

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commande électrique  
Thème

*ETUDE SUR L'IMPACT DES PERTURBATIONS  
ÉLECTROMAGNÉTIQUES D'UN RÉSEAU DC/DC À BASE DES  
HACHEURS BUCK DANS UN ENVIRONNEMENT ÉLECTRIQUE.*

**Présenté Par :**

- 1) Azzi Mohammed Anouar
- 2) Abdellah Berrabah Imad Eddine

**Devant les jurys composés de :**

Dr. Massinissa Aissou	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. BenazzaBeghdadi	Prof	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur
Dr. MendazKheira	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

*Année universitaire 2019/2020*

# Remerciements

*“Le succès, c'est l'échec de l'échec”*

*Je tiens à exprimer ma plus profonde reconnaissance à :*

*DIEU, pour m'avoir donné la force dans les moments difficiles  
d'éditer ce mémoire.*

*A notre encadrant Dr **Benazza Beghdadi**, Nous avons eu le  
privilege de travailler et d'apprécier vos qualités et vos valeurs.  
Votre sérieux, votre compétence et votre sens du devoir nous ont  
énormément marqués. Veuillez trouver ici l'expression de notre  
respectueuse considération et notre profonde admiration pour  
toutes vos qualités scientifiques et humaines. Ce travail est pour  
nous l'occasion de vous témoigner notre profonde gratitude.*

*A notre professeur et juge Dr **Mendez Kheira**, Vous nous faites  
l'honneur d'accepter avec une très grande amabilité de siéger  
parmi notre jury de soutenance. Veuillez accepter ce travail, en  
gage de notre grand respect et notre profonde reconnaissance.*

*A notre professeur et président des jurys Dr **Massinissa Aissou**,  
Vous nous avez honorés d'accepter avec grande sympathie de  
siéger parmi notre jury de soutenance. Veuillez trouver ici  
l'expression de notre grand respect et nos vifs remerciements.*

# Dédicace

*Je dédie ce mémoire...*

***A Ma très chère mère** honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

***A mon Père**, Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

***A Mes sœurs SARRA, HADJER**, Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, Votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.*

***A Tous mes enseignants** du primaire jusqu'à aujourd'hui qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.*

***A Tous mes amis** dont les noms n'ont pu être cités.*

***A mon collègue et Binôme Azzi Mohamed Anouar** avec qui j'ai réalisé cette étude.*

*IMAD Eddine*



# Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon cher père pour tous leurs amours, leurs sacrifices, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de ma vie, je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude pour l'effort et le temps que vous m'avez consacré, ce travail est le fruit de vos supports, je leur serai énormément reconnaissant.

A mes chers frères Rihem, Moundir et Allàa pour leurs appuis permanents, Puisse Dieu vous garder, je leur espère réaliser leurs rêves et souhaits.

A mes amis auxquels j'ai connu tout au long de mon parcours scolaire et de ma vie entière, et à mon cher ami Sidahmed pour sa présence et son support moral.

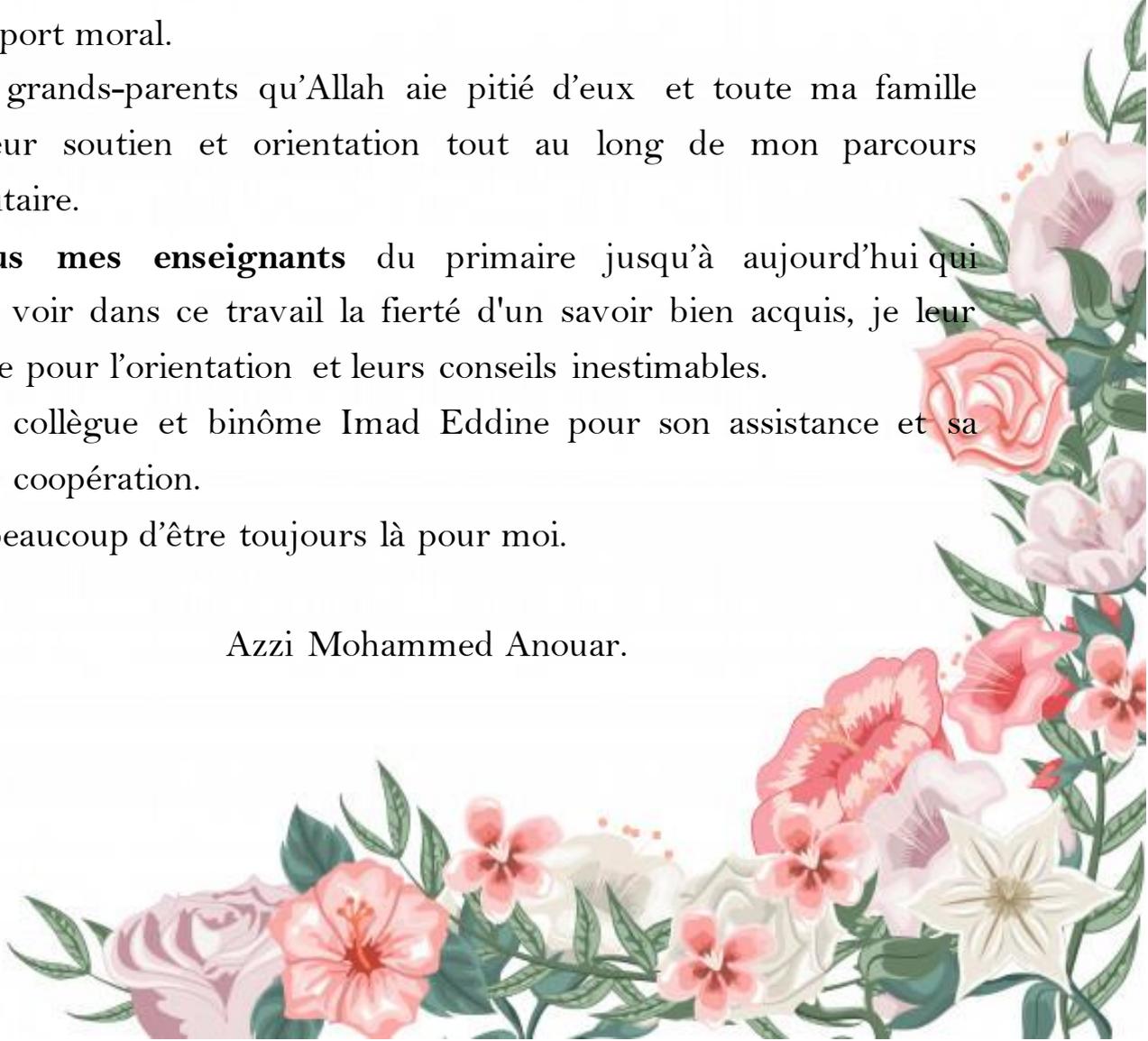
A mes grands-parents qu'Allah aie pitié d'eux et toute ma famille pour leur soutien et orientation tout au long de mon parcours universitaire.

