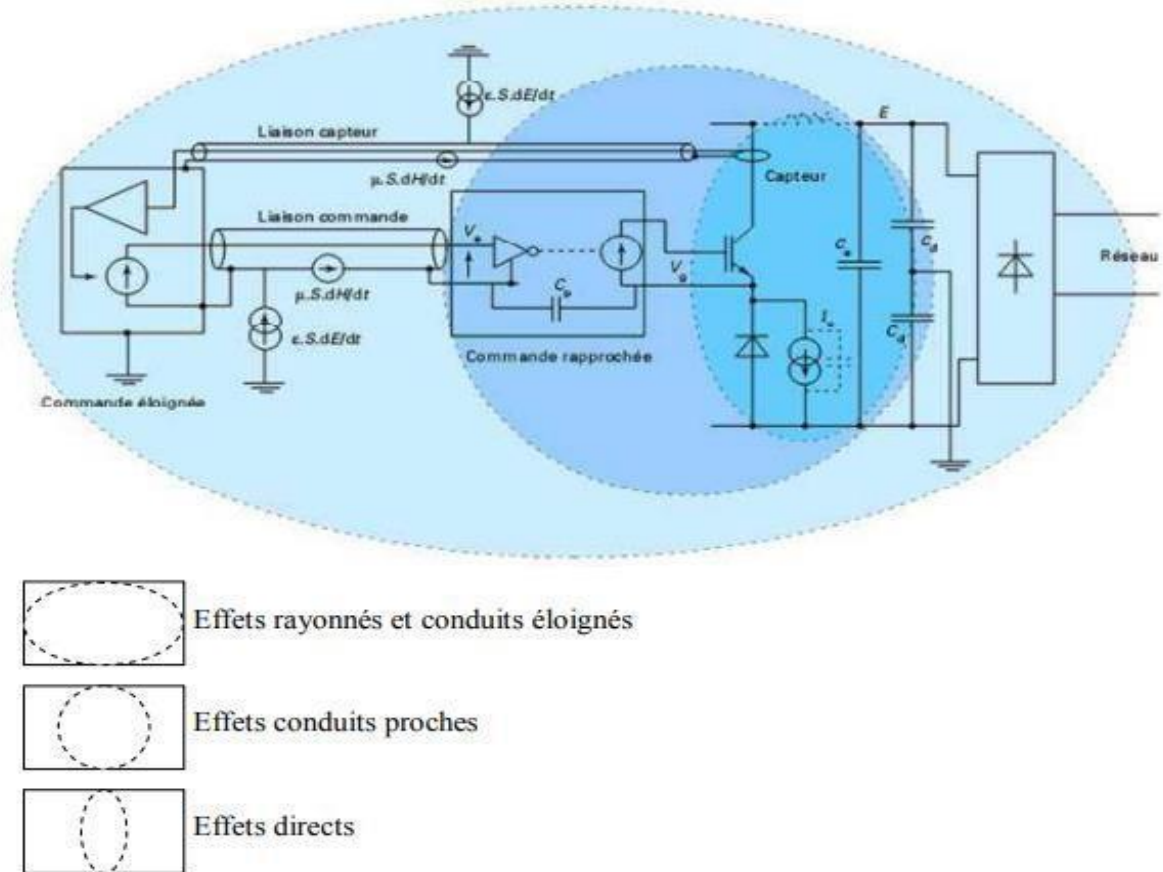


Figure I.12 : Trois niveaux d'environnement CEM du convertisseur

Le premier niveau d'évaluation se concentre sur les impacts directs sur la structure de puissance, les semi-conducteurs et les composants passifs.

Le deuxième niveau concerne l'environnement électrique proche qui assure les fonctions de commande du convertisseur, Ce niveau est très sensible à la fiabilité et la sûreté de fonctionnement du système. Les perturbations résultent de la circulation de courants de mode commun dans les circuits de commande mais aussi de couplages rayonnée proches.

### I.5 Normalisation

La directive CEM, définit les principes généraux. C'est les organismes normalisateurs qui s'occupent de la normalisation et préparent les normes. Les principaux organismes normalisateurs sont [8] :

- CISPR : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.
- CEI : Commission Electrotechnique Internationale à Genève.
- CENELEC : Comité Européen de Normalisation Electrotechnique à Bruxelles.

### I.5.1 Les types de normes en CEM

En CEM il y'a trois types de documents de normes [1]:

- Les normes fondamentales.
  - Les normes génériques.
  - Les normes de produits ou de familles de produits.
- ✓ Les normes fondamentales : Ce sont des normes ou guides définissant de manière générale les prescriptions relatives à la CEM (phénomènes, essais ...). Elles sont applicables à tous les produits et servent de référence, notamment aux comités devant élaborer des normes spécifiques. Les normes fondamentales ne seront pas harmonisées au niveau Européen.
  - ✓ Les normes génériques : Ces normes définissent les exigences essentielles en termes de niveau à tenir par type d'essais empruntés aux normes fondamentales. En l'absence de norme de produits ou famille de produits, elles s'appliquent à tout produit installé dans un environnement défini.
  - ✓ Les normes de produits ou de familles de produits : Ces normes définissent, pour des produits ou familles de produits donnés, les dispositions constructives, caractéristiques, méthodes et niveaux d'essais applicables. Lorsqu'elles existent, Les normes de produits ont une précédences sur les normes de familles de produits.

#### I.5.1.1 Normes basses fréquences

Ces normes font référence aux limites d'émissions basse fréquence (harmoniques) des différents types d'équipements du réseau. Par conséquent, les équipements électriques doivent respecter des limites d'amplitude harmonique clairement définies. Les normes basse fréquence sont élaborées par des groupes d'experts internationaux représentant les fabricants et les utilisateurs d'équipements, ainsi que des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialisés dans des domaines considérés [3].

#### I.5.2 Normes hautes fréquences

Dans cette section, nous décrivons les critères de spécification des niveaux d'émission HF conduits. Parmi les normes pertinentes, nous pouvons citer : la norme EN61000, la norme EN55011 et la norme EN55022. Ces spécifications se divisent en deux catégories. La première, dite "Classe A", définit les niveaux d'émission des équipements destinés à être utilisés dans le secteur industriel. Le second est réservé au secteur domestique et hospitalier (appareils de classe B). Ces dernières sont plus strictes que les spécifications prévues pour les équipements de classe A. La figure I.13 montre les limites d'émissions conduites imposées par ces normes respectivement [7].

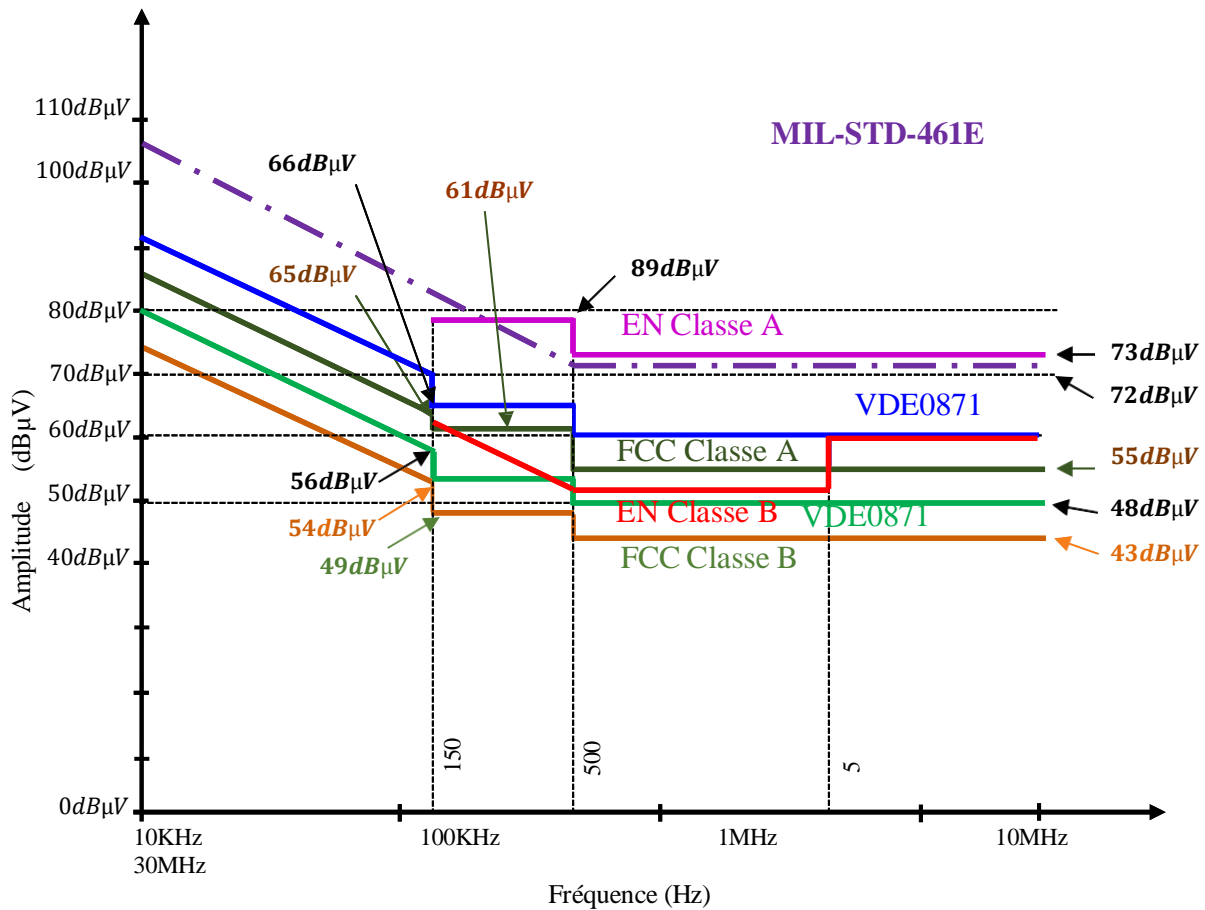


Figure I.13 : Limites relatives aux émissions conduites

### I.6 Conclusion

La compatibilité électromagnétique (CEM) revêt une importance primordiale dans tous les domaines de l'électricité, en particulier dans l'électronique de puissance. Ses implications sont vastes et touchent à la fois la fiabilité, la conformité réglementaire, la sécurité, les performances et les économies de coûts des systèmes électriques. En garantissant une conception et des tests appropriés pour assurer une bonne CEM, les entreprises peuvent prévenir les interférences électromagnétiques nuisibles et les conséquences coûteuses qui en découlent. Dans le chapitre suivant, nous nous pencherons en détail sur les diverses stratégies et techniques visant à réduire les perturbations électromagnétiques spécifiques à l'électronique de puissance. Cette analyse approfondie présentera un éventail de solutions.

# *CHAPITRE II*

*Stratégies de Réduction des Perturbations  
Électromagnétiques*

## II Introduction

La réduction des perturbations électromagnétiques est indispensable pour plusieurs raisons importantes. Limiter les champs électromagnétiques peut contribuer à prévenir les risques pour la santé et l'environnement. De plus, cela permet de garantir le bon fonctionnement des équipements électrique / électroniques.

La meilleure solution est souvent supprimer la source de perturbations, bien que parfois difficile. Désensibiliser un récepteur est souvent difficile, par ce qu'on ne possède généralement pas beaucoup d'information sur les perturbations reçues par cet équipement, d'autre part, il faut toujours s'assurer qu'une deuxième victime ne se trouvera pas, près de l'émetteur de perturbations entraînant le coût d'une deuxième protection. Le choix de l'action dépend de la facilité de mise en œuvre et/ou du coût associé.

### II.1 Principe de la protection en CEM

Au cœur de la CEM, la conception de moyens de protection joue un rôle essentiel, tant dans le domaine industriel que dans la recherche. La protection en CEM vise à découpler le système sensible (la victime) de son environnement électromagnétique. Cela implique l'identification des éléments susceptibles de nuire au bon fonctionnement de l'élément victime et de les éliminer, ou du moins de les éloigner électriquement et magnétiquement.

Théoriquement, trois types de protection sont envisageables :

- Action directe sur l'élément perturbateur
- Action sur l'élément perturbé
- Action sur le moyen de couplage

En pratique, lors de la définition de la stratégie de protection, des considérations technico-économiques sont prises en compte. L'industriel opte souvent pour un compromis entre le coût de la protection et les dégâts potentiels en cas d'agression électromagnétique.

#### II.1.1 Action directe sur l'élément perturbateur

Ce type de protection s'applique lorsque l'on a accès à la source de perturbation (perturbation artificielle). Dans ce cas, la protection consiste à réduire l'intensité des signaux perturbateurs à un niveau admissible imposé par les normes CEM, en vue d'assurer une cohabitation harmonieuse entre l'élément perturbateur et son environnement. Deux moyens de protection couramment utilisés dans ce contexte sont le blindage des parties rayonnantes de l'élément perturbateur et le filtrage électrique [3].

#### II.1.2 Action sur l'élément perturbé

Lorsque la perturbation est inaccessible (comme dans le cas de perturbations atmosphériques, par exemple), l'action sur l'élément à protéger devient nécessaire. Cela implique de doter l'élément de toutes les mesures nécessaires pour le rendre résistant à son environnement, telles que le blindage et le filtrage [3].

### II.1.3 Action sur le moyen de couplage

Le troisième moyen de protection consiste à réduire le phénomène de captation des signaux parasites par les lignes et câbles, ainsi que leur acheminement vers les charges [3].

## II.2 Réduction des perturbations en électronique de puissance

Les perturbations électromagnétiques (PEM) dans l'électronique de puissance représentent un défi majeur pour la fiabilité et la performance des systèmes. Pour cette raison, la minimisation de ces perturbations est primordiale.

### II.2.1 Perturbations en mode conduit

#### II.2.1.1 Solutions adoptées en basses fréquences

Pour résoudre les problèmes engendrés par les charges non linéaires, en particulier la génération de perturbations à basse fréquence, diverses solutions peuvent être envisagées. Ces solutions peuvent être classées en deux catégories. Les méthodes de dépollution traditionnelles, qui ont fait leurs preuves au fil du temps, et les méthodes de dépollution modernes, qui intègrent des approches plus contemporaines pour aborder ces problématiques spécifiques. Choisir la méthode la plus appropriée dépendra des exigences spécifiques du système électrique et des objectifs visés en matière de qualité de l'énergie électrique.

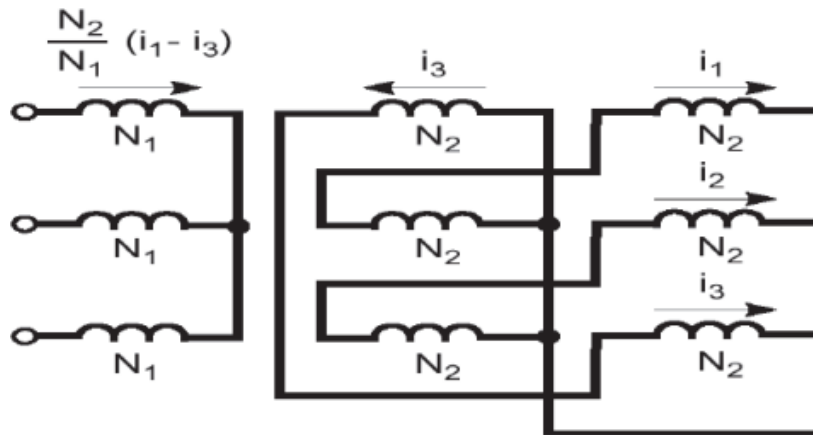
##### II.2.1.1.1 Méthodes de dépollution traditionnelles

Elles représentent une réponse pratique et rapide pour résoudre certains types de perturbations. Ces méthodes s'appuient sur l'utilisation de composants passifs tels que les inductances, les condensateurs et les transformateurs et/ou branchements qui modifient la configuration de l'installation électrique. En adoptant ces approches, on cherche à influencer le schéma électrique global afin d'atténuer ou de neutraliser les perturbations indésirables, offrant ainsi une solution accessible et efficace pour améliorer la qualité du système électrique concerné.

###### II.2.1.1.1.1 Transformateur à couplage spécial

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques [10].





**Figure II.1 :** Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3

#### II.2.1.1.1.2 Inductances série

L'utilisation d'une inductance série pour réduire les perturbations électromagnétiques basse fréquence est une pratique courante et efficace. Est une solution utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevés puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés.

#### II.2.1.1.1.3 Filtrage passif

Diverses solutions ont été élaborées pour rendre les installations industrielles et le réseau moins sensibles aux perturbations basses fréquences, notamment les harmoniques. Le filtrage passif des harmoniques est la solution la plus fréquemment adoptée en raison de leur coût modéré et de leur efficacité élevée. Cette approche vise à offrir aux courants harmoniques un chemin de faible impédance, les incitant ainsi à les traverser plutôt que de remonter vers la source. Les filtres peuvent être dimensionnés pour un seul harmonique ou pour une bande plus large en fonction des besoins. Ils se composent généralement d'une inductance  $L$  et d'un condensateur  $C$ , sont traditionnellement utilisés pour absorber les harmoniques générés par des charges industrielles non linéaires

#### II.2.1.1.1.4 Le filtre résonant

Le filtre résonant est formé d'un condensateur monté en série avec une inductance, placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. À la fréquence d'accord, l'impédance de cet ensemble est très faible, agissant comme un court-circuit pour l'harmonique visé. Son utilisation peut être complexe, et ses performances sont sensibles aux caractéristiques du réseau auquel il est connecté.

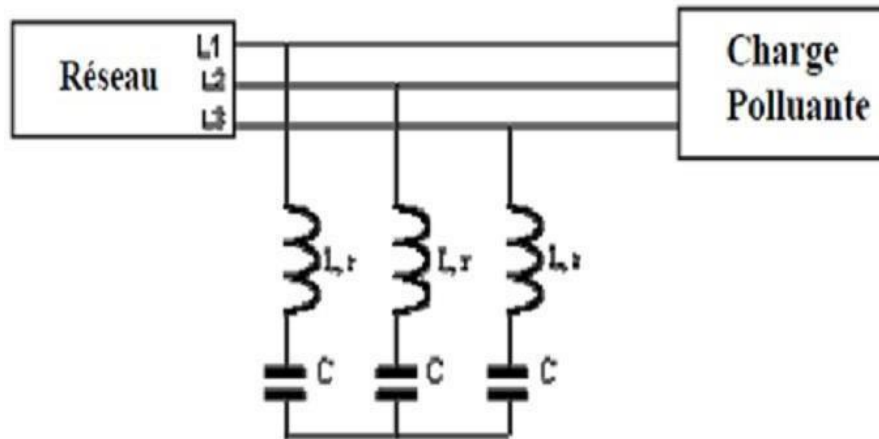


Figure II.2 : Branchement d'un filtre résonant

#### II.2.1.1.5 Le filtre amorti

Un filtre amorti se compose de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance, appelée résistance d'amortissement, en série avec une capacité. Ce type de filtre est employé lorsque des performances moins élevées sont requises. Ils sont spécifiquement utilisés pour filtrer les fréquences les plus élevées du spectre plutôt qu'une fréquence particulière [3].

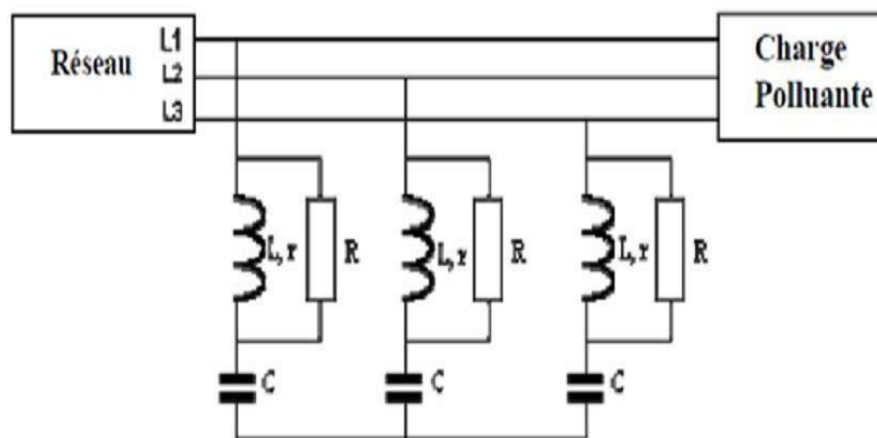


Figure II.3 : Branchement d'un filtre amorti

#### II.2.1.1.2 Méthodes de dépollution modernes

Les méthodes classiques de dépollution ne sont plus adaptées à l'évolution constante des réseaux électriques et des charges à protéger, comme indiqué précédemment. Pour relever ces défis, des solutions modernes ont émergé, offrant des réponses plus efficaces que les approches traditionnelles. Ces solutions reposent sur l'utilisation de dispositifs d'électronique de puissance, parmi lesquels on trouve les filtres actifs, les redresseurs dodécophasés, les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal et les alimentations sans interruption. Dans la suite, nous examinerons les principes fondamentaux de chacune de ces solutions, mettant en lumière leur capacité à surmonter les limitations des méthodes plus anciennes.

### II.2.1.1.2.1 Filtrage actif

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance, entièrement, commandables, les thyristors, les GTO et les IGBT et en particulier, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal ont permis de développer un moyen moderne et efficace d'élimination des perturbations harmoniques : le filtre actif ou compensateur actif d'harmoniques. Un filtre actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution harmonique (Figure II.4). A la différence, un conditionneur actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution de plusieurs perturbations telles que les chutes de tension, les déséquilibres..., incluant le traitement harmonique [3].

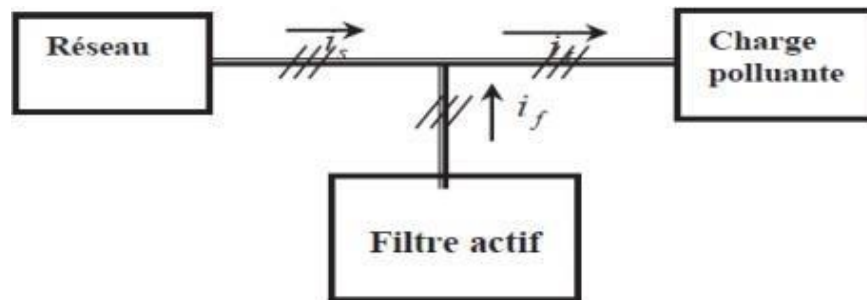


Figure II.4 : Principe de connexion d'un filtre actif

### II.2.1.1.2.2 Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle (Figure II.5) peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son indépendance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables [11].

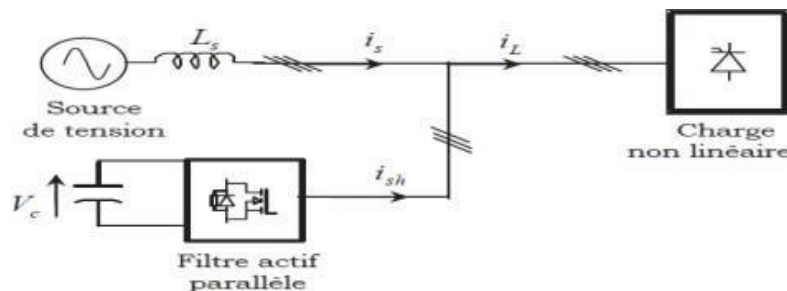


Figure II.5 : filtre actif parallèle

### II.2.1.1.2.3 Filtre actif série

Ce type de compensateur connecté en série sur le réseau de distribution se comporte comme une source de tension harmonique qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source. Il s'oppose, également, à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau rendant sinusoïdale la tension aux bornes de la charge polluante. Son rôle d'isolateur empêche les courants Harmoniques de remonter vers le réseau [12]. Dans ce cas, le filtre protégé les installations sensibles des perturbations provenant du réseau tel que les

harmoniques, les surtensions et les déséquilibres. Si la charge génère des courants harmoniques, le filtre série ne permet pas de corriger ces courants et en cas de court-circuit de la charge, le compensateur doit supporter toute la tension du réseau et tout le courant de court-circuit. D'où, un moyen de protection s'avère dispensable qui lui compense soit les courants harmoniques consommés par la charge Ou par la distorsion de tension déjà présente sur le réseau [12]. Le montage est représenté à la figure II.6.

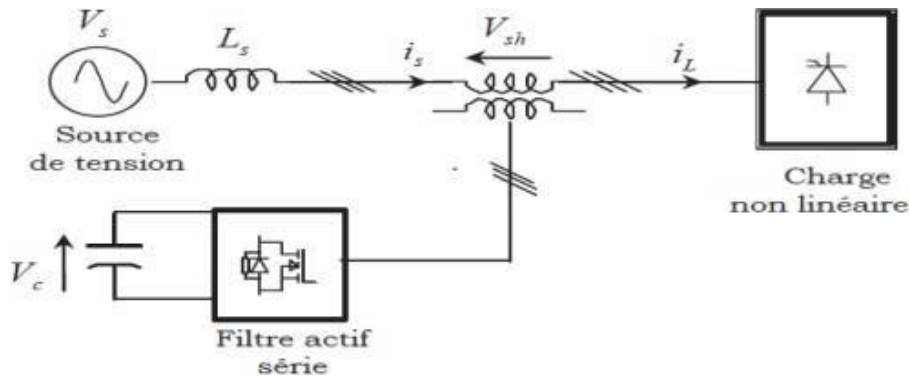


Figure II.6 : filtre actif série

#### II.2.1.1.2.4 Filtre actif hybride parallèle-série

Il s'agit d'une solution de compensation universelle reposant sur le fonctionnement simultané des filtres actifs en parallèle et en série. Cette nouvelle configuration est désignée sous le nom de combinaison parallèle-série active ou « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). L'UPQC combine de manière synergique les avantages des filtres actifs en parallèle et en série. Le filtre actif en série, positionné en amont du filtre actif en parallèle, contribue à dépolluer la source des tensions perturbatrices. En revanche, lorsque placé en aval, il permet d'isoler la charge du côté de la source perturbée [11]. Cette approche intégrée offre une solution robuste et efficace pour améliorer la qualité de l'énergie électrique dans diverses configurations de systèmes électriques.

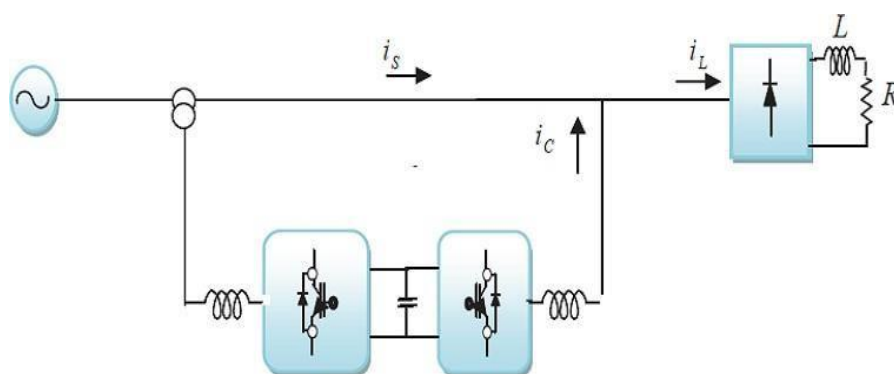


Figure II.7 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

### II.2.1.1.2.5 Filtre actif hybride active-passive

Il est pertinent de souligner l'existence de diverses combinaisons mixtes de filtres actifs, cette fois-ci associés à des filtres passifs. Ces dispositifs ont été élaborés dans l'objectif d'optimiser le rapport performance/coût. Trois configurations majeures peuvent être évoquées :

- Filtre actif série combiné a des filtres passifs parallèle
- Filtre actif série connecté en série avec des filtres passif parallèle
- Conditionneur actif de puissance

### II.2.1.1.2.6 Ponts redresseurs dodécophases

Les ponts dodécophasés représentent des convertisseurs statiques composés de deux ponts redresseurs hexaphasés montés en série. Ces ponts font usage de transformateurs à trois enroulements (12 ou 24 impulsions) ou de deux transformateurs à deux enroulements (12 impulsions). Dans les deux configurations, les secondaires des transformateurs présentent un déphasage de  $30^\circ$ . L'avantage notable de cette approche réside dans le fait que du côté du réseau, certains harmoniques sont en opposition de phase, ce qui entraîne leur suppression, notamment dans le cas des 12 impulsions. Pour le pont dodécophasé à 24 impulsions, pratiquement tous les harmoniques sont éliminés. Cependant, l'inconvénient majeur de cette solution réside dans l'utilisation d'un nombre important d'interrupteurs de puissance et de transformateurs de conception spéciale, ce qui engendre des coûts élevés. De plus, cette solution ne résout pas les problèmes associés aux charges polluantes présentes sur le marché.

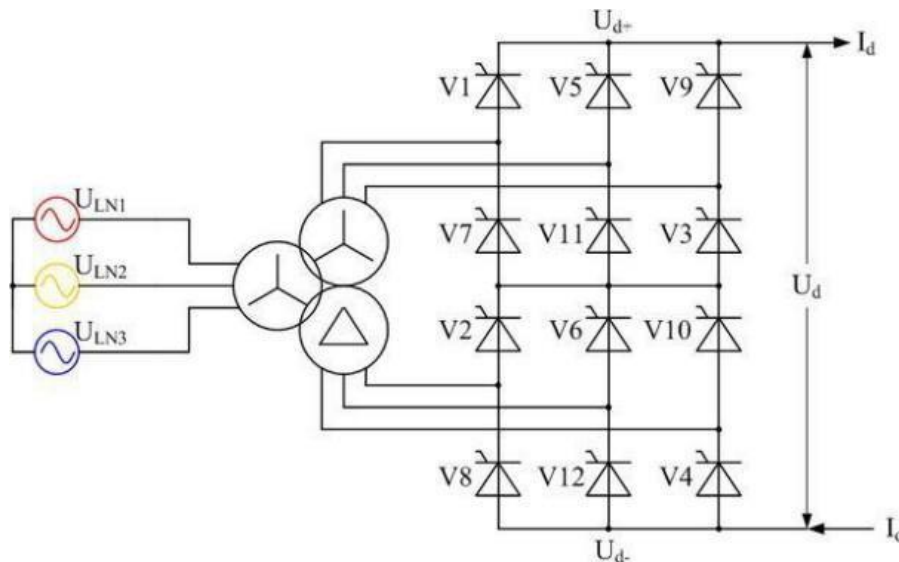


Figure II.8 : Schéma du pont redresseur dodécophasé.

### II.2.1.1.2.7 Convertisseurs à prélèvement sinusoïdal

Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal sont des dispositifs électroniques qui permettent de convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC) qui ressemble à une forme d'onde sinusoïdale. Ils sont utilisés dans de nombreuses

applications, notamment dans les systèmes d'alimentation électrique, les convertisseurs pseudo-sinus et les convertisseurs de tension pur-sinus.

#### II.2.1.1.2.8 Correction du facteur de puissance

À la différence des approches passives, des solutions intégrant des convertisseurs ont été élaborées pour améliorer le facteur de puissance. Le principe du prélèvement sinusoïdal consiste à contraindre le courant circulant dans l'inductance à suivre une référence sinusoïdale redressée, en régulant l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur de puissance. Cette approche garantit l'obtention d'un facteur de puissance unitaire pour le terme fondamental au niveau du réseau. En intégrant des convertisseurs dans le processus, ces solutions actives contribuent significativement à l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes tout en répondant aux normes de qualité du réseau électrique.

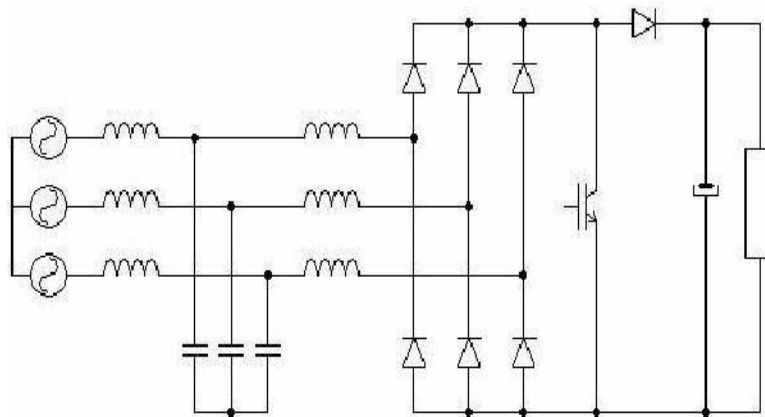


Figure II.9 : Correction du facteur de puissance

#### II.2.1.1.2.9 Redresseurs à commande MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives [13] [11].

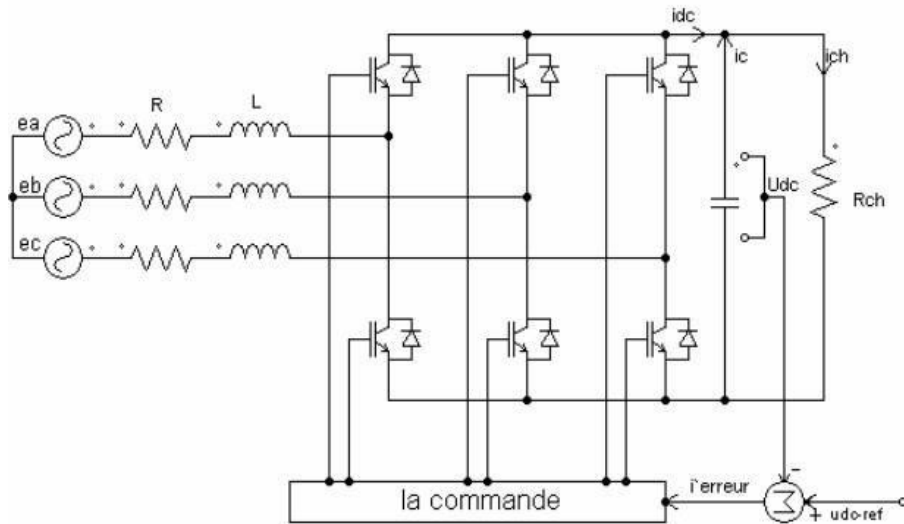


Figure II.10 : Topologie d'un pont redresseur MLI

II.2.1.1.2.10 Redresseurs à injection de courant

Les redresseurs à injection de courant ont émergé au début des années 90 à la suite d'efforts visant à améliorer les performances des convertisseurs AC/DC traditionnels. Ils se composent d'un redresseur triphasé à diodes ainsi que de deux circuits auxiliaires : un circuit de modulation et un circuit de distribution. Le circuit de modulation, en modélant les courants à la sortie du pont à diodes, génère un courant injecté dans le réseau électrique à travers un circuit de distribution [3].