**A Tous mes enseignants** du primaire jusqu'à aujourd'hui qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis, je leur remercie pour l'orientation et leurs conseils inestimables.

A mon collègue et binôme Imad Eddine pour son assistance et sa sérieuse coopération.

Merci beaucoup d'être toujours là pour moi.

Azzi Mohammed Anouar.



# Sommaire

## Introduction générale

### Chapitre I : Généralité sur la Compatibilité Electromagnétique

I.1.Introduction.....	1
I.2.Définition.....	1
I.3.Aspects fondamentaux de la CEM.....	2
I.4.Les niveaux des perturbations.....	2
I.4.1.Niveau d'immunité.....	2
I.4.2.Limite d'émission.....	2
I.5.Classification des perturbations.....	2
I.5.1.Classification par mode de propagation.....	2
I.5.1.1.Le mode différentiel.....	3
I.5.1.2.Le mode commun.....	3
I.5.2.Classification par type de couplage.....	4
I.5.2.1.Couplage par impédance commune.....	4
I.5.2.2.Couplage par diaphonie capacitive.....	5
I.5.2.2.a. Couplage capacitif de mode différentiel.....	5
I.5.2.2.b. Couplage capacitif de mode commun.....	6
I.5.2.3.Couplage par diaphonie inductive.....	6
I.5.2.3.a. Diaphonie inductive de mode différentiel.....	7
I.5.2.3.b. Diaphonie inductive de mode commun.....	7
I.5.2.4.Couplage champs à boucle.....	7
I.5.2.5.Couplage champs à câble.....	8
I.5.2.6.Couplage champs à câble à plan de masse.....	8
I.5.3.Classification par fréquence.....	9
I.5.3.1.Les perturbations à basse fréquence « BF ».....	9
I.5.3.2.Les perturbations haute fréquence « HF ».....	9
I.5.4.Classification par durée.....	9
I.5.4.1.Perturbation permanents.....	9
I.5.4.2.Perturbations transitoires.....	9
I.5.5.Classification par conduction et rayonnement.....	10
I.5.5.1.Par conduction.....	10
I.5.5.2.Par rayonnement.....	10
I.6.Notion.....	10
I.6.1.Le champ lointain.....	10
I.6.2.Le champ réactif.....	10
I.6.3.Le champ proche.....	10
I.6.3.1.Couplage par un champ d'induction magnétique.....	10

I.6.3.2.Couplage par champ électrique.....	11
I.7.Les sources des perturbations.....	11
I.8.Effet de la perturbation.....	11
I.8.1.Circuit numériques.....	11
I.8.2.Circuit analogique.....	13
I.8.3.Les effets thermiques.....	14
I.8.4.Les effets non thermiques.....	14
I.9.Dispositifs des mesures des perturbations.....	15
I.9.1.Les RSIL.....	15
I.10.La CEM en électronique de puissance.....	16
I.10.1.Causes des perturbations en électronique de puissance.....	17
I.10.2.Classification des perturbations en électronique de puissance étendue spectrale du bruit.....	17
I.10.3.Génération d'un signal parasite.....	18
I.10.4.Origine et chemins des perturbations électromagnétiques.....	18
I.10.4.1.Le temps de commutation.....	19
I.10.4.2.La fréquence de commutation $F_0$ .....	19
I.10.4.3.Composantes parasites de la cellule de commutation.....	19
I.11.Réglementation en CEM.....	19
I.11.1.Au niveau international.....	19
I.11.2.Au niveau européen.....	20
I.12.Solution.....	20
I.12.1.La conception d'un circuit imprimé.....	20
I.12.2.Le blindage.....	21
I.13.Conclusion.....	21

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

II.1 Introduction.....	23
II.2 .Hacheur.....	23
II.2.1.Définition.....	23
II.2.2. Les type des hacheurs.....	23
II.3.Représentation des sources.....	24
II.3.1.Alimentation.....	24
II.3.2.Charge.....	24
II.3.3. Association des sources.....	25
II.4.Représentation des convertisseurs continu-continu (DC/DC).....	26
II.5.Notion de rapport cyclique.....	26
II.6.Hacheur Buck.....	26
II.6.1.Définition.....	26
II.6.2.Principe de fonctionnement.....	27
II.7.Hacheur Boost.....	27
II.7.1Définition.....	27
II.7.2.Principe de fonctionnement.....	28