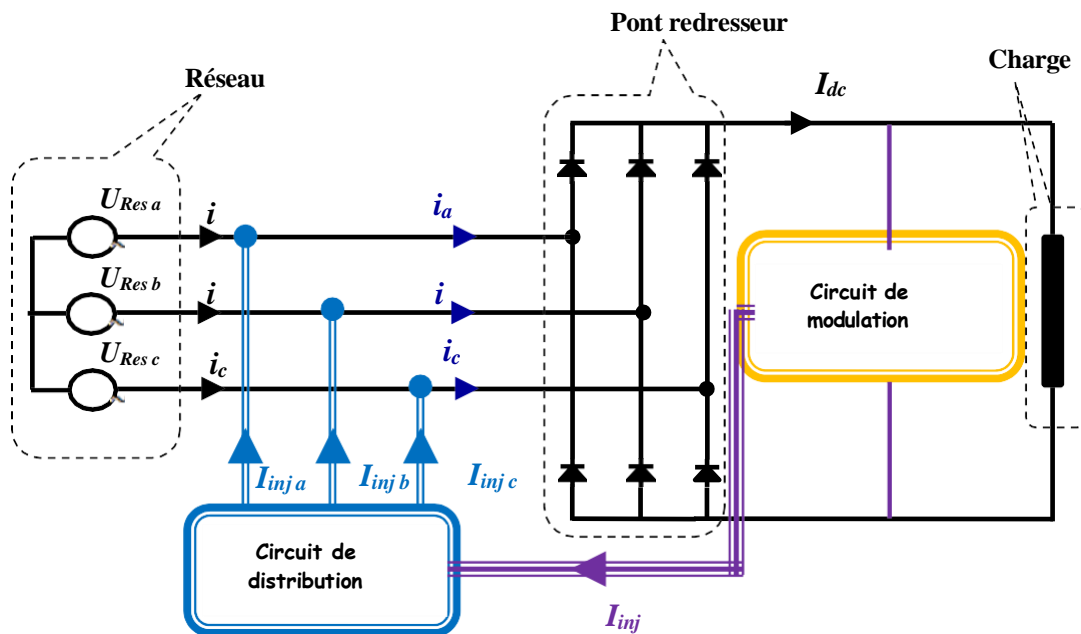
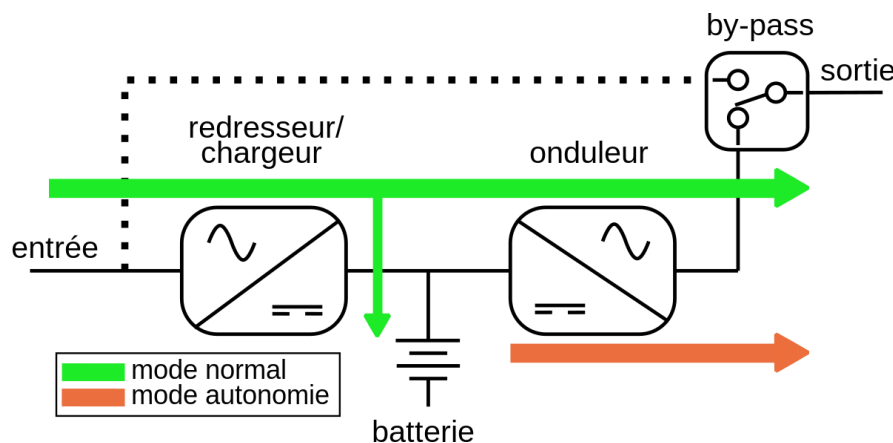


Figure II.11 : Schéma synoptique d'un redresseur triphasé à injection de courant

### II.2.1.1.2.11 Alimentations sans interruption

Une alimentation sans interruption (ASI), est un dispositif essentiel dans le domaine de l'électronique de puissance. Son rôle est de fournir un courant alternatif stable et dépourvu de coupures ou de microcoupures, indépendamment des fluctuations du réseau électrique [14]. Voici comment elle fonctionne :

- Redresseur : Le convertisseur de courant alternatif du secteur transforme l'entrée en courant continu.
- Stockage d'énergie : L'ASI utilise un dispositif de stockage d'énergie, tel qu'une batterie d'accumulateurs, des super condensateurs ou un volant d'inertie.
- Onduleur : Le convertisseur produit ensuite du courant alternatif pour la sortie de l'appareil. Il régénère en permanence la tension fournie par le réseau, permettant une régulation précise de la tension et de la fréquence de sortie.
- Source d'énergie externe : Si l'interruption de l'alimentation électrique se prolonge au-delà de la capacité du dispositif de stockage, une source d'énergie externe (comme un groupe électrogène) peut prendre le relais.



**Figure II.12** : ASI fonctionnant en double conversion

### II.2.1.2 Solutions adoptées en hautes fréquences

Pour déminer les perturbations électromagnétiques conduites à haute fréquence générées par les convertisseurs statiques, une solution consiste à utiliser un filtre CEM passif. Grâce aux outils de simulation, il est envisageable de prévoir la pollution électromagnétique conduite dès les premières étapes de la conception. Parallèlement, une amélioration du design des convertisseurs statiques permet de réduire les perturbations conduites, offrant ainsi la possibilité de diminuer la taille du filtre nécessaire. Cette approche intégrée, alliant conception avancée et utilisation de filtres CEM, contribue à optimiser les performances du système [11]. Dans le chapitre III, nous abordons en détail le filtre CEM passif.





**Figure II.13 :** Exemple d'un filtre CEM

## II.2.2 Perturbations en mode rayonnées

Lorsqu'un circuit électrique est exposé à une différence de potentiel et/ou est traversé par un courant, cela engendre la création d'un champ électromagnétique. Ce champ électromagnétique prend naissance dans le dispositif d'électronique de puissance (les convertisseurs statiques), suite aux variations de tension et de courant lors de la commutation des interrupteurs de puissance. Pour atténuer les perturbations rayonnées par ces dispositifs d'électronique de puissance, deux méthodes peuvent être adoptées [11]:

- En améliorant le processus de commutation de ces éléments.
- Par l'application de techniques de blindage.

## II.3 Conclusion

En conclusion, la réduction des perturbations électromagnétiques est un défi crucial dans la conception et le fonctionnement des équipements d'électroniques de puissance. Heureusement, plusieurs solutions sont disponibles pour atténuer ces interférences et assurer une meilleure compatibilité électromagnétique. En combinant ces différentes approches et en intégrant des techniques de test et de mesure appropriées, il est possible de créer des systèmes électriques robustes et fiables, capables de fonctionner efficacement dans des environnements complexes sur le plan électromagnétique. Le prochain chapitre sera consacré à l'étude des perturbations électromagnétiques conduites hautes fréquences engendrées par les dispositifs d'électronique de puissance (pont redresseur, hacheur et leur association) et à l'examen de la solution préconisée pour atténuer ces perturbations.

# Chapitre 3

Analyse par Simulation et Validation

### III 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].

L'étude des perturbations EM HF générées par les ponts redresseurs monophasés et les hacheurs séries est effectuée à travers des simulations basées sur la méthode indirecte (simulations temporelles suivies d'analyses fréquentielles). Quatre simulations différentes sont effectuées séparément à savoir :

- La simulation d'un pont redresseur monophasé non commandé.
- La simulation d'un hacheur série
- La simulation d'une association redresseur-hacheur
- La simulation d'une association redresseur-hacheur avec un filtre CEM

A noter enfin que les simulations et le traitement de la perturbation est réalisé grâce les logiciels PSpice

#### III.1 Hypothèses liées aux dispositifs

Les modèles couramment employés en électronique de puissance sont basés sur des modèles basses fréquences reposent sur des composants passifs et actifs, c'est-à-dire qu'ils ne prennent pas en compte les éléments parasites tels que la résistance, l'inductance et la capacité. Cependant, à haute fréquence, ces modèles deviennent non plus valables car les éléments parasites influencent 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 convertisseurs statiques sont uniquement sources de perturbations EM,
- Les interrupteurs étudiés des interrupteurs réels.
- La charge étudiée est supposée parfaite,
- Seul le régime permanent est étudié.

#### III.2 Etude de la CEM d'un pont redresseur monophasé non commandé

Les redresseurs sont des convertisseurs électriques qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue. Ils sont utilisés pour alimenter des charges qui nécessitent une tension et un courant continus. Les redresseurs sont réalisés à partir de diodes et de thyristors, qui contrôlent le passage du courant électrique en fonction de la tension d'entrée. Les redresseurs peuvent être classés en plusieurs types, notamment le

redresseur à simple alternance, le redresseur à double alternance et le redresseur triphasé, chacun avec ses propres avantages et inconvénients. Les redresseurs sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles et domestiques, telles que l'alimentation de moteurs à courant continu, des équipements audio-visuels et des systèmes de chauffage. Notre étude est faite sur un redresseur monophasé double alternance

### III.2.1 Considération théorique

Un pont redresseur monophasé à diodes est un circuit électrique constitué de quatre diodes disposées en configuration de pont (figure III.1), formant ainsi deux chemins pour le courant lors de chaque demi-cycle de la tension alternative. Lorsque la tension d'entrée est positive, deux des diodes conduisent, permettant le passage du courant, tandis que les deux autres sont bloquées. Inversement, lors du demi-cycle négatif, les rôles des diodes s'inversent. Cette disposition permet de redresser les deux demi-cycles de la tension AC, fournissant une tension DC pulsée qui peut ensuite être lissée à l'aide de condensateurs ou d'inductances pour obtenir une tension plus stable.

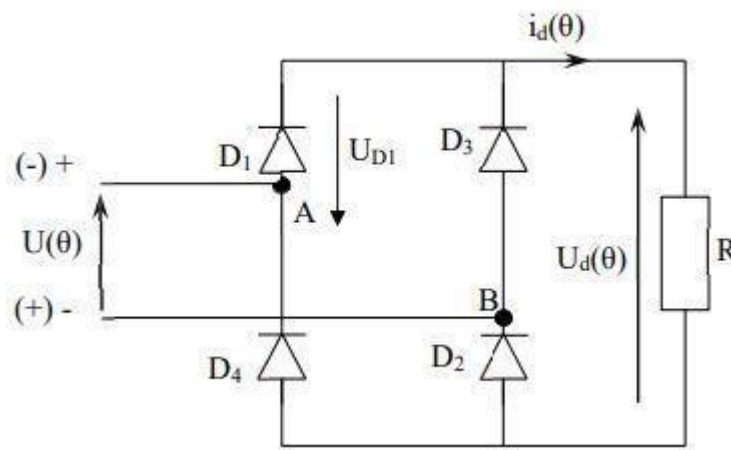


Figure III.1 : Pont redresseur monophasé a diode non commandé avec une charge R

#### III.2.1.1 Réseau de Stabilisation d'Impédance de Ligne

Les courants parasites conduits sont caractérisés par deux modes : le mode commun et le mode différentiel. La mesure de ces courants est réalisée à l'aide du RSIL (Réseau Stabilisé d'Impédance de Ligne). Ce dispositif est placé entre le réseau d'alimentation et l'équipement à tester, par exemple un convertisseur statique, Le RSIL fonctionne comme un filtre passe-haut pour les courants parasites haute fréquence générés par le convertisseur. Ces courants sont alors mesurés aux bornes d'une résistance standard de  $50 \Omega$  [15].

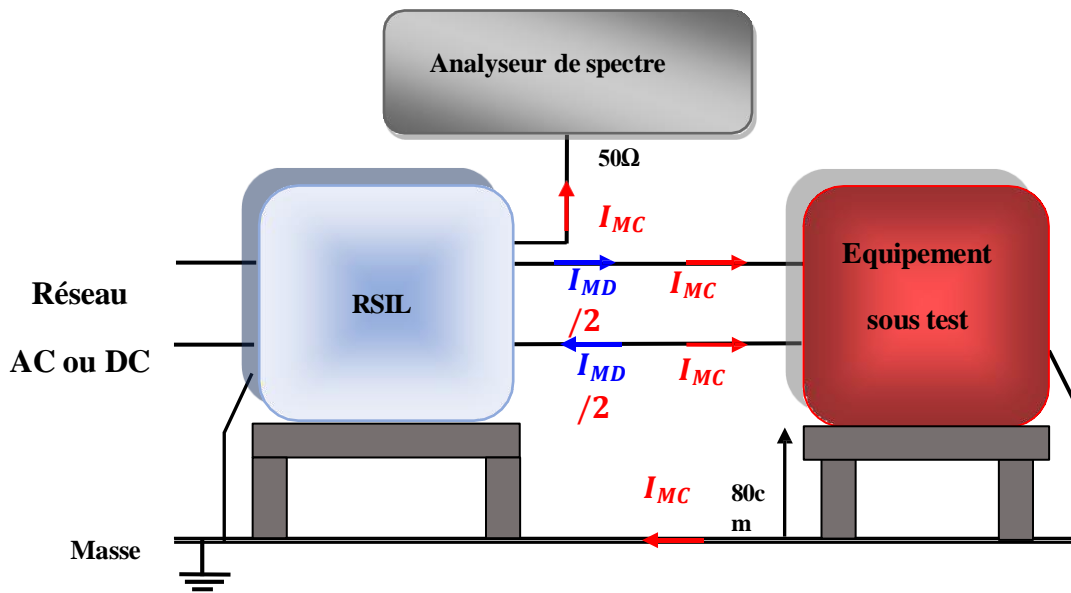


Figure III.2 : Schéma de principe de mesure des perturbations électromagnétiques conduites

Le RSIL agit comme un filtre passe-bas pour les perturbations provenant du réseau électrique auquel il est connecté. La figure III.3 illustre le principe de mesure des émissions en mode conduit. Il existe plusieurs structures de RSIL, chacune étant fixée selon les spécifications des normes CEM relatives aux équipements testés et à leur domaine d'application. Cependant, le point commun à toutes ces structures est l'impédance équivalente normalisée. Dans le cas présent, on utilise le RSIL suivant la norme FCC.

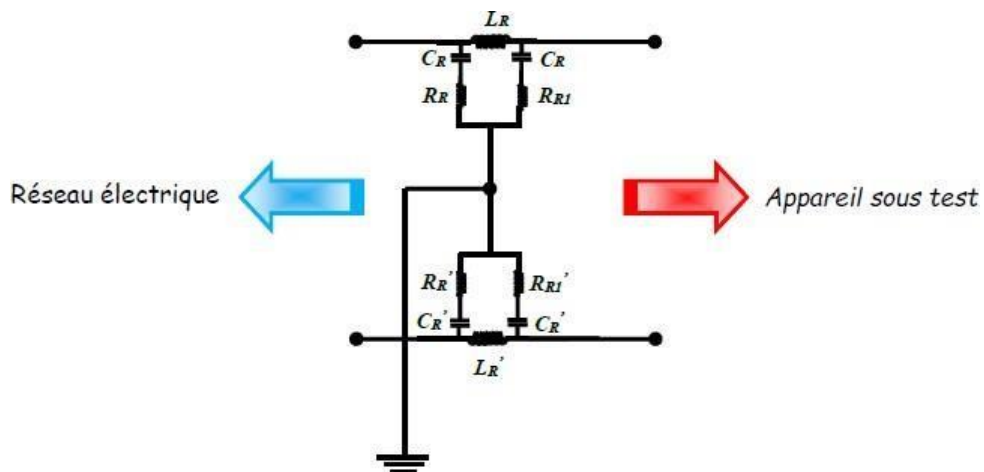


Figure III.3 : Topologie d'un RSIL suivant la norme FCC

**Tableau 2** : Les paramètres du modèle de RSIL

$L_R = L_R$ ( $\mu H$ )	$C_R = C_R$ ( $\mu F$ )	$R_{R1} = R_{R2}$ ( $K\Omega$ )	$R_R = R_R$ ( $\Omega$ )
56	22.5	1	1

### III.2.2 Mise en évidence et simulation des perturbations conduites HF générés par un pont redresseur

Dans cette partie, nous exposons les résultats issus de la simulation d'un redresseur monophasé à pont de diodes, avec pour objectif de mettre en lumière les perturbations électromagnétiques qu'il engendre et transmet au réseau électrique.

Le modèle employé comprend un RSIL monophasé conforme aux exigences de la norme FCC (illustré en figure III.3), intégrant des diodes de type BYT12P-600. Les interconnexions sont représentées par des éléments parasites résistifs et inductifs :  $R_{p1}$ ,  $L_{p1}$ ,  $R_{p2}$  et  $L_{p2}$ . Les interactions parasites entre les dissipateurs thermiques des composants semi-conducteurs de puissance et le plan de référence sont modélisées par les capacités parasites  $C_{p1}$ , tandis que les couplages entre les pistes conductrices et le plan de masse sont symbolisés par les capacités parasites  $C_{p2}$ , comme le montre la figure III.4. Les paramètres de simulation retenus sont compilés dans le tableau 3 :

**Tableau 3** : Les données de simulation du pont redresseur

$U_{RES}$	$f(Hz)$	$R_{RES}$ ( $\Omega$ )	$L_{RES}$ ( $nH$ )	$R_{Ch}$ ( $\Omega$ )	$C_{ch}$ ( $\mu F$ )
220	50	0.4	500	50	900
$L_{P1}$ ( $nH$ )	$L_{P2}$ ( $nH$ )	$R_{P1}$ ( $m\Omega$ )	$R_{P2}$ ( $m\Omega$ )	$C_{P1}$ ( $pF$ )	$C_{P2}$ ( $pF$ )
450	360	1.35	1.10	100	20

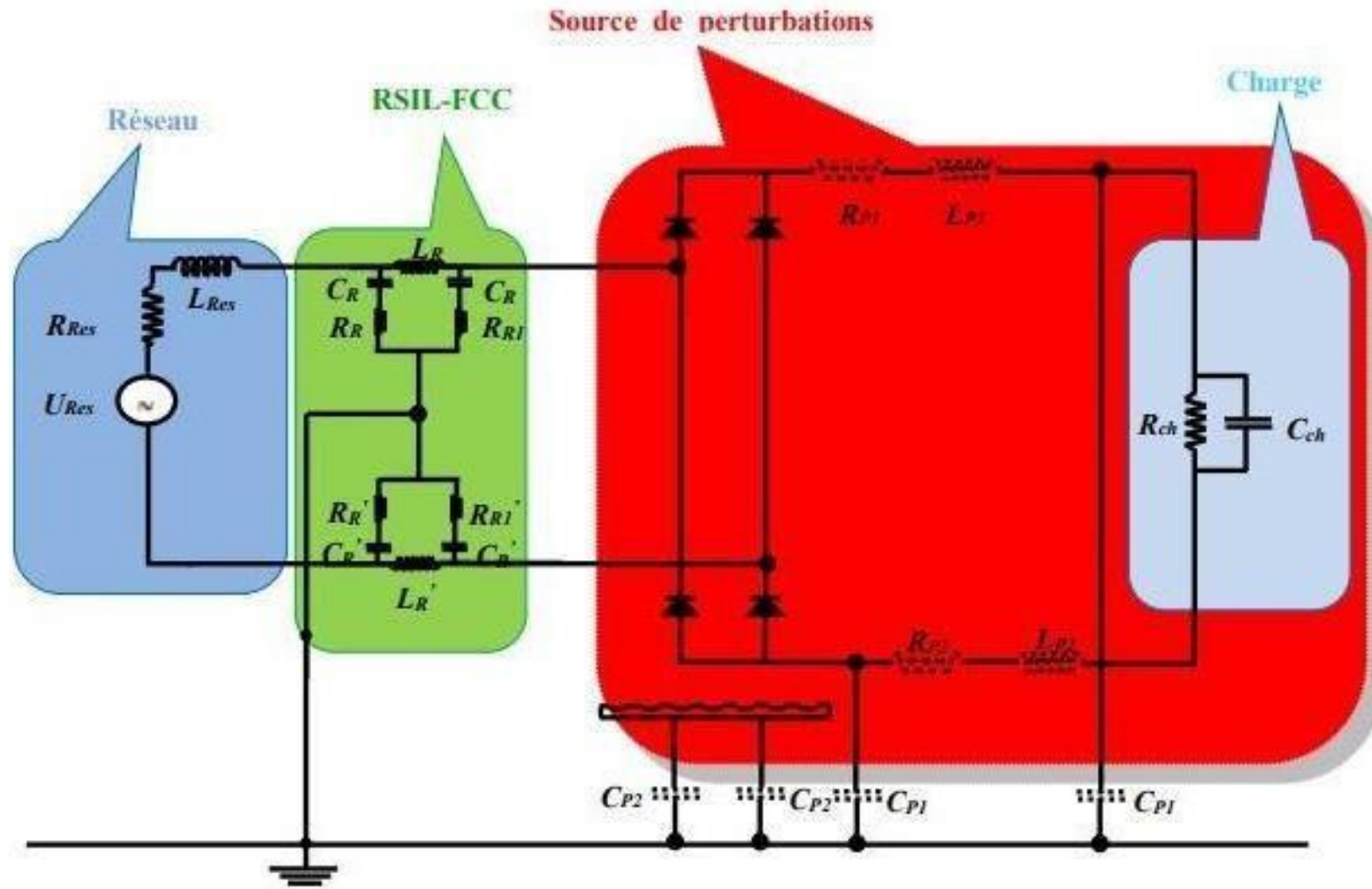


Figure III.4 : Schéma électrique du pont redresseur non commandé monophasé – Modèle hautes fréquences

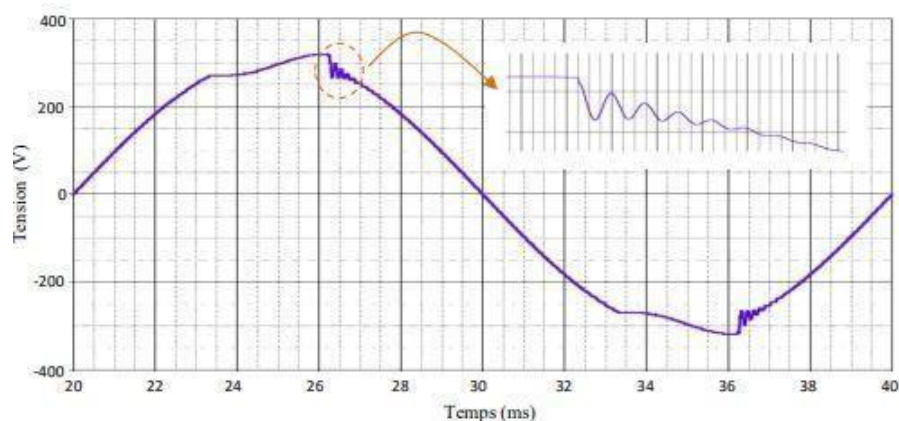
### III.2.2.1 Présentation et analyse des résultats obtenus

Notre analyse des perturbations électromagnétiques générées par le pont redresseur monophasé non commandé s'appuie sur plusieurs représentations graphiques :

1. Comportement temporel (Figures III.5 et III.6) :
  - Evolution de la tension à l'entrée du pont redresseur
  - Variation du courant de ligne
2. Perturbations électromagnétiques totales (Figure III.7) :
  - Représentation temporelle de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL
3. Analyse spectrale des perturbations (Figure III.8) :
  - Spectre fréquentiel des perturbations totales
  - Comparaison avec le gabarit des spécifications de la norme FCC (Title 47, Part 15)

L'analyse des courbes des figures III.5, III.6 et III.7 révèle une distorsion des formes d'onde de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne. Un phénomène oscillatoire de fréquence et d'amplitude significative apparaît lors du blocage des diodes, causé par la coupure brusque du courant due à la commutation des diodes. Ce phénomène oscillatoire est également visible sur la forme d'onde de la tension et du courant d'entrée du pont ainsi que sur la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL, Les figures III.5 et III.6 illustrent les variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé non commandé ainsi que celles du courant de ligne.

Le spectre fréquentiel des perturbations totales sur la résistance équivalente du RSIL montre que le niveau des perturbations ne dépasse pas celui du gabarit imposé par la norme FCC classe A, ce qui est acceptable et ne nécessite pas de mesures de réduction des perturbations. En revanche, dans l'intervalle de 9 kHz à 100 kHz, le niveau des perturbations dépasse celui du gabarit imposé par la norme FCC classe B, nécessitant des mesures de réduction pour les appareils domestiques et médicaux appartenant à cette classe.



**Figure III.5 :** Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur monophasé à diodes



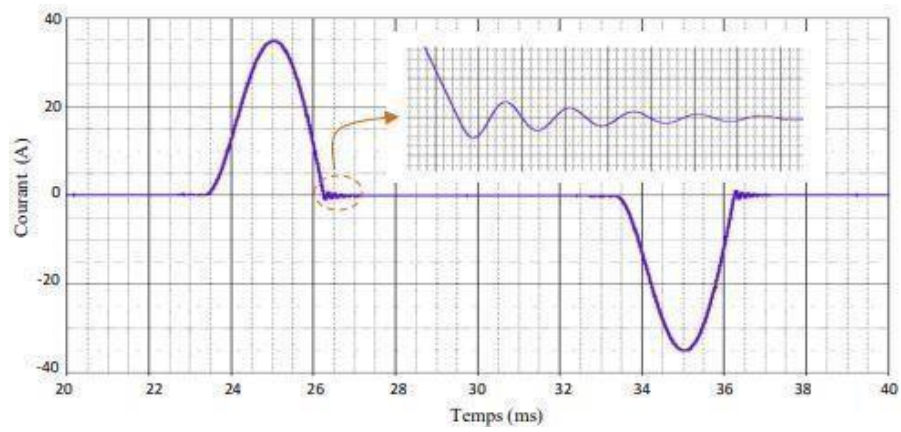


Figure III.6 : Variations temporelles du courant de ligne

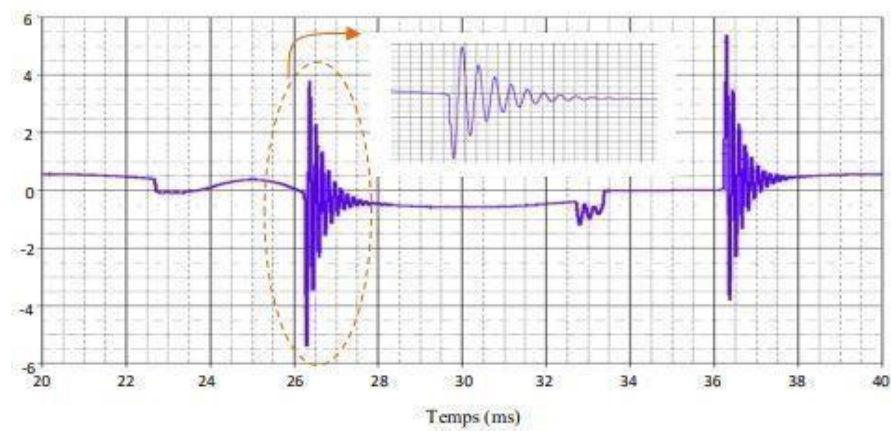


Figure III.7 : Tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL

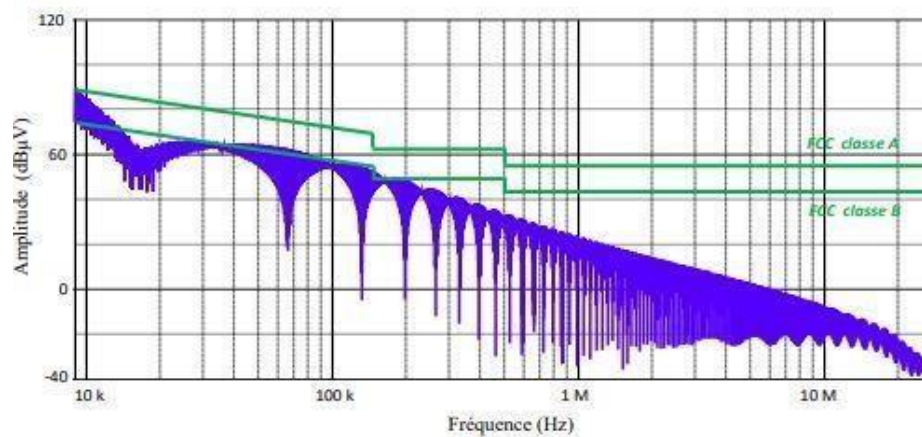


Figure III.8 : Spectre des perturbations totales localisées sur le RSIL

### III.3 Etude CEM d'un hacheur série

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques d'énergie électrique qui permettent de convertir une source d'énergie continue en une autre source continue. Ils sont utilisés pour obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. Les hacheurs peuvent être réalisés à l'aide d'interrupteurs de puissance commandables tels que les thyristors GTO, les transistors bipolaires ou les transistors à effet de champ à grille isolée

Il existe deux configurations de base pour les hacheurs :

1. Hacheur série ou Buck (abaisseur de tension)
2. Hacheur parallèle ou Boost (élevateur de tension)

Le hacheur série, également appelé hacheur dévolteur, est particulièrement intéressant pour cette étude CEM dédiée aux hacheurs.

#### III.3.1 Considération théorique

Un hacheur série est constitué de plusieurs composants essentiels qui permettent de réguler efficacement la tension et le courant dans un circuit à courant continu (DC). Le composant principal est un interrupteur électronique, souvent un transistor MOSFET ou IGBT, qui ouvre et ferme rapidement le circuit pour contrôler la tension moyenne appliquée à la charge. Une diode de roue libre est intégrée pour permettre au courant de continuer à circuler lorsque l'interrupteur est ouvert, évitant ainsi les surtensions. Une inductance (bobine) est utilisée pour lisser les variations de courant, tandis qu'un condensateur filtre les ondulations de tension pour fournir une tension de sortie plus stable. La charge, qui peut être une résistance, un moteur ou un autre dispositif, utilise la puissance fournie par le hacheur. Un circuit de commande, utilisant des signaux de modulation de largeur d'impulsion (PWM), contrôle le fonctionnement de l'interrupteur électronique pour ajuster le rapport cyclique et réguler la tension de sortie. Enfin, des capteurs de courant et de tension mesurent ces paramètres pour permettre au circuit de commande de maintenir la stabilité et l'efficacité du système. La construction d'un hacheur série nécessite une conception soignée pour minimiser les pertes et les perturbations électromagnétiques, assurant ainsi une efficacité optimale et un fonctionnement stable.

Soit le montage suivant avec H est un interrupteur parfait :

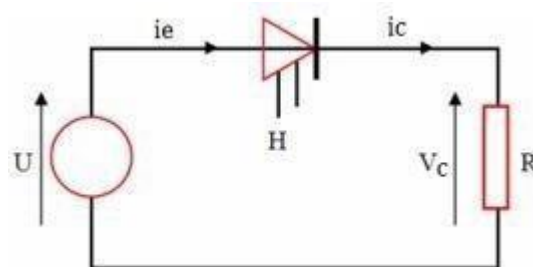


Figure III.9 : Hacheur série avec charge résistive

### III.3.2 Mise en évidence et simulation des perturbations conduites HF générées un hacheur série

Dans cette étude, nous nous concentrons sur les effets perturbateurs d'un hacheur série. Pour cela, nous avons utilisé une méthodologie de simulation similaire à celle utilisée pour étudier les effets perturbateurs des ponts redresseurs.

Le circuit représenté dans la figure III.10 a été simulé sous PSpice pour étudier l'effet perturbateur généré par le hacheur à hautes fréquences. Le transistor MOSFET utilisé dans ce circuit est de type IRFP750. Dans ce circuit :

$L_{p1}$  : représente l'inductance parasite des pistes,

$L_{p3}$  et  $R_{p3}$  : représentent l'inductance et la résistance parasites de connexion des interrupteurs de puissance,

$C_{p1}$  : représente la capacité parasite du couplage entre les pistes et le plan de masse.

$C_{p2}$  et  $C_{p3}$  : sont les capacités parasites entre les radiateurs des interrupteurs de puissance et le plan de masse.

$L_{p4}$  et  $R_{p4}$  : désignent l'inductance et la résistance parasites de connexion de la capacité de découplage.

Les données du circuit simulé sont consignées dans le tableau 4.