---

---

II.8. Convertisseur Buck-Boost.....	28
II.8.1 Définition.....	28
II.8.2 Principe de fonctionnement .....	28
II.9.Hacheurs réversibles.....	28
II.9.1Hacheur deux quadrants.....	29
II.9.1.1. Hacheur réversible en courant.....	29
II.9.1.2.Hacheur réversible en tension.....	29
II.9.2. Hacheur quatre quadrants (réversible en tension et en courant).....	30
II.10.Modélisation des convertisseurs DC/DC.....	31
II.10.1. Convertisseur Buck.....	32
II.10.1.1. Le mode de courant continu.....	34
II.10.1.2. Le mode de courant discontinu.....	35
II.11. Conclusion.....	37

### **Chapitre III : Les Perturbations Electromagnétiques dans un Réseau DC/DC à base du Buck.**

III.1.Introduction.....	39
III.2.Description du logiciel LTspice.....	40
III.2.1.Les différentes étapes d'utilisation du logiciel LTSpice.....	40
III.3.Modèle du hacheur " BUCK " utilisé sous LTspice.....	41
III.3.1.Modèle d'un seul Buck.....	41
III.3.1.1.Principe.....	41
III.3.1.2.Résultats et interprétations.....	41
III.3.2.Modèle du réseau DC/DC à base de deux Buck en parallèle.....	44
III.3.2.1.Principe.....	44
III.3.2.2. Résultats et interprétations.....	45
III.4.Conclusion et comparaison.....	48

### **Conclusion générale**

# La liste des figures

## CHAPITRE I : Généralité sur la compatibilité électromagnétique.

<b>Figure I.1</b> : Transmission des perturbations.....	2
<b>Figure I.2</b> : Propagation des courants parasites en mode différentiel.....	3
<b>Figure I.3</b> : Propagation des courants parasites en mode commun.....	4
<b>Figure I.4</b> : Couplage par impédance commune.....	5
<b>Figure I.5</b> : Couplage par diaphonie capacitive.....	5
<b>Figure I.6</b> : Diaphonie inductive.....	7
<b>Figure I.7</b> : Couplage d'un champ magnétique avec la boucle formée par un conducteur et la terre.....	8
<b>Figure I.8</b> : Couplage d'un champ électrique avec un condensateur.....	8
<b>Figure I.9</b> : Couplage inducteur avec à plan de masse.....	9
<b>Figure I.10</b> : Exemple de marge dynamique d'une entrée logique CMOS logique.....	12
<b>Figure I.11</b> : Principe de perturbation d'une entrée numérique.....	12
<b>Figure I.12</b> : Schéma de thyristor parasite à l'origine du Latchup.....	13
<b>Figure I.13</b> : Superposition de deux signaux.....	14
<b>Figure I.14</b> : Détection de l'enveloppe d'un signal.....	14
<b>Figure I.15</b> : Photo d'un RSIL.....	15
<b>Figure I.16</b> : Schéma de principe d'un RSIL monophasé.....	16
<b>Figure I.17</b> : Exemple d'une chaîne de conversion d'électronique de puissance.....	17
<b>Figure I.18</b> : Etendue spectrale des phénomènes de perturbateurs.....	18
<b>Figure I.19</b> : Forme d'une onde qui prend en compte les transitoires de commutation(a), spectre (b).....	18
<b>Figure I.20</b> : Forme d'une onde trapézoïdale dissymétrique (a), spectre (b).....	19
<b>Figure I.21</b> : Le tracé des circuits imprimé.....	21

## CHAPITRE II : Généralité et modélisation des convertisseurs DC/DC.....

<b>Figure II.1</b> : Convertisseur DC/DC.....	23
<b>Figure II.2</b> : Conventions adoptées pour les générateurs.....	24
<b>Figure II.3</b> : Conventions adoptées pour les récepteurs.....	25
<b>Figure II.4</b> : l'association des alimentations et des charges.....	25
<b>Figure II.5</b> : Schéma Principe d'un hacheur.....	26
<b>Figure II.6</b> :Schéma de principe d'un hacheur série.....	27
<b>Figure II.7</b> :Schéma de principe d'un hacheur parallèle.....	27
<b>Figure II.8</b> : Schéma de principe d'un hacheur parallèle-série.....	28
<b>Figure II.9</b> :Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant.....	29

<b>Figure II.10:</b> Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension.....	30
<b>Figure II.11:</b> Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension.....	31
<b>Figure II.12 :</b> Quadrants de fonctionnement.....	31
<b>Figure II.13:</b> Le schéma de convertisseur abaisseur.....	32
<b>Figure II.14:</b> Le circuit équivalent pendant l'état ON du transistor et l'état OFF de la diode..	33
<b>Figure II.15:</b> Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode.....	33
<b>Figure II.16:</b> Le circuit équivalent avec transistor et diode à l'état bloqué.....	34
<b>Figure II.17:</b> Les formes d'onde de la tension de sortie et du courant d'inductance.....	35
<b>Figure II.18:</b> Les formes d'onde de la tension et du courant d'inductance dans DCM.....	36