**Tableau 4 : Données de simulation**

$E$ (V)	$L_{Sou}$ (nH)	$C_d$ (mF)	$F_C$ (kHz)	$\delta$ (%)
100	10	2,2	100	90
$R_{Ch}$ ( $\Omega$ )	$C_{Ch}$ ( $\mu F$ )	$R_{P2}$ (m $\Omega$ )	$L_{P3}$ (nH)	$L_{P1}$ (nH)
50	900	450	10	50
$R_{P3}$ (m $\Omega$ )	$L_{P3}$ (nH)	$C_{P1}$ (pF)	$C_{P2}$ (pF)	$C_{P3}$ (pF)
40	40	100	20	110

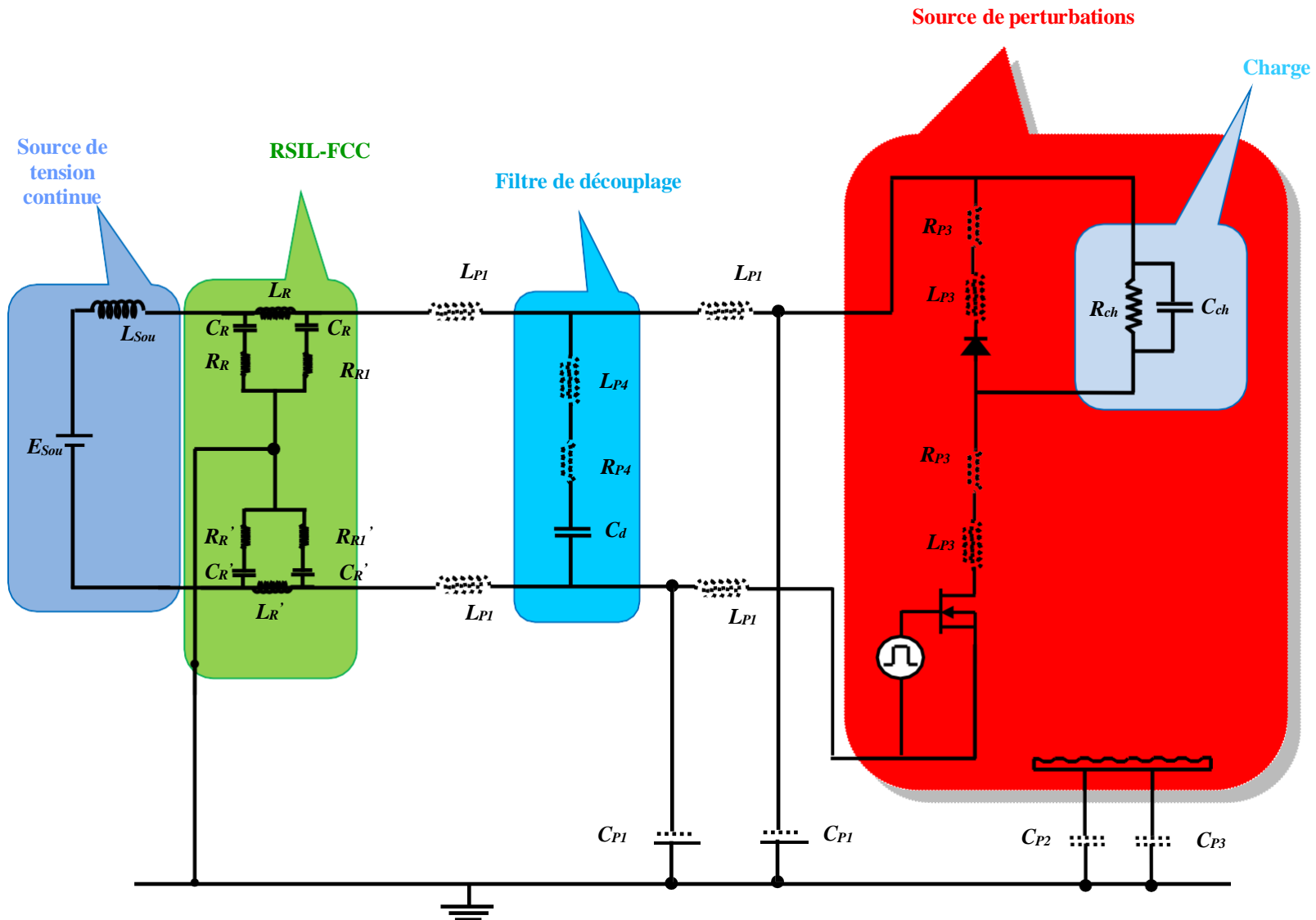
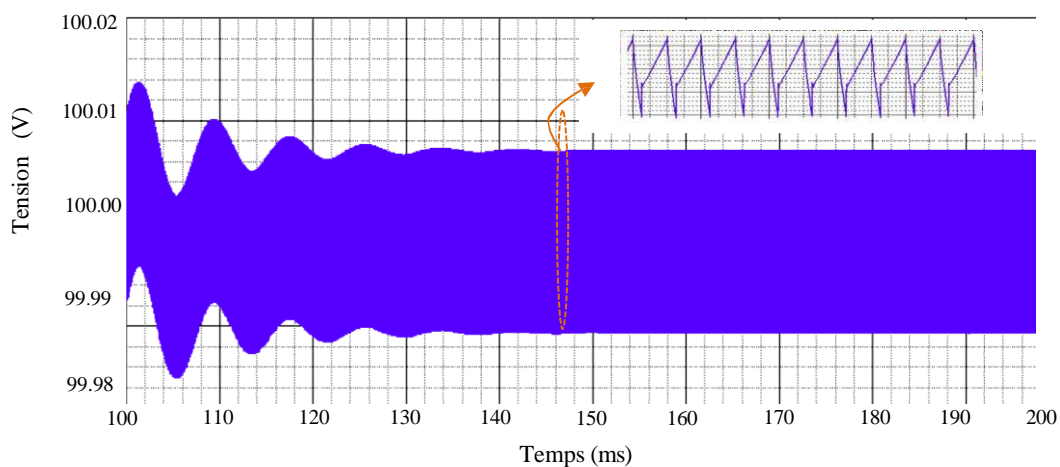


Figure III.10 : Schéma électrique d'un hacheur abaisseur – Modèle hautes fréquences

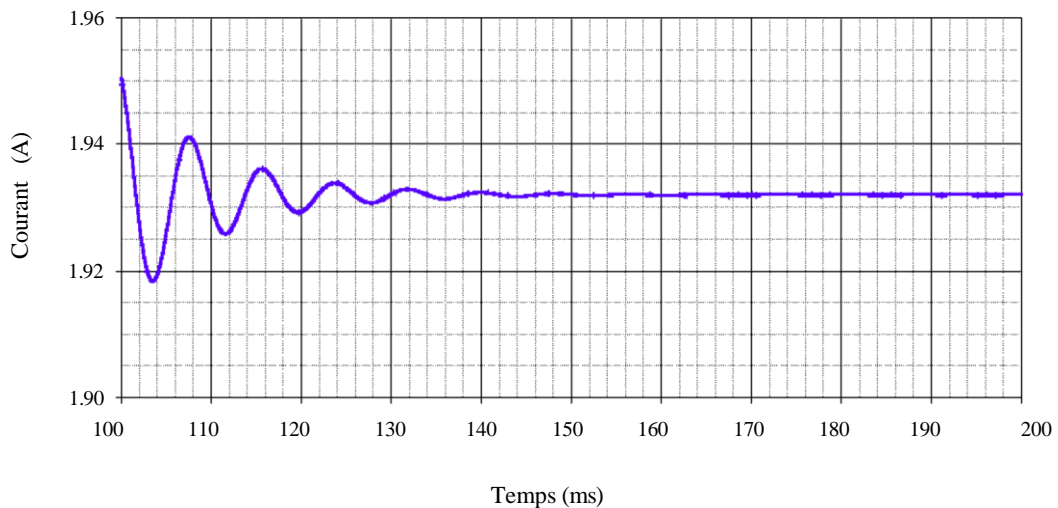
### III.3.2.1 Présentation et analyse des résultats obtenus

Les figures III.11, III.12 et III.13 illustrent respectivement l'évolution temporelle de la tension et du courant à l'entrée du hacheur, ainsi que la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL. Cette dernière représente l'image des perturbations totales générées par le hacheur. Le spectre de cette tension est présenté dans la figure III.14, où nous avons également tracé le gabarit des spécifications des normes FCC relatives aux perturbations conduites.

L'analyse de ces résultats met en évidence l'effet perturbateur du hacheur sur la tension et le courant à son entrée. Cet effet se manifeste par une distorsion des formes d'ondes, résultant des variations brusques dues aux commutations du MOSFET (figures III.11 et III.12)

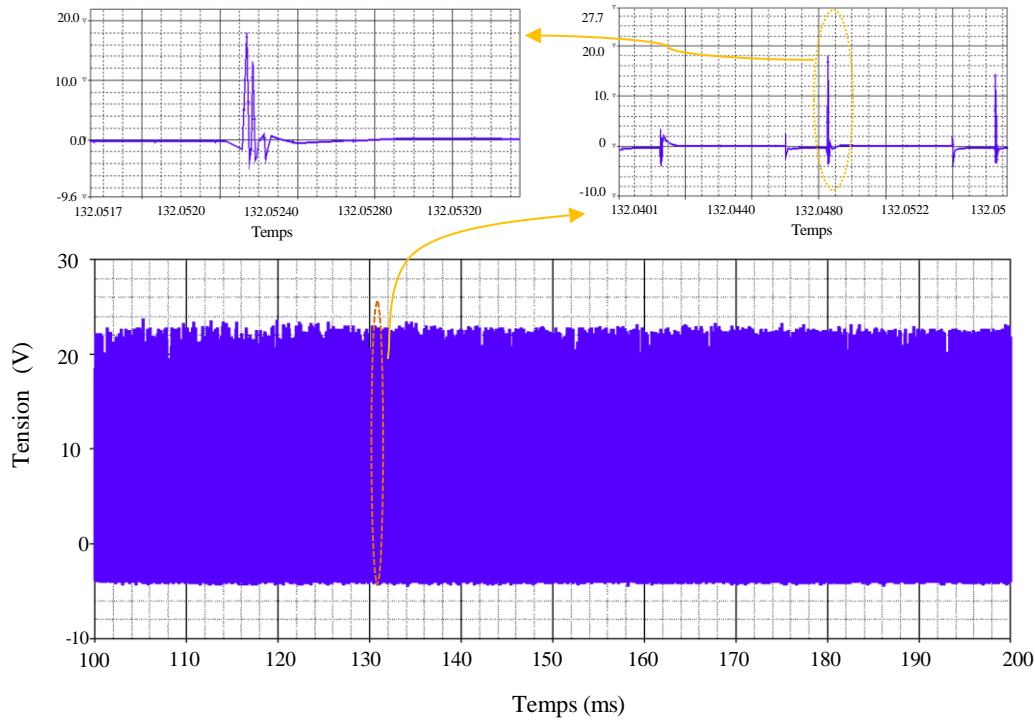


**Figure III.11** : Forme d'onde de la tension à l'entrée du hacheur

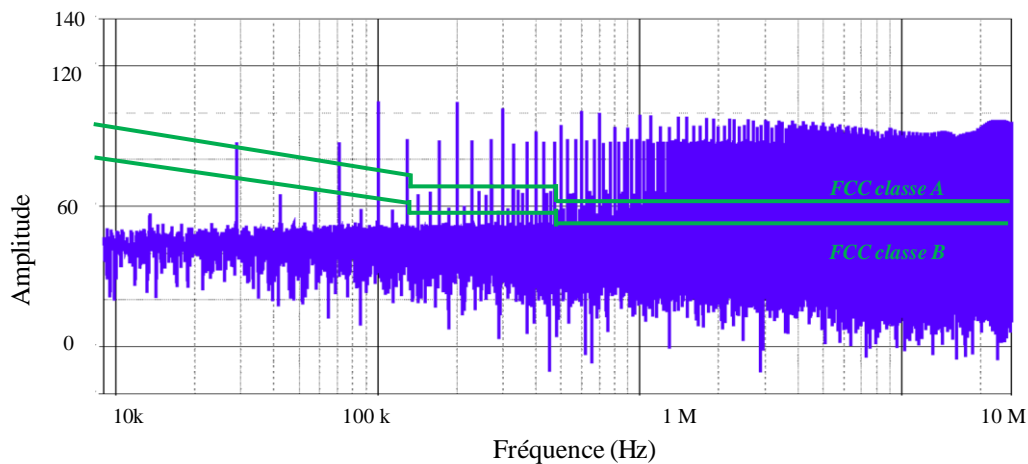


**Figure III.12** : Forme d'onde du courant à l'entrée du hacheur

En outre, on constate que la forme d'onde de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL (figure III.13) exhibe des fluctuations rapides d'amplitude. Par ailleurs, l'examen des variations spectrales des perturbations globales (figures III.14), en particulier la confrontation des pics d'amplitude avec les seuils normatifs (matérialisés par le gabarit superposé aux courbes spectrales), révèle une diversité fréquentielle notable et un dépassement de ces limites. Cette observation nous conduit à déduire que ce type de convertisseur nécessite impérativement l'intégration de dispositifs d'atténuation des perturbations conduites qu'il engendre, faute de quoi il représenterait une source potentielle d'interférences pour les systèmes environnants.



**Figure III.13 :** Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL



**Figure III.14 :** Spectre fréquentiel des perturbations totales localisées sur le RSIL

### III.4 Etude CEM de l'association redresseur-hacheur

Dans cette partie, nous allons explorer les perturbations électromagnétiques engendrées par la combinaison d'un pont redresseur et d'un hacheur, ainsi que leur impact sur le réseau électrique. Les perturbations émanant du pont redresseur sont détectables au niveau du RSIL. En revanche, les perturbations issues du hacheur doivent traverser le pont redresseur avant d'atteindre le dispositif de mesure. Si l'on considère l'impédance interne des diodes du redresseur comme négligeable en conduction par rapport aux autres impédances du pont, ce dernier agit alors comme un aiguillage des perturbations selon l'état des diodes (passant ou bloqué). Par conséquent, les perturbations EM du pont redresseur s'additionnent à celles du hacheur. Cette hypothèse suppose que les perturbations du hacheur n'affectent pas la durée de conduction des diodes, sinon la superposition des perturbations ne serait pas valide [15].

#### III.4.1 Mise en évidence et simulation des perturbations conduites HF générée par l'association redresseur-hacheur

Dans les parties antérieures, nous avons analysé la transmission des perturbations électromagnétiques (EM) du pont redresseur vers le réseau électrique, puis du hacheur vers l'alimentation continue. Ici, nous nous penchons sur cette propagation dans le contexte de l'association de ces deux convertisseurs. Le dispositif étudié se compose d'un pont redresseur à diodes, alimentant un hacheur abaisseur, avec une charge constituée d'une résistance en série avec une inductance. Notre but est de caractériser les perturbations EM haute fréquence générées par cet ensemble et transmises au réseau électrique. La figure III.15 illustre le schéma du circuit d'étude pour cette configuration redresseur-hacheur.

Pour évaluer l'impact CEM de cette association, nous avons réalisé une simulation haute fréquence sous PSpice. Les résultats obtenus sont des formes d'ondes de tension et de courant fournies par le réseau et mesurées aux bornes de la résistance équivalente du RSIL, représentant les perturbations totales engendrées par l'ensemble redresseur-hacheur. Les interrupteurs de puissance utilisés dans cette étude sont identiques à ceux des sections précédentes (diodes BYT12P-600 et transistor MOSFET IRFP750). Les paramètres de simulation pour le réseau, le MOSFET, la charge et les éléments parasites sont répertoriés dans le tableau 5.

Tableau 5 : les paramètre de simulation

$U_{Res}$ (v)	$L_{Res}$ (mH)	$R_{ch}$ ( $\Omega$ )	$L_{ch}$ (mH)	$C_d$ (nF)	$F_c$ (kHz)
220	2.25	10	2	900	100
<b>Résistances de Parasites</b>		<b>Inductances de parasites</b>		<b>Capacités de Parasites</b>	
$R_{P1}$ (m $\Omega$ )	1.35	$L_{P1}$ (nH)	481.00	$C_{P1}$ (pF)	20
$R_{P2}$ (m $\Omega$ )	1.10	$L_{P2}$ (nH)	25.60	$C_{P2}$ (pF)	100
$R_{P3}$ (m $\Omega$ )	1.35	$L_{P3}$ (nH)	452.00	$C_{P3}$ (pF)	110
$R_{P4}$ (m $\Omega$ )	2.00	$L_{P4}$ (nH)	100.00		
$R_{P5}$ (m $\Omega$ )	25.00	$L_{P5}$ (pF)	40		