### CHAPITRE III : Les Perturbations Electromagnétiques dans un Réseau DC/DC à base du Buck.

<b>Figure III.1 :</b> Représentation d'un simple circuit RC sous LTspice.....	41
<b>Figure III.2 :</b> Le model d'un seul Buck utilisé dans la simulation.....	41
<b>Figure III.3 :</b> Réponse temporelle du courant de RSIL.....	42
<b>Figure III.4 :</b> Réponse fréquentielle du courant de RSIL.....	42
<b>Figure III.5 :</b> Réponse temporelle de tension de RSIL.....	43
<b>Figure III.6 :</b> Réponse fréquentielle de tension de RSIL.....	43
<b>Figure III.7 :</b> Réponse temporelle du courant de sortie du Buck.....	44
<b>Figure III.8 :</b> Réponse fréquentielle du courant de sortie du Buck.....	44
<b>Figure III.9 :</b> Le model de deux Buck en parallèle utilisé dans la simulation.....	45
<b>Figure III.10 :</b> Réponse temporelle du courant de RSIL.....	46
<b>Figure III.11 :</b> Réponse fréquentielle du courant de RSIL.....	46
<b>Figure III.12 :</b> Réponse temporelle de tension de RSIL.....	47
<b>Figure III.13 :</b> Réponse fréquentielle de tension de RSIL.....	47
<b>Figure III.14 :</b> Réponse temporelle du courant de sortie du Buck.....	48
<b>Figure III.15 :</b> Réponse fréquentielle du courant de sortie du Buck.....	48

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction Générale**

La diffusion rapide et diversifiée des équipements de l'électronique de puissance tant dans le domaine professionnel et militaire (équipement embarqués, variation de vitesse, chauffage, contrôle de l'énergie...) que grand public (domestique, automobile, ordinateurs,...) multiplie les sources de perturbations électromagnétiques. Ces perturbations, parfois très contraignantes, ont conduit les ingénieurs de recherches vers un vaste domaine communément appelé « Compatibilité Électromagnétique » [1].

Les travaux sur la CEM en électronique de puissance ont débuté au milieu des années 1980. Les mondes industriels et universitaires se montraient préoccupés par le problème des perturbations, car les performances de commutations des composants s'étaient considérablement accrues [émergence de l'IGBT (Insulated Gate Effect Transistor)], de même pour les fréquences de commutation et les niveaux de pollution électromagnétique [1].

Le fonctionnement d'un convertisseur statique est intrinsèquement polluant, les grandeurs électriques étant fortement variables à cause de leurs commutations rapides, sur des durées très courtes (1 $\mu$ s à 10 ns), avec des fortes amplitudes (de l'ordre du kilo Volt et du kilo Ampère) et des fréquences pouvant être élevées (100 Hz à 1 MHz). Plus que leurs amplitudes, ce sont surtout les dérivées de ces grandeurs qui sont à l'origine des perturbations électromagnétiques. En effet, tous les phénomènes de couplage s'opèrent proportionnellement à la dérivée d'une grandeur électrique [1].

L'analyse de la tension de sortie des convertisseurs suppose généralement les composants semi-conducteurs de puissance de parfaits interrupteurs. En réalité ces interrupteurs nécessitent un certain temps de commutation. Si en basses fréquences cette supposition est acceptable, en hautes fréquences, la commutation provoque certains effets dont il faut tenir compte. Parmi ces effets on peut citer : le rayonnement des convertisseurs et les courants du mode commun à travers les capacités parasites [1].

D'un point de vue un peu plus technique, les convertisseurs de puissance sont organisés en grandes familles fondées sur des principes de conversion : continu-continu, continu-alternatif (onduleurs), alternatif-continu (redresseurs) et alternatif-alternatif. Dans ces travaux, nous nous intéressons à la famille des convertisseurs continu-continu car elle représente en quelque sorte la base des topologies connues en électronique de puissance (abaisseur, élévateur, inverseur, flyback, forward, etc.) et des phénomènes physiques essentiels à la compréhension de tous les autres convertisseurs (notion de base de cellule de commutation)[2].

Les convertisseurs continu-continu ou commercialement appelés DC-DC constituent une partie essentielle des alimentations de puissance. En effet, on trouve ces convertisseurs dans de nombreuses applications à différents niveaux de puissance. Par exemple, à des faibles puissances (quelques watts) dans des chargeurs et alimentations de téléphones portables, à des puissances moyennes (quelques centaines de watts) dans des alimentations industrielles, et aussi à des fortes puissances (quelques kW) pour des applications de soudage électrique par exemple [2].

Les convertisseurs DC-DC ont donc un rôle très important dans les systèmes de conversion d'énergie. Pour ce type de fonction, plusieurs topologies de circuits sont proposées. Nous pouvons les classer généralement par les topologies simples, qui sont les convertisseurs DC-

DC de second ordre du point de vue de la modélisation mathématique, et les topologies complexes, qui sont ceux d'ordre plus élevé. Pour les topologies simples nous citons les convertisseurs de second ordre de type Buck (abaisseur), Boost (élevateur) et Buck-Boost (inverseur) [2].

Dans le premier chapitre, nous allons voir une entrée à la compatibilité électromagnétique et citer les différents modes de propagations des perturbations électromagnétiques, en outre on mettra en évidence les effets de la PEM et les solutions pour en minimiser.

Dans le deuxième chapitre, nous intéresserons au hacheur et tout ce qu'il le concerne, ses types, son principes de fonctionnement, en plus on fera une modélisation d'un seul type de hacheur, le Buck, on va étudier et modéliser les équations de courant et de tension dans ses deux modes « Mode Courant Continu » et « Mode Courant Discontinu ».

Dans le troisième et le dernier chapitre, on va comparer entre les réponses obtenues des simulations des deux modèles sur le « LTspice », l'un est avec un seul Buck, l'autre est un réseau de deux Bucks en parallèle. Par suite, on va identifier lequel des deux modèles est le plus polluant avec les éléments parasites constituants en plus on va voir l'impact de ces derniers sur le circuit.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et des perspectives possibles donnant suite à ces travaux.

# CHAPITRE I

## Généralité sur la Compatibilité Électromagnétique

## I.1.INTRODUCION

Depuis 1996, aucun appareil ne peut théoriquement être commercialisé sans avoir subi de test de compatibilité électromagnétique (CEM). La CEM a pour objet de prendre en compte les perturbations transmises par les appareils en fonctionnement pour assurer un fonctionnement correct de plusieurs appareils en même temps.

Cela implique deux choses : d'une part que les perturbations électromagnétiques émises par l'appareil ne soient pas trop importantes et que d'autre part que les appareils puissent fonctionner de façon satisfaisante en présence de perturbations générées par d'autres appareils. On trouve des exemples de problèmes de CEM dans la vie quotidienne.

Par exemple, un téléphone portable qui perturbe le fonctionnement du moniteur de l'ordinateur. Un autre exemple est celui du fonctionnement d'un vélomoteur mal antiparasité qui gêne la réception de la radio dans une voiture.

Ces dernières années les performances des appareils ont beaucoup augmentés. Ces améliorations ont été obtenues par une élévation de la fréquence de fonctionnement des dispositifs et par une augmentation de la densité d'intégration. [3]

## I.2.DEFINITION

Une définition précise de l'étude de la compatibilité électromagnétique (CEM) peut être :  
« Capacité d'un dispositif, équipement ou système à fonctionner de manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour quoi que ce soit dans cet environnement ». [3]

La définition parle de dispositif, équipement ou système. Cela signifie que dans le cas d'un PC chacun de ces composants internes devra être compatible au niveau CEM, que le PC complet sera compatible et qu'un réseau constitué de plusieurs PC satisfera aux normes de CEM. Tout matériel avant d'avoir été commercialisé subira des tests de CEM.

Etre compatible signifie deux choses :

- 1-Ne ne pas envoyer vers l'extérieur trop de perturbations.
- 2-Etre capable de fonctionner correctement quand un dispositif génère des perturbations à proximité.

Pour vérifier la CEM d'un dispositif, on procède en vérifiant que le dispositif fonctionne correctement en présence de perturbations. Dans les tests on injecte des perturbations (en mode conduit et en mode rayonné) sur un appareil et on vérifie qu'il fonctionne normalement. Pour les tests beaucoup de matériels sont nécessaires comme une chambre de mesure et de test, diverses antennes de mesure des pinces d'injection, un analyseur de spectre, un RSIL. Ces relevés de normes relève de spécialistes et elles sont confiés à des entreprises spécialisées.

On vérifie d'autre part que l'appareil n'envoie pas trop de perturbations vers l'extérieur en mesurant les champs électriques et magnétiques à une certaine distance quand il s'agit de

perturbations rayonnées. Quand il s'agit de perturbations conduites, on mesure les perturbations envoyés vers le secteur et on vérifie qu'elle n'exède pas une certaine norme.

Les normes sont éditées pour chaque classe d'appareils. Ces normes spécifient la fréquence des mesures, la distance entre la source et le récepteur, le niveau de la mesure. [4]

### I.3.ASPECTS FONDAMENTAUX DE LA CEM

Lors de l'analyse d'un problème de perturbation électromagnétique on constate que le problème englobe 3 éléments: Une source de perturbation qui émet de l'énergie électromagnétique; Un canal de couplage au travers duquel l'énergie de cette perturbation se propage; et enfin un récepteur qui capte cette énergie, le traite, la superpose a sa fonction normale. (Figure I.1)

Si la perturbation est trop élevée et provoque des interférences alors récepteur devient une victime. [5]

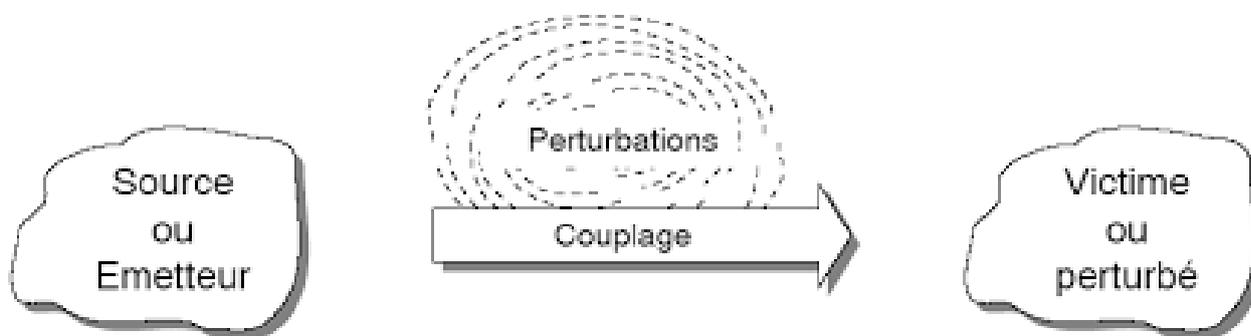


Figure I.1 : transmission des perturbations [5]

### I.4.LES NIVEAUX DE PERTURBATIONS

#### I.4.1.Niveau d'immunité

Fonctionnement d'un appareil ou d'un système ou d'une installation d'une manière satisfaisante dans un environnement électromagnétique. Autrement, l'immunité désigne un comportement d'un appareil en réponse à une contrainte externe, jugé incompatible avec une utilisation normale. L'immunité est aussi appelé la susceptibilité ; la capacité à supporter les perturbations (EMS = Electro Magnetic Susceptibility).