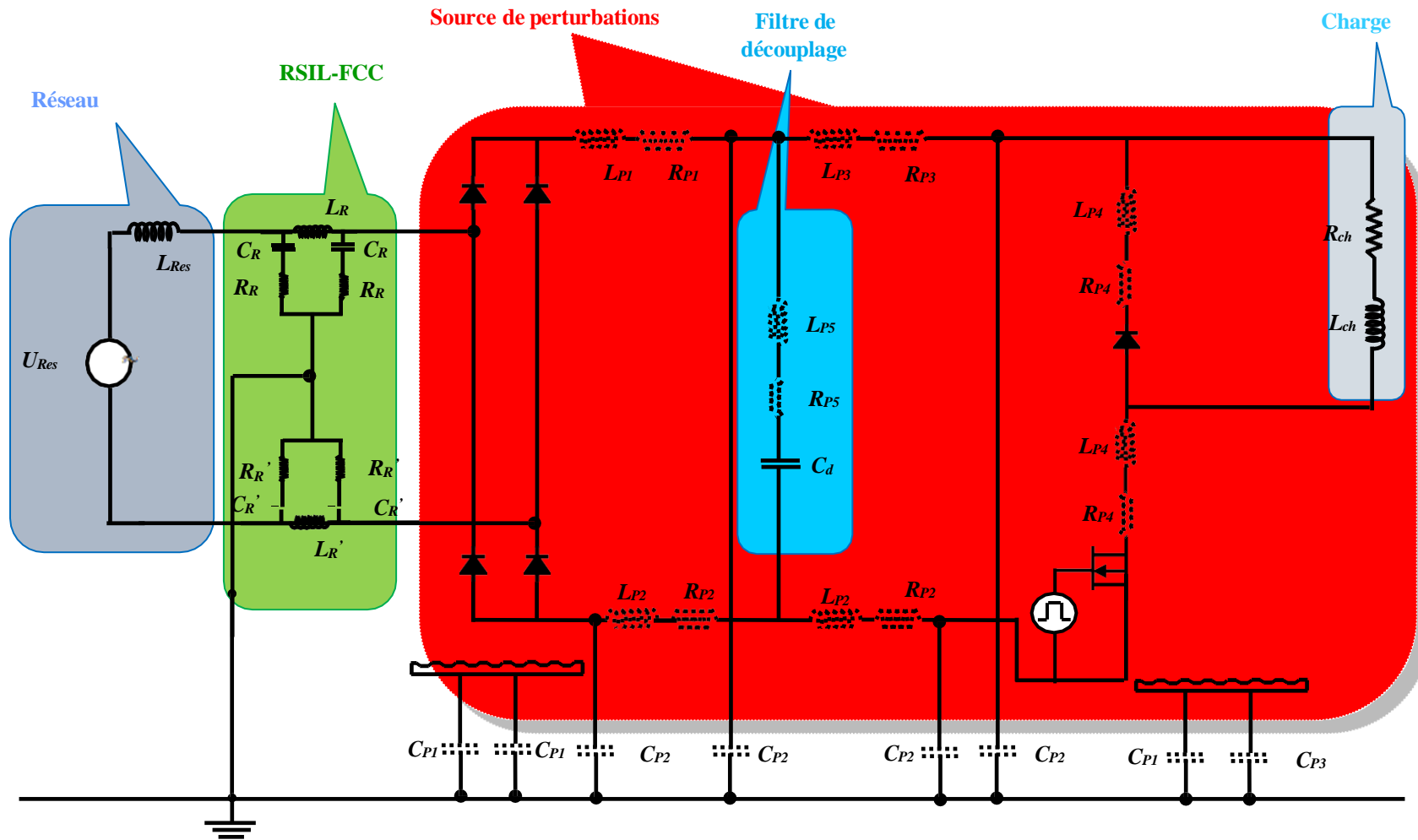
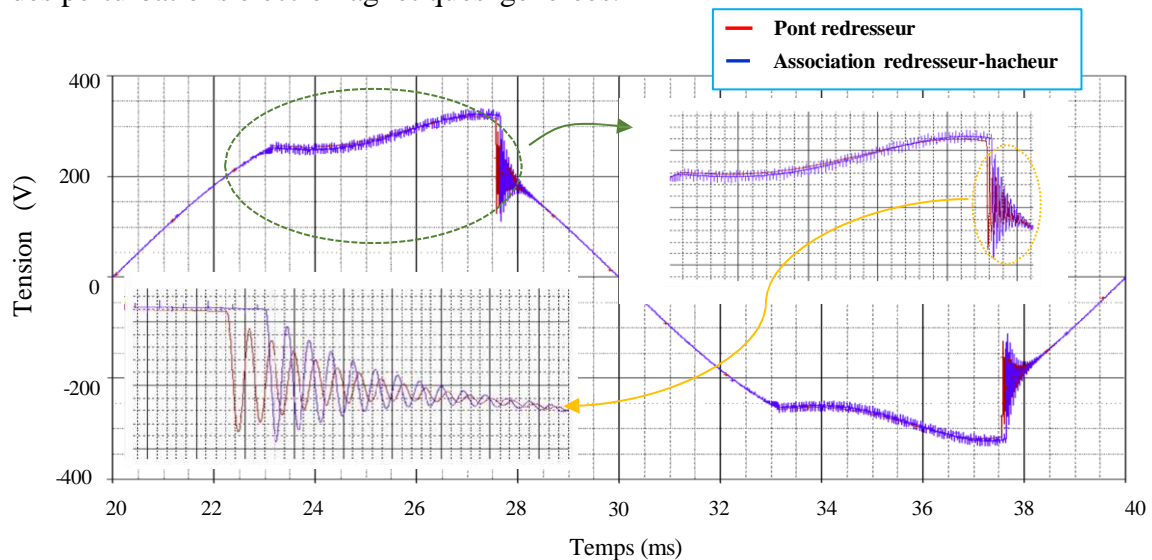


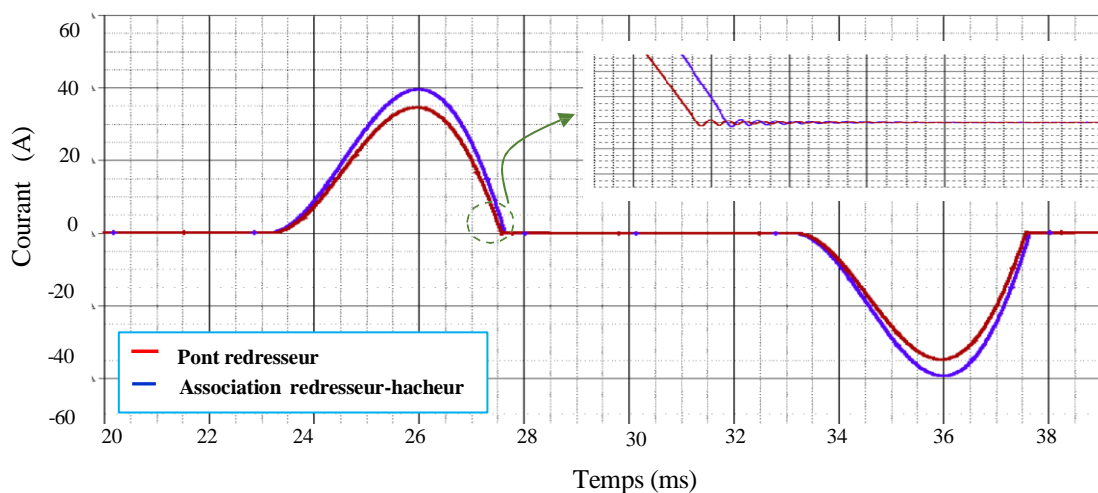
Figure III.15 : Schéma de l'association redresseur- hacheur – Modèle hautes fréquences

### III.4.1.1 Présentation et analyse des résultats obtenus

Les figures III.16 et III.17 illustrent les formes d'ondes de la tension d'entrée du pont redresseur et du courant de ligne, correspondant aux deux configurations précédemment étudiées. L'examen de ces résultats révèle que les profils des ondes (tension, courant) associés au système redresseur-hacheur alimentant une charge RL présentent une allure globale comparable à celle observée dans le cas du pont redresseur isolé chargé par une simple résistance. Néanmoins, l'influence perturbatrice du hacheur pendant la phase opérationnelle du pont redresseur se manifeste sous forme de parasites liés à la commutation du transistor MOSFET. En outre, dans le cas de l'assemblage redresseur-hacheur, on constate un décalage temporel du phénomène oscillatoire consécutif au blocage des diodes, accompagné d'une amplification de son amplitude. Cette observation met en évidence l'interaction complexe entre les deux composants du système et son impact sur les caractéristiques des perturbations électromagnétiques générées.



**Figure III.16 :** Forme d'onde de la tension à l'entrée du pont redresseur correspondant au cas du pont redresseur seul et à celle de l'association redresseur-hacheur

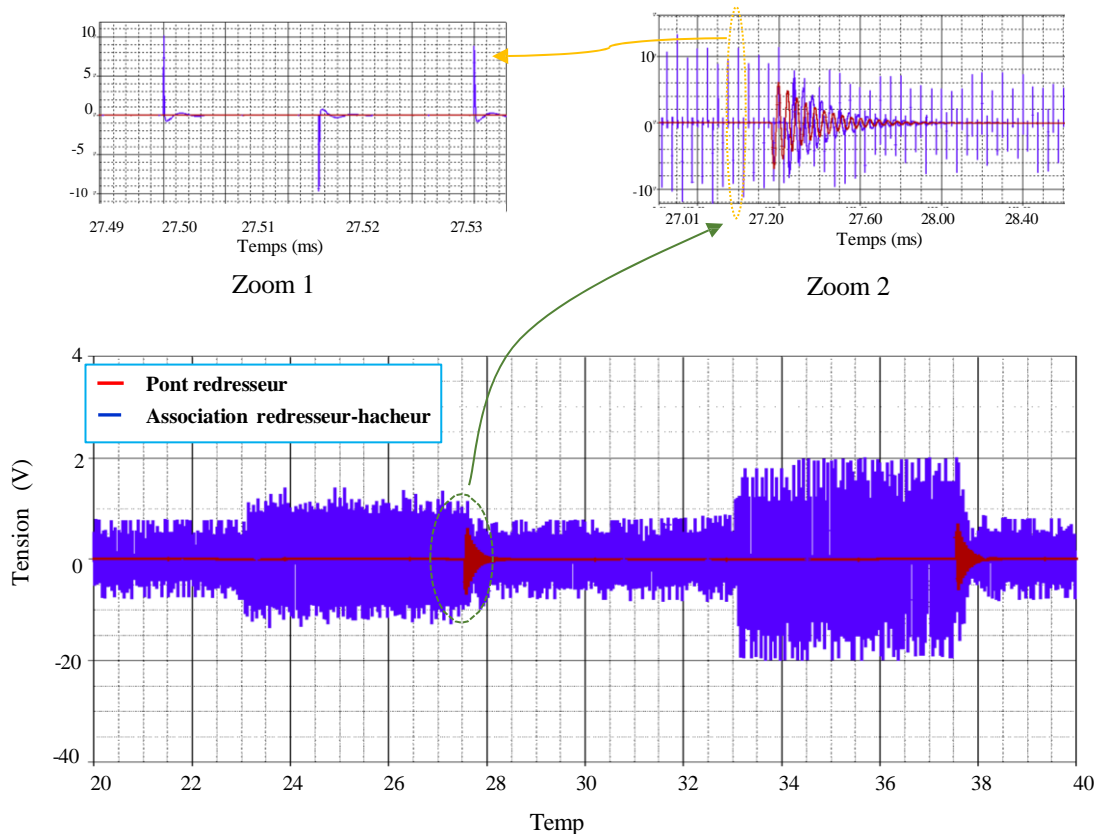


**Figure III.17 :** Forme d'onde du courant de ligne relative au pont redresseur seul et à celle de l'association redresseur-hacheur

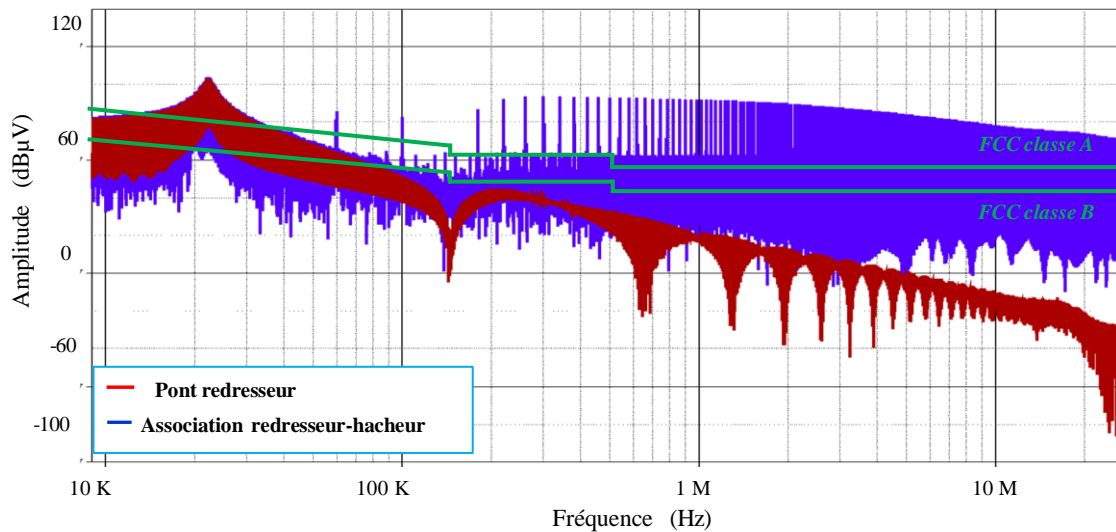
Pour mieux cerner l'impact perturbateur de l'association redresseur-hacheur, nous avons illustré dans la figure III.18 les variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour les deux configurations étudiées, représentant les perturbations totales à ce niveau. Les analyses spectrales correspondantes sont présentées en figure III.19.

L'examen de cette tension révèle clairement l'effet perturbateur accru de l'ensemble redresseur-hacheur, se manifestant par une amplification de cette tension. La figure III.18-1, un agrandissement (zoom 1) de la figure 53 sur l'intervalle [27,490ms-27,530ms], met en évidence la nature oscillatoire des perturbations lors de la commutation du MOSFET du hacheur. De même, la figure III.18-2, un agrandissement (zoom 2) sur l'intervalle [27,010ms-28,40ms], expose les perturbations générées durant la commutation du MOSFET du hacheur et le blocage des diodes du pont redresseur.

D'un point de vue fréquentiel, la comparaison des spectres de tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL pour les deux configurations révèle que les amplitudes des composantes fréquentielles de la configuration redresseur-hacheur sont significativement plus élevées, dépassant largement les limites imposées par la norme FCC, par rapport à celles du pont redresseur seul. Cette observation corrobore l'hypothèse selon laquelle l'association des deux convertisseurs génère davantage de pollution électromagnétique que le redresseur isolé.



**Figure III.18 :** Tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL relative au pont redresseur et à l'association redresseur-hacheur



**Figure III.19 :** Spectres fréquentiels de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL correspondant au cas du pont redresseur seul et à celui de l'association redresseur- hacheur

### III.5 Réduction des perturbations EM hautes fréquences émises par les convertisseurs statiques-Application à l'association redresseur-hacheur

La stratégie adoptée pour remédier aux perturbations EM conduites HF issues des convertisseurs statiques repose sur l'utilisation d'un filtre CEM passif. Avec les outils de simulation, la pollution EM conduite peut être prévue à une étape préliminaire de conception.

En outre, avec la conception améliorée des convertisseurs statiques, les perturbations conduites peuvent être réduites et il est ainsi possible de diminuer le volume du filtre.

Les normes CEM indiquent les limites du niveau de perturbations conduites dans une gamme fréquentielle bien déterminée que doivent respecter toutes les alimentations d'énergie. Afin de respecter ces normes, il est nécessaire de réduire le niveau de perturbations en dessous des limites concernées en utilisant les filtres CEM [16, 17, 18].

Nous allons examiner dans cette section, la faisabilité de l'utilisation d'un filtre CEM passif en vue de réduire les perturbations EM émises par l'association redresseur-hacheur. Nous donnons dans un premier temps quelques aspects relatifs à la modélisation et au dimensionnement de ce type de filtre.

#### III.5.1 Principe des filtres CEM passifs

En CEM, les filtres sont utilisés pour assurer la protection des dispositifs contre les perturbations EM conduites HF en rejetant les fréquences inutiles superposées au spectre fréquentiel des signaux exploités. Un filtre CEM passif est composé de capacités et / ou

d'inductances dans une configuration passe-bas. Ces filtres ont pour fonction de laisser passer les signaux utiles et de supprimer la partie indésirable du signal transmis [19, 20].

### III.5.2 Conception des filtres CEM passifs

Les filtres CEM passifs ont une structure en  $T$ . Ils consistent en la mise en série dans le circuit, entre deux phases, d'une inductance et d'une capacité. Le filtre peut être équilibré ou déséquilibré (figure III.20.a). Ces filtres produisent une atténuation de  $40dB/décade$ , et chaque élément passif qui entre dans la structure de ces filtres produit une atténuation de  $20dB/décade$ . La figure III.20.b illustre la structure du filtre double cascade en  $T$ . Ce dernier produit une atténuation de  $30dB/octave$ . Le dual du filtre en  $\pi$  est le filtre en  $T$  illustré à la figure III.20.c. Ce filtre donne la même atténuation que celle obtenue avec le filtre en  $\pi$ . Ce filtre est préféré lorsqu' il est connecté entre de faibles impédances [21].

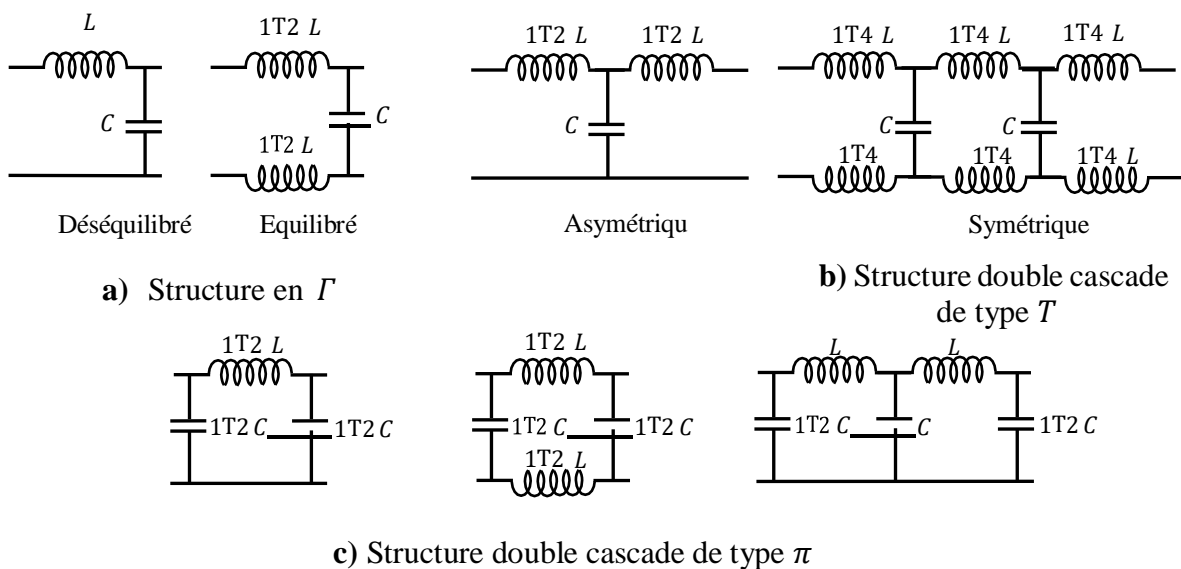


Figure III.20 : Différent conception des filtres CEM passifs

### III.5.3 Dimensionnement des filtres CEM passifs

Le dimensionnement des filtres CEM raccordés aux dispositifs d'électronique de puissance est une phase à la fois délicate et obligatoire vis-à-vis des standards internationaux. Certes, la théorie des circuits permet d'analyser et de synthétiser des filtres linéaires complexes pour les besoins spécifiques en électronique et en électrotechnique. Néanmoins, elle suppose une connaissance parfaite des impédances de la source et de la charge qui seront connectées au filtre. Ces filtres CEM sont destinés à être insérés entre la source d'alimentation et un ou plusieurs convertisseurs statiques. Ces derniers présentent souvent une impédance variable dans le temps dépendant de la fréquence [22]. De ce fait, il faut faire appel à des méthodes de dimensionnement autres que celles proposées par la théorie des circuits ou complémentaires à cette dernière. Parmi les méthodes qui existent aujourd'hui, la plus utilisée est la méthode qui repose sur une séparation du mode différentiel (MD) et du mode commun (MC). Cette technique s'appuie sur deux hypothèses [23, 24, 22] :

- les signaux de mode commun sont totalement découplés de ceux du mode différentiel,

- une connaissance parfaite de l'impédance des sources et de la charge.