#### I.4.2.Limite d'émission

Production et propagation de perturbation électromagnétiques. Autrement émission (normes aérospatiales) ou perturbations (normes industrielles) désignent les signaux volontaires ou non dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement des appareils ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage ; c'est le pouvoir perturbateur d'un équipement électrique (EMI = ElectroMagneticInterference). [6]

### I.5.CLASSIFICATIONS DES PERTURBATIONS

#### I.5.1.Classification par mode de propagation

On entend parler très souvent des deux modes de propagation: le mode différentiel et le mode commun. On aurait pu inclure ces deux définitions dans les modes de couplages, mais

l'importance de ces deux termes, notamment le mode commun, mérite qu'on les définisse avec précision. [7]

Dans le mode différentiel la totalité du courant circule dans la liaison bifilaire entre les deux appareils. Le courant « d'aller » est égal au courant de « retour ». Dans le mode commun, une partie du courant circule à travers la capacité de couplage entre l'amplificateur et le boîtier métallique. Ce courant circule à travers la masse de référence de potentiel commun. Le courant dans la liaison filaire est divisé en deux parties. [3]

### I.5.1.1. Le mode différentiel

Le courant se propage sur l'un des conducteurs, passe à travers l'appareil et revient à la source par un autre conducteur :

Ce mode de couplage se produit par exemple :

- Lorsque la perturbation est superposée à une alimentation (harmoniques)
- Lorsque la perturbation crée un courant supplémentaire dans la boucle.(Figure I.2) [8]

Si on considère le câble constitué par l'ensemble des deux conducteurs, la somme algébrique des courants dans ce câble est nulle, puisqu'il y a un courant « aller » dans le premier conducteur, et un courant « retour » de même intensité, mais opposé, dans le second conducteur.

Pour éviter les problèmes de CEM, il suffit que les deux conducteurs soient suffisamment proches. [7]

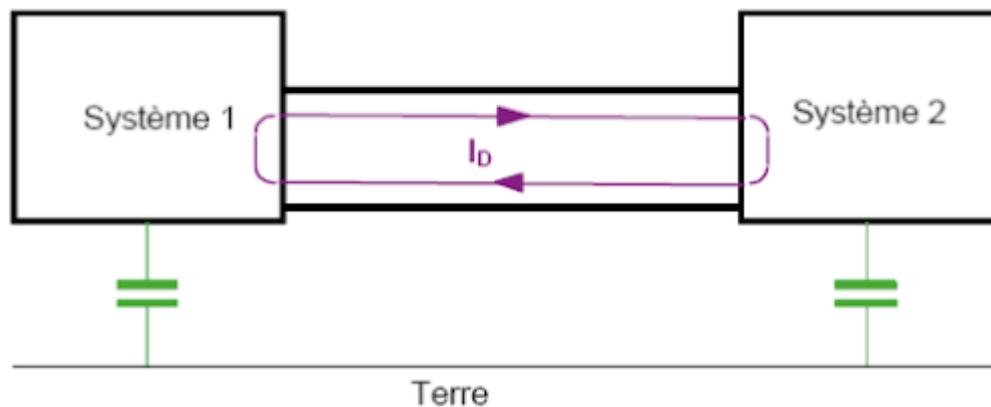


Figure I.2 : propagation de courants parasites en mode différentiel [9]

### I.5.1.2. Le mode commun

Le courant se propage sur tous les conducteurs dans le même sens et revient par la masse, par exemple via les capacités parasites : passe à travers l'appareil et revient à la source par un autre conducteur. C'est le cas le plus fréquent de transmission des perturbations, par exemple pour les câbles, car le fil de signal et le fil de retour sont proches et reçoivent la même perturbation. (Figure I.3).

Le mode commun (mode asymétrique) est le plus dangereux car il permet de transmettre la perturbation à d'autres systèmes électriques, aussi pour le mode commun le rayonnement est plus fort [8]

Soit un câble constitué de plusieurs conducteurs, connecté à un appareil électrique ou électronique. Supposons que des champs électromagnétiques extérieurs induisent un courant parasite dans l'ensemble des conducteurs de ce câble. Ce courant entre dans l'appareil victime par ce câble. Remarquons que dans le mode différentiel, il existait dans le câble un conducteur pour le courant « aller » et un conducteur pour le courant « retour ». Ce n'est pas le cas ici : le champ électromagnétique a induit des courants en phase dans tous les conducteurs du câble. Comme il n'y a pas de conducteur de retour de ce courant dans ce câble, il faut se poser la question de savoir par quel chemin le courant de mode commun va se refermer, puisqu'en principe, un courant parcourt un circuit fermé.

Puisque ce courant est « entré » dans l'appareil, il va nécessairement ressortir de l'appareil :

- par d'autres câbles de l'appareil, s'ils existent.
- par un conducteur de « terre », s'il existe.
- par la capacité entre l'appareil et la « terre », qui existe toujours. [7]

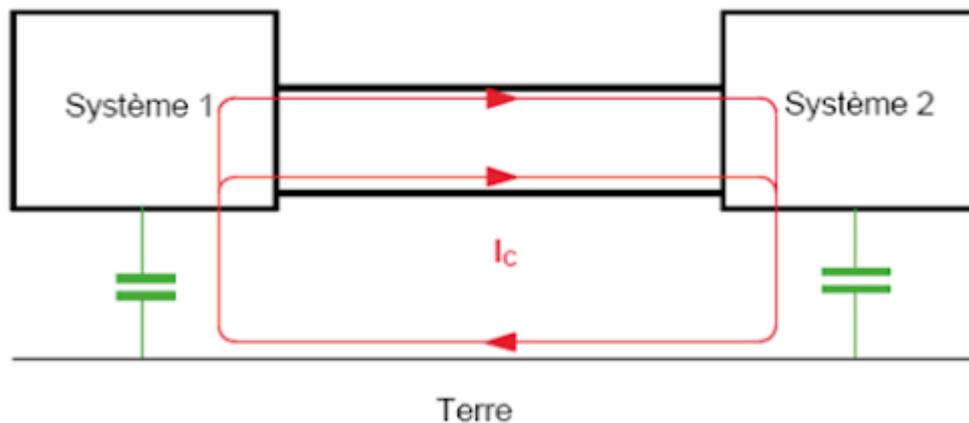


Figure I.3 : propagation de courants parasites en mode commun [9]

## I.5.2. Classification par type de couplage

### I.5.2.1. Couplage par impédance commune

L'impédance d'un conducteur électrique n'est jamais nulle. Tout courant (utile ou parasite) qui parcourt un conducteur génère une tension entre ses extrémités. Ce phénomène est particulièrement sévère pour les circuits à bas niveaux (capteurs, mesures) ou rapides (vidéo, radio) (Figure I.4) [7]

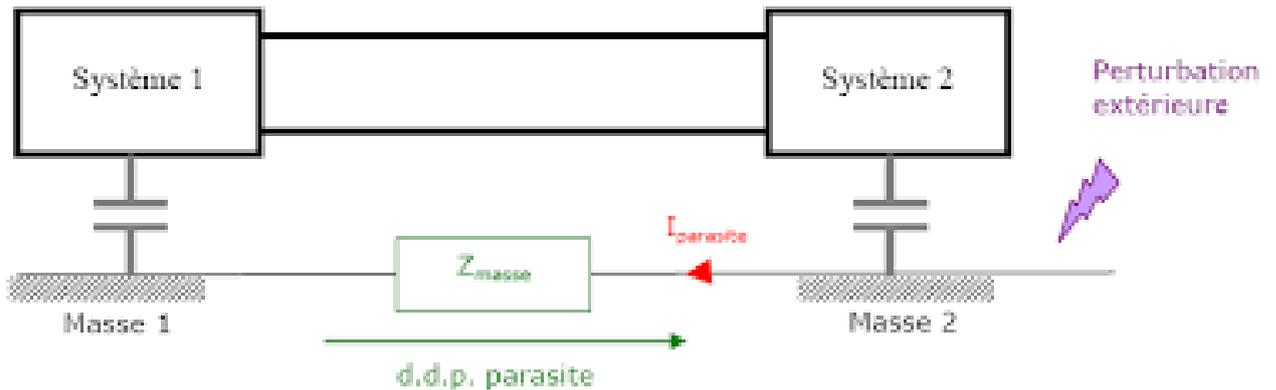


Figure I.4 : couplage par impédance commune [10]

### I.5.2.2. Couplage par diaphonie capacitive

La différence de potentiel entre un conducteur et son environnement génère autour de ce conducteur un champ électromagnétique qui, à faible distance, peut être approximé comme électrique. Ce champ, s'il est variable, peut se coupler dans une autre structure filaire qui lui est parallèle et générer à son tour un courant, injecté sur les conducteurs proches. Ce phénomène est appelé couplage par diaphonie capacitive. (Figure I.5). [11]

La diaphonie capacitive est nulle en continu. Comme la diaphonie inductive, elle demeure très faible tant que la fréquence de la d.d.p. coupable reste dans la gamme des fréquences industrielles. Aux fréquences élevées, la diaphonie capacitive est équivalente en énergie à la diaphonie inductive. Ce phénomène provient de l'effet de ligne qui donne l'illusion, aux premiers instants (pendant un aller-retour) qu'une ligne est une résistance (égale à l'impédance caractéristique)

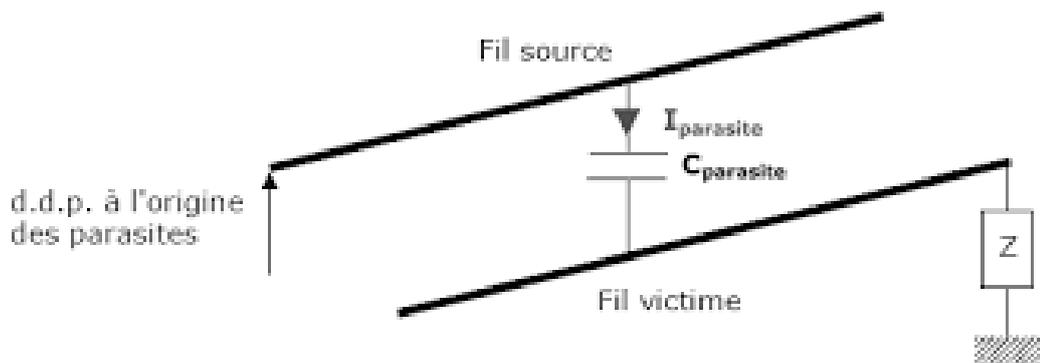


Figure I.5 : Couplage par diaphonie capacitive [10]

Réduire le couplage par diaphonie capacitive implique de diminuer la capacité entre les conducteurs coupable et victime ou encore de diminuer les variations brutales de d.d.p. du circuit coupable.

#### I.5.2.2.a. Couplage capacitif de mode différentiel

Dans ce premier cas, le courant parasite est collecté entre le conducteur aller et le conducteur de retour du circuit victime. Les remarques précédentes concernant la diaphonie inductive des câbles à paires torsadées restent valides en diaphonie capacitive. Cependant, il est possible ici de diminuer la diaphonie capacitive en basses fréquences par un écran rendu conducteur par aluminage.