Le schéma de la figure III.21 montre une topologie typique d'un filtre CEM habituellement utilisé. Cette topologie possède des circuits équivalents en mode commun et en mode différentiel. L'inductance  $L_{MC}$  et le condensateur  $C_y$  ( $C_y = 1/2 C_{MC}$ ) sont utilisés pour supprimer le bruit de mode commun tandis que l'inductance  $L_{MD}$  et le condensateur  $C_x$  ( $C_x = C_{MC}$ ) sont utilisés pour supprimer le bruit de mode différentiel [22, 25]. Les capacités du mode différentiel  $C_x$  permettent de court-circuiter le courant de ce mode, tandis que les capacités de mode commun, reliées à la terre, court-circuitent le courant du mode commun. L'inductance de mode commun est réalisée par deux inductances bobinées sur un noyau magnétique. Elle présente une forte impédance seulement pour le mode commun permettant au filtre de minimiser les interférences atteignant le réseau. Cette topologie de filtre donne typiquement une atténuation de  $40\text{dB/décade}$  pour le mode commun et pour le mode différentiel.

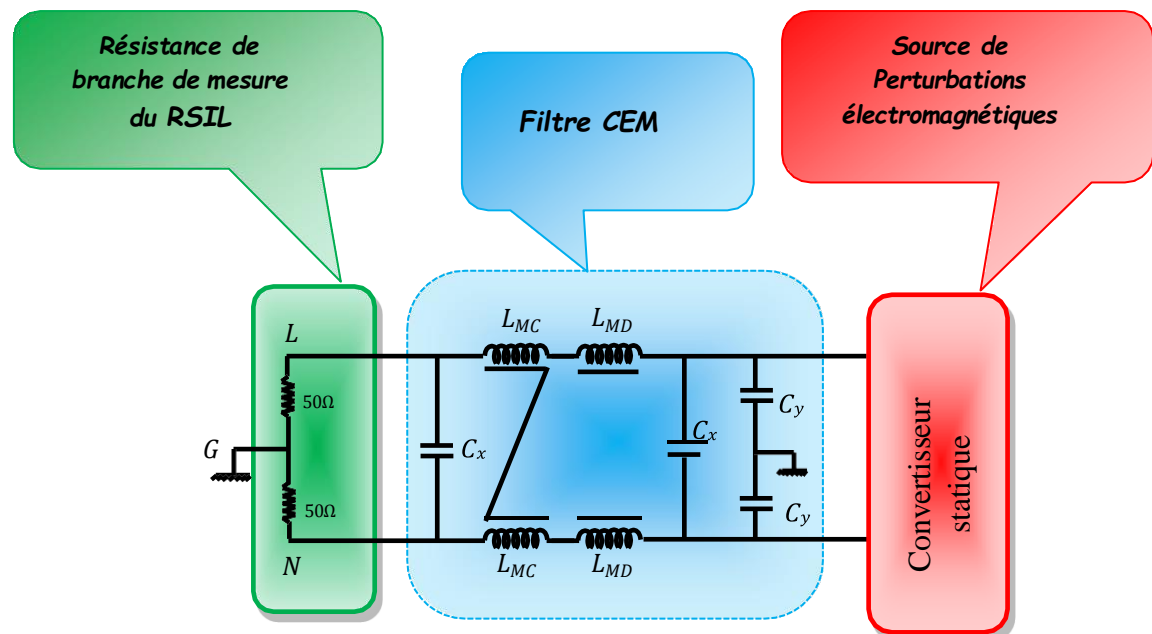


Figure III.21 : Topologie d'un filtre CEM

### III.5.4 Calcul des éléments du filtre CEM passif

Le mode commun et le mode différentiel peuvent alors être traités de façon indépendante et ce, en faisant appel aux bases classiques de la théorie des circuits linéaires. La résolution du circuit est faite en proposant des schémas équivalents pour le mode commun d'une part et pour le mode différentiel d'autre part [26] [27].

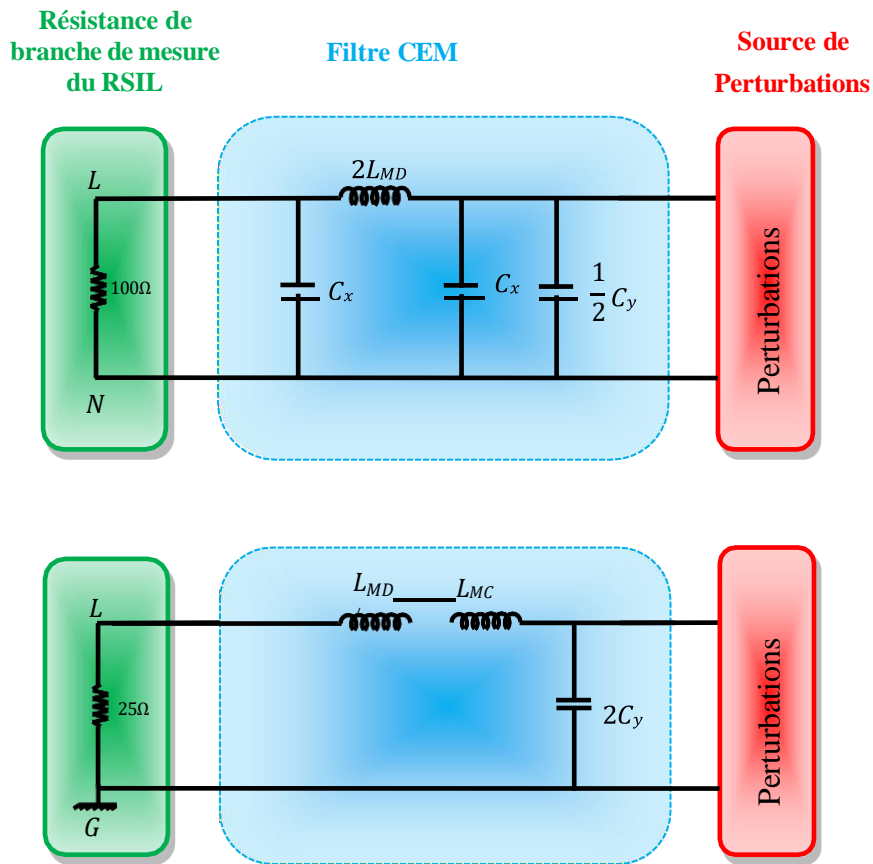


Figure III.22 : Modèles équivalents du filtre CEM du mode différentiel et du mode commun

### III.5.5 Algorithme de calcul des éléments du filtre CEM passif

Il est extrêmement difficile d'obtenir analytiquement la conception d'un filtre CEM passif.

Une approche pratique a été proposée par les auteurs des références [28], [29] et [30] pour faciliter la conception d'un tel filtre. La procédure de conception du filtre CEM passif proposée par ces auteurs se résume à travers l'algorithme donné à la figure III.23.

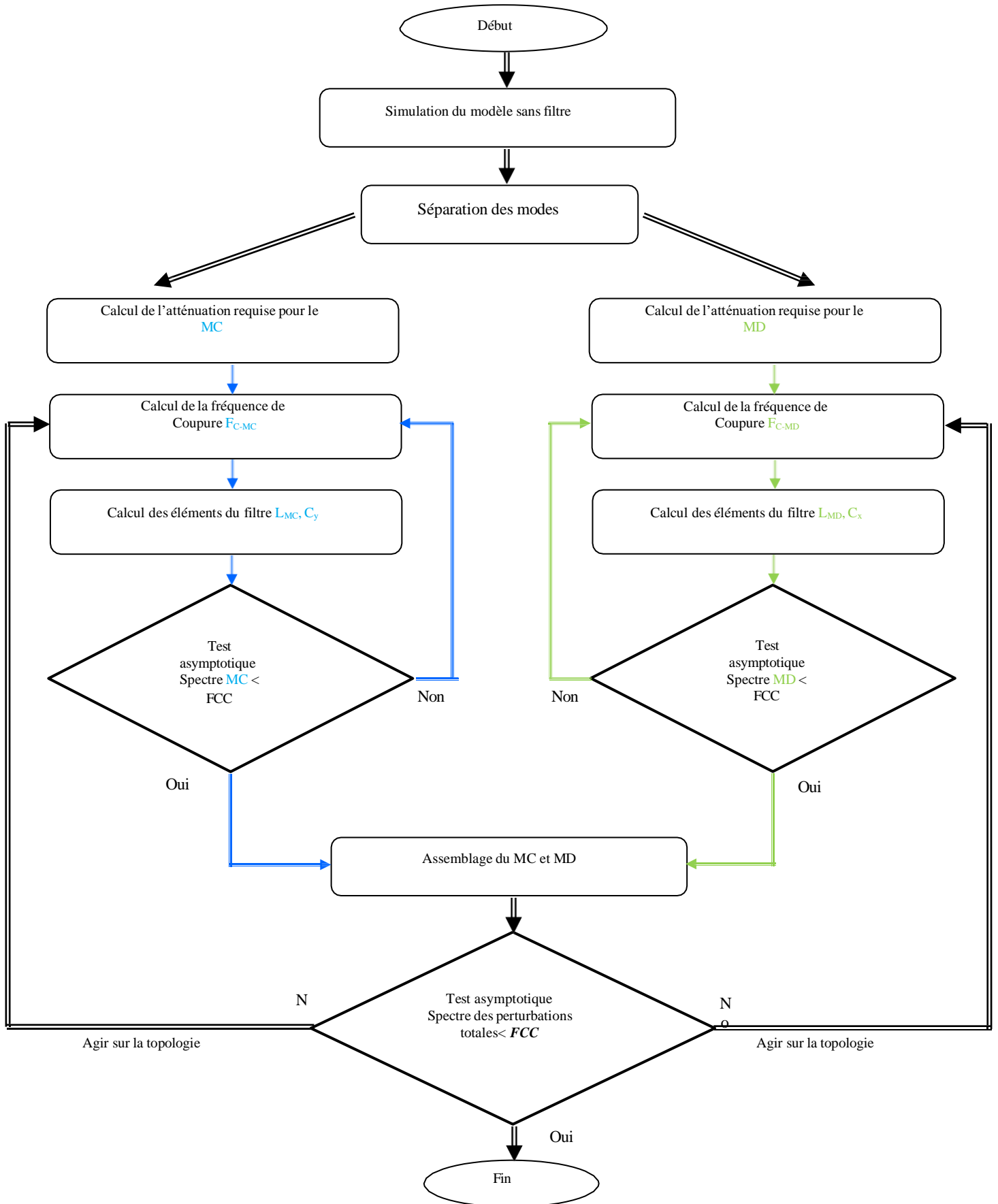


Figure III.23 : Algorithme de dimensionnement de filtre CEM par le principe de séparation du mode différentiel et du mode commun



### III.5.6 Procédure de conception d'un filtre CEM passif

La procédure de conception du filtre CEM peut se résumer en quatre étapes [31] [32] [28] [29] [30]

➤ **1<sup>ère</sup> Étape :**

Simuler les perturbations EM totales, en mode commun et en mode différentiel.

➤ **2<sup>ème</sup> Etape :**

Déterminer l'atténuation ( $V_{req-MC}$ )  $dB$  due aux perturbations EM en mode commun et celles dues au mode différentiel ( $V_{req-MD}$ )  $dB$ . Les expressions mathématiques de ces atténuations sont :

$$(V_{req-MC}) dB = (V_{MCmax}) a - (V_{lim}) de + 6dB$$

(III-1)

$$(V_{req-MD}) dB = (V_{MDmax}) dB - (V_{lim}) dB + 6dB$$

(III-2)

Avec :

( $V_{MD}$ ) et ( $V_{MC}$ ) représentant les tensions de perturbations EM de ligne correspondant à la première étape exprimées en ( $dB$ ).

( $V_{lim}$ ) Étant la limite des émissions conduites exigées par les normes CEM exprimée en ( $dB$ ). Pour éviter l'erreur de conception, un biais de 6  $dB$  est nécessaire.

➤ **3<sup>ème</sup> Étape :**

<Déterminer les fréquences de coupure du filtre  $LC$ , en cherchant les valeurs minimums de

$F_{c-MD}$  Et  $F_{c-MC}$  par l'utilisation des deux relations suivantes :

$$(V_{req-MC}) dB = 40 \log_{10} (F_{MCmax}/F_{c-MC})$$

(III-3)

$$(V_{req-MD}) dB = 40 \log_{10} (F_{MDmax}/F_{c-MD})$$

(III-4)

Où :

$F_{c-MC}$  Et  $F_{c-MD}$  désignent les fréquences de coupure des deux filtres conçus respectivement pour les perturbations conduites en mode commun et en mode différentiel.

$F_{MCmax}$  Et  $F_{MDmax}$  sont respectivement les fréquences où les spectres des perturbations conduites en mode commun et en mode différentiel comportent une amplitude maximale.

➤ **4<sup>ème</sup> Étape :**

Déterminer respectivement les valeurs des inductances et des condensateurs des filtres

$(L_{MC}, C_{MC})$  Et  $(L_{MD}, C_{MD})$  en utilisant les relations suivantes :

$$F_{c-MC} = 1/(2M \sqrt{L_{MD}C_{MC}})$$

(III-5)

$$F_{c-MD} = 1/(2M \sqrt{L_{MD}C_{MC}})$$

(III-6)

### III.6 Réduction des perturbations émises par l'association redresseur-hacheur par l'ajout d'un filtre CEM-Mise en œuvre et simulation

Pur remédier aux perturbations conduites HF issues de l'association redresseur-hacheur, nous avons inséré un filtre CEM passif parfait entre le réseau électrique et les deux convertisseurs. Les valeurs des composants du filtre CEM passif calculées sont consignées dans le tableau 7.

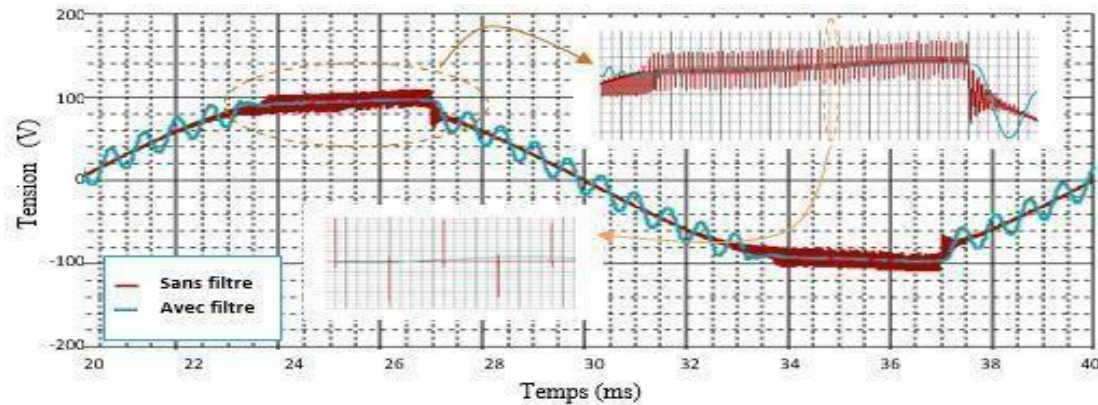
**Tableau 6 :** les paramètres des composants du filtre CEM passif

$L_{MC}$ ( $\mu\text{H}$ )	$L_{MD}$ ( $\mu\text{H}$ )	$C_x$ ( $\text{nF}$ )	$C_y$ ( $\mu\text{F}$ )
16.749	80	100	2.2

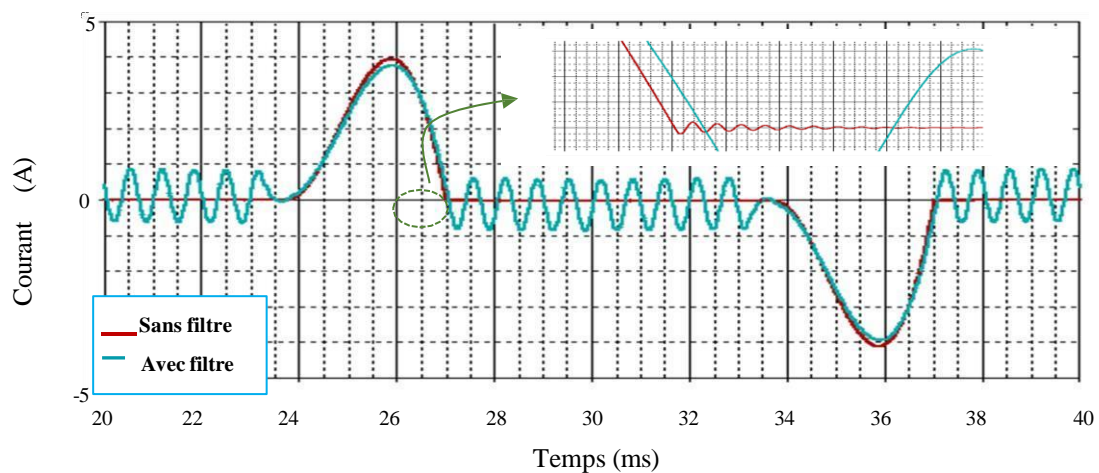
#### III.6.1 Présentation et analyse des résultats obtenus

L'insertion d'un filtre CEM passif entre la source de perturbations (l'association redresseur-hacheur) et la victime (le réseau électrique) a permis d'obtenir des résultats intéressants. Pour apprécier la qualité de ces derniers nous avons présenté respectivement aux figures III.24 et III.25, les formes d'onde de la tension à l'entrée du pont redresseur et du courant de ligne avant et après filtrage. L'analyse de ces résultats montre une modification des formes d'ondes suite à l'introduction dans le circuit du filtre CEM passif. En effet, une amélioration nette de la forme d'onde des variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur est observée suite à la mise en place du filtre CEM. Cette amélioration s'est traduite par la diminution de l'effet perturbateur engendré par les variations brutales dues aux commutations du transistor MOSFET appartenant au hacheur. Quant à la forme d'onde du courant de ligne, nous n'avons constaté aucune modification suite à l'utilisation du filtre CEM.

Enfin, l'introduction du filtre CEM dans le circuit a causé une translation dans le temps du phénomène oscillatoire (dû au blocage des diodes), observé sur les formes d'ondes tracées ainsi qu'une augmentation de son amplitude.



**Figure III.24:** Variations temporelles de la tension à l'entrée du pont redresseur, correspondant à l'association redresseur-hacheur, avec et sans filtre CEM

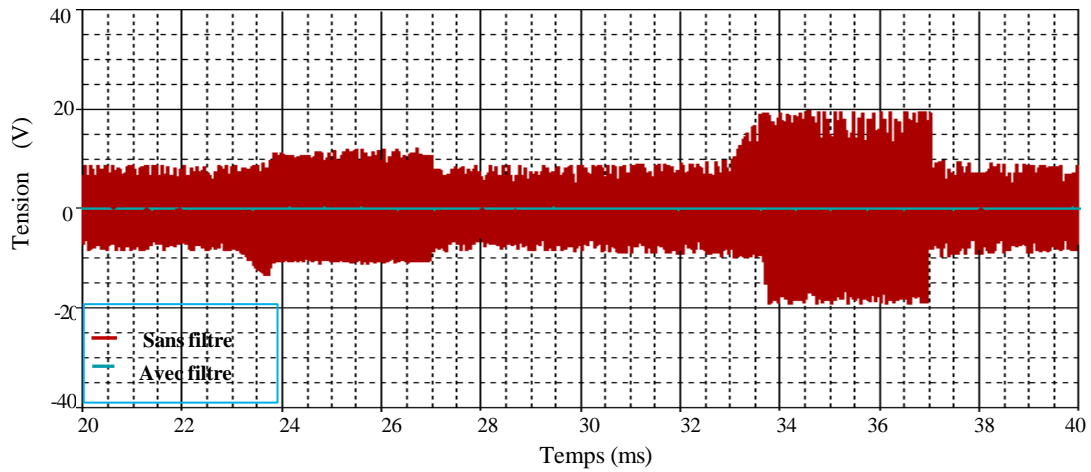


**Figure III.25 :** Variations temporelles du courant de ligne, correspondant à l'association redresseur-hacheur, avec et sans filtre CEM

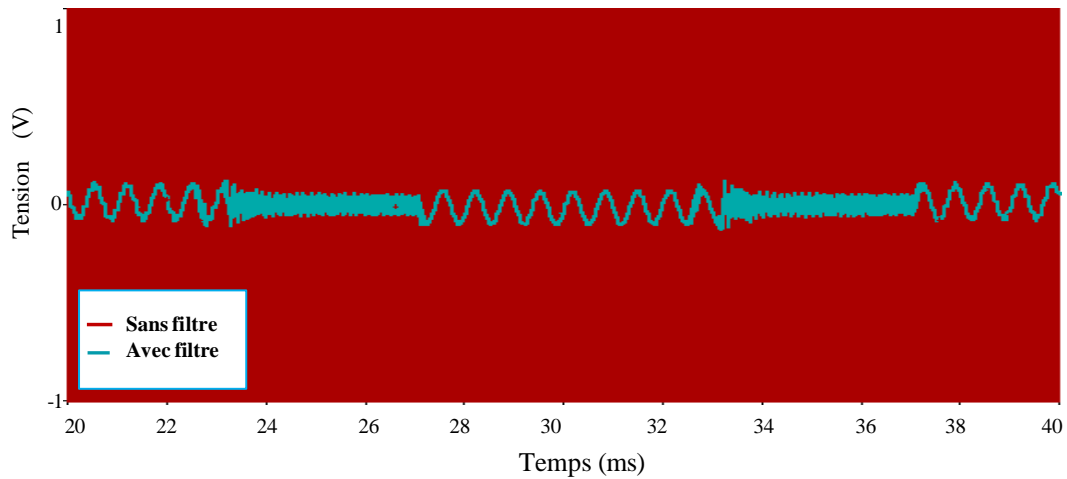
Sur les figures III.26 et III.27, nous avons tracé les variations temporelles de la tension, aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL avant et après filtrage, suivies des analyses spectrales correspondantes (figure III.28).

D'autre part, dans un but de validation de la démarche de filtrage adoptée, nous avons tracé sur le même graphique que celui de ces analyses spectrales le gabarit relatif aux spécifications de la norme dédiée aux perturbations conduites FCC.

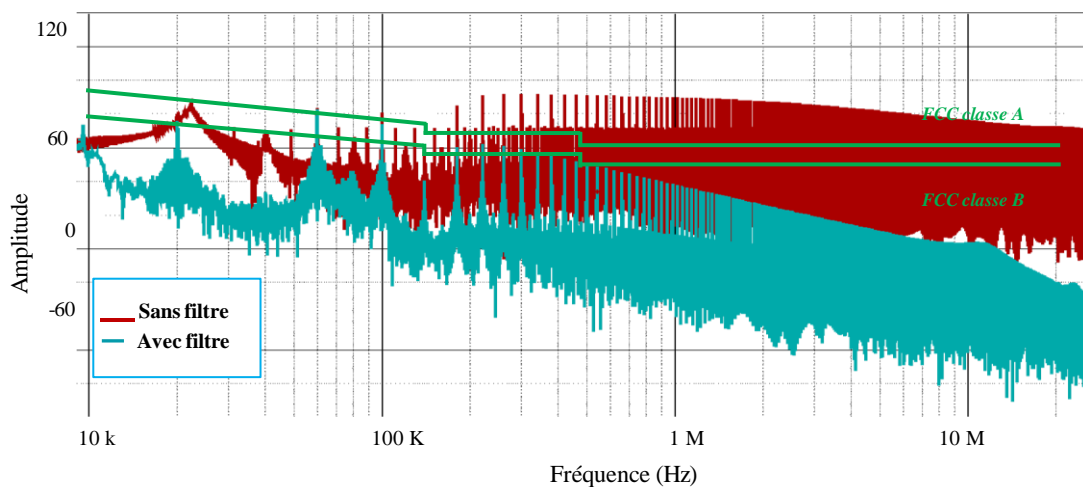
L'analyse de ces résultats indique, qu'après filtrage, une diminution des amplitudes des variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente du RSIL est observée.



**Figure III.26 :** Variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL, correspondant à l'association redresseur-hacheur, avec et sans filtre CEM



**Figure III.27 :** Agrandissement (zoom) de la figure III.27 en amplitude



**Figure III.28:** Analyse spectrales des variations temporelles de la tension aux bornes de la résistance équivalente de mesure du RSIL, avec et sans filtre CEM, relatives à l'association redresseur-hacheur

Quant aux analyses spectrales de ces variations temporelles, nous constatons là aussi une diminution des amplitudes des fréquences constituant ces spectres après filtrage. Cette diminution a permis le respect des limites normatives spécifiées par le gabarit de la norme FCC, tracé sur le même graphe que ces analyses spectrales. L'effet perturbateur a donc été réduit. Ce résultat montre l'efficacité du filtre utilisé et nous permet d'adopter la technique de filtrage passif CEM comme une bonne solution de réduction des perturbations EM dans une gamme de fréquence assez large allant de 9kHz à 30MHz.

### III.7 Conclusion

Ce chapitre a porté sur l'analyse de la génération et de la propagation de perturbations électromagnétiques (EM) conduites à hautes fréquences par les dispositifs d'électronique de puissance.

Nos résultats ont révélé que le pont redresseur monophasé non commandé produit des perturbations dépassant les limites autorisées par les normes CEM en vigueur. Ces perturbations affectent la qualité des formes d'ondes de tension et de courant, impactant ainsi la compatibilité électromagnétique du réseau électrique. L'étude des perturbations EM conduites générées par le hacheur abaisseur, a montré que ce dernier constitue une source significative de pollution EM pour son environnement en hautes fréquence. Ainsi, la combinaison redresseur-hacheur génère des perturbations EM hautes fréquences principalement dans la gamme correspondant à celles du hacheur.

Suite à la caractérisation des perturbations émises par l'ensemble redresseur-hacheur, nous avons examiné une solution de réduction : l'utilisation d'un filtre CEM passif. Les résultats obtenus illustrent l'efficacité de cette approche, permettant de la considérer comme une solution viable pour atténuer ces perturbations.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

---

### *Conclusion générale*

---

Ce mémoire se concentre sur l'analyse et la caractérisation des perturbations électromagnétiques conduites à hautes fréquences, générées par des dispositifs d'électronique de puissance, en particulier les ponts redresseurs monophasés, les hacheurs série, et leur combinaison.

Notre étude a visé à détailler précisément les perturbations conduites émises par ces dispositifs à hautes fréquences, dans diverses configurations : fonctionnement indépendant de chaque convertisseur et fonctionnement en association. Pour ce faire, nous avons élaboré une modélisation CEM complète du système, comprenant le convertisseur et sa victime (le réseau électrique). Cette étape cruciale a pris en compte les éléments parasites spécifiques à chaque composant ou entité.

À partir de cette modélisation, nous avons effectué de nombreuses simulations pour identifier et caractériser les perturbations électromagnétiques conduites hautes fréquences générées par les convertisseurs statiques. Ces simulations, réalisées dans l'environnement PSPICE, ont nécessité un important travail de programmation.

Notre travail a montré que ces dispositifs constituent des sources significatives de perturbations électromagnétiques conduites dans le domaine des hautes fréquences. Face à cette problématique, nous avons évalué l'efficacité d'une solution d'atténuation : l'utilisation de filtres CEM passifs. Cette approche s'est révélée particulièrement adaptée aux convertisseurs étudiés, offrant une méthode efficace pour réduire les émissions électromagnétiques indésirables. Nous recommandons donc l'implémentation de cette technique de filtrage comme solution privilégiée pour améliorer la compatibilité électromagnétique de ces dispositifs.

En synthèse, nous estimons avoir pleinement atteint les objectifs initialement définis pour cette étude. Notre travail a permis de répondre de manière satisfaisante à la problématique posée, offrant ainsi une compréhension approfondie des phénomènes étudiés et proposant une solution concrète aux défis identifiés.

# Références bibliographiques



## Références bibliographiques

### *Références bibliographiques*

- [1] A. HAMEURLAIN, Cours De Compatibilité Electromagnétique, Djelfa,2017 ,p. 6.
- [2] M. MELIT, étude de perturbation dans les convertisseur le l »électronique de puissance.(ITALY) ,2008 ,p ,26
- [3] S. REZINI, Cours qualité d'énergie électrique, Mostaganem, 2024.
- [4] SCHNEIDER, *Les perturbations électromagnétiques basse et haute fréquence*, 2000.
- [5] S. BOUABA et H. MAKOUDI , Etude de la compatibilité électromagnétique des circuits électroniques, TIZI-OUZOU, 2012.
- [6] A. DARKAWI, la compatibilité électromagnétique (Cem) Ecole d'ingénieur, 2016.
- [7] B. MAUCHE, Cours de Cem, Bejaia.2016
- [8] R. MEZIANI et S. SALHI, Calcul du champ électromagnétique généré par les réseaux électriques en vue de la compatibilité électromagnétique (CEM), BEJAIA, 2017.
- [9] I. COCQUELLE et C. PASQUIER, rayonnement électromagnétique des convertisseur a découpage , approche simplifiée par le concept des liots rayonnement, 2003.
- [10] P. FERRACCI, La Qualité De L'énergie Electrique. Cahier Technique, 2001, p. 13.
- [11] S. ELMETOUALI, «SCRIBD,» [En ligne]. Available: <https://www.scribd.com/user/645864810/%D8%B3%D9%85%D9%8A%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AA%D9%88%D9%84%D9%8A>. [Accès le 2024].
- [12] M. BEN HOUIT et Y. BEN HOUIT, AMELIORATION DE LA QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE, Ghardaïa, 2018.
- [13] ZHANG, YONGCHANG, XIE, WEI, LI et ZHENGXI, Model Predictive Direct Power Control Of A PWM Rectifier With Duty Cycle Optimization. IEEE Transactions On Power Electronics, vol. 28, 2013, pp. 5343-5351.
- [14] «wikipedia,» 26 01 2024. [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation\\_sans\\_interruption](https://fr.wikipedia.org/wiki/Alimentation_sans_interruption).

## Références bibliographiques

- [15] R. B, Modélisation et optimisation des performances CEM d'une association variateur de vitesse-machine asynchrone, 2003.
- [16] W. T, EMC for product designer, Fourth éd., Elsevier Ltd, 2007.
- [17] R. M, Power electronics handbook. Devices, circuits and applications, Third éd., Elsevier Inc, 2011.
- [18] S. REZINI, Z. AZZOUZ et B. KOUADRI, Techniques de Réduction des Effets Perturbateurs Générées par des Dispositifs d'Electronique de puissance, Oran, 2010.
- [19] H. M, E. H et K. W , Numerical analysis of conducted electromagnetic interferences, Romania, 2008, pp. 277-280.
- [20] R. L , EMI filter design, Third éd., CRC press, 2011.
- [21] W. Teulings, Prise en compte du câblage dans la conception et simulation des convertisseurs de puissance : Performances CEM, Grenoble, 1997.
- [22] L. P, Effective EMI filter design method for three-phase Inverter based upon software noise separation, vol. 25, 2010, pp. 2797-2806.
- [23] H. S, Contribution à l'élaboration de modèles précis et à faible coût de calcul pour l'électronique de puissance et la CEM, Cachan, 2014.
- [24] H. S, C. F , R. B et G. C , Nouvelle méthode d'analyse des interférences électromagnétiques (IEM) dans les convertisseurs statiques, Bordeaux, 2012.
- [25] G. ASMANIS, Measurement and modeling of EMI filters high frequency parasitic parameters, Riga, 2014.
- [26] S. REZINI, Z. AZZOUZ et B. KOUADRI, Study of High Frequency Electromagnetic Disturbances Generated by a Rectifier and Chopper Association, 2013.
- [27] C.-K. L, K. S et S.-C. T, A procedure for designing EMI filters for AC line applications », IEEE Transactions on power electronics, Vol. 11, n° 1, pp 170-181, ., 1996.
- [28] Y. Dengke, Z. Lingwei , W. Xing, Z. Yicheng et Y. Yon, EMI power filter design for control system of DC converter in electric vehicle, 2010.
- [29] B. B. Toure, Modélisation haute fréquence des variateurs de vitesse pour avions: contribution au dimensionnement et à l'optimisation de filtres CEM, Groneble, 2012.
- [30] J. Jiraprasertwong et C. Jettanasen, Practical design of a passive EMI filter for reduction of EMI generation, vol. 2, Hong Kong, 2015.

## Références bibliographiques

- [31] S. REZINI, B. KOUADRI et Z. AZZOUZ, EMC Conducted Problems in Power Electronic Converters, Oran, 2011.
- [32] J. P. V. Y, P. J. C et P. G. R, «EMI filter design for reducing common-mode and differential-mode noise in conducted interference,» *International journal of communication engineering*, vol. 5, pp. 319-329, 2012.
- [33] Y. TOUZANI , Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant, 2006.
- [34] «allo.solar,» [En ligne]. Available: <https://allo.solar/base-de-connaissances/qu-est-ce-qu-un-convertisseur-pseudo-sinus.html>.
- [35] M. I. BOUKHARI, Etude de perturbations électromagnétiques rayonnées par des composant magnétiques planaires intégrés : Inductance, Lyon, 2019.
- [36] H. FUJITA et H. AKAGI, The Unified Power Quality Conditioner: The Integration Of Series And Shunt-Active Filters. *Power Electronics, IEEE Transactions*, 1998, pp. 315-322.