En effet, dans ce cas, le champ électrique ne traverse pas les feuillards conducteurs, même très minces (alors que dans le cas de la diaphonie inductive, les champs magnétiques perturbateurs le peuvent). Il est donc possible de blinder soit la paire coupable, soit la paire victime, soit encore mieux les deux car la diaphonie capacitive de mode différentiel, contrairement à l'inductive, est très facile à réduire par écran.

#### **I.5.2.2.b. Couplage capacitif de mode commun**

Dans ce deuxième cas, le champ électrique est généré par la d.d.p. de mode commun entre un câble et la masse. Le courant parasite est collecté par un câble victime parallèle ou câble coupable. De même que pour la diaphonie inductive, si le câble employé est blindé et que son écran est connecté convenablement à la masse, aucun couplage câble à câble n'est à craindre. Pour que le blindage puisse éliminer le couplage capacitif, la tension du blindage doit être égale à zéro.

Pour une ligne électriquement courte, la mise à la terre du blindage à une de ses extrémités est suffisante pour maintenir la tension égale à zéro le long du blindage. Lorsque la longueur électrique de la ligne augmente, le blindage doit être mis à la terre à de multiples points espacés d'environ  $\lambda / 10$  ( $\lambda$  : longueur d'onde) pour assurer une tension approximativement constante le long du blindage.

#### **I.5.2.3. Couplage par diaphonie inductive**

Le courant dans un fil génère autour de ce fil un champ électromagnétique qui, à faible distance, peut être approximé comme un champ purement magnétique. Ce champ, s'il est variable, génère à son tour une différence de potentiel contre électromotrice dans les boucles voisines. Ce phénomène est appelé couplage par diaphonie inductive. (Figure I.6).

Dans le cas d'une ligne multifilaire, un courant circulant sur l'une des lignes va générer un champ magnétique engendrant à son tour une différence de potentiel (d.d.p.) sur les conducteurs voisins, reliés à la terre par une impédance  $Z$ . Cette d.d.p. est proportionnelle à la mutuelle inductance  $M$  existant entre les deux conducteurs. Pour réduire le couplage par diaphonie inductive, il faut donc diminuer la mutuelle inductance entre les circuits coupable et victime ou encore limiter les variations rapides de courant dans le circuit coupable.

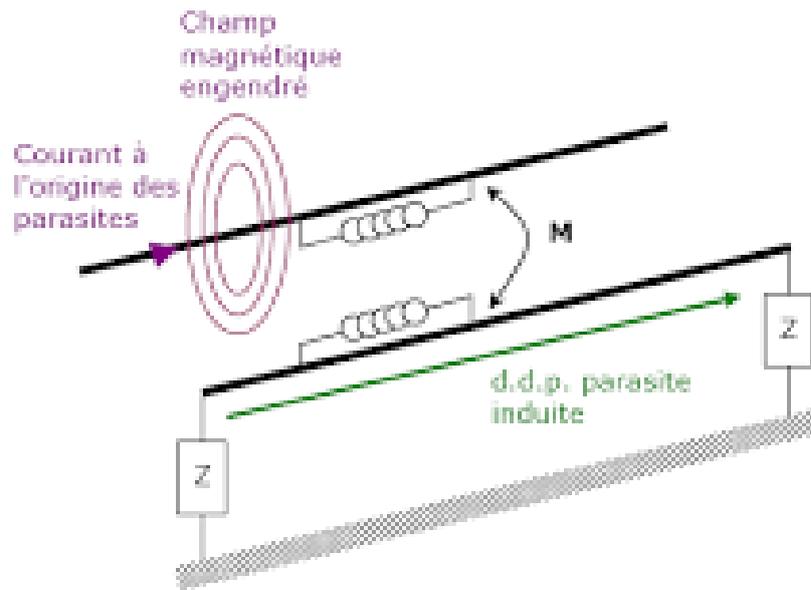


Figure I.6 : diaphonie inductive [10]

### I.5.2.3.a. Diaphonie inductive de mode différentiel

Dans ce cas, la d.d.p. parasite est induite entre le fil aller et le fil de retour du circuit victime, c'est-à-dire entre les deux conducteurs d'une paire. Si la distance entre les conducteurs aller et retour est faible, la d.d.p. sera faible. Pour réduire la diaphonie inductive de mode différentiel entre deux paires voisines et serrées sur une longueur significative ( $> 5$  cm), il est donc nécessaire de les torsader avec des pas différents, ce qui est mis en œuvre dans les câbles de télécommunications.

### I.5.2.3.b. Diaphonie inductive de mode commun

La diaphonie de mode commun est plus sévère que la diaphonie de mode différentiel. Pour ce couplage, la d.d.p. parasite est induite entre un câble parallèle et le conducteur de masse le plus proche. Si la distance entre le câble victime et le conducteur de masse le plus proche est faible, la d.d.p. induite sera faible. D'où la nécessité d'utiliser des câbles blindés, afin de rapprocher les masses des conducteurs. De plus, ces blindages, ou écrans, doivent être correctement mis en œuvre, notamment en connectant à la terre leurs deux extrémités. En effet, pour que le couplage inductif soit réduit, il faut en effet une circulation de courant dans le blindage dont le flux du champ magnétique s'oppose à celui créé par le circuit source.

### I.5.2.4. Couplage champ à boucle

Un champ magnétique variable traversant une boucle  $y$  induit un flux magnétique variable dont toute variation crée une différence de potentiel contre électromotrice. Ce phénomène est appelé couplage champ à boucle. (Figure I.7).

Dans le cas d'une ligne monofilaire, un courant de mode commun peut être induit par un champ magnétique externe dans la boucle formée par le câble, le plan de terre et les impédances de connexion des équipements à la terre.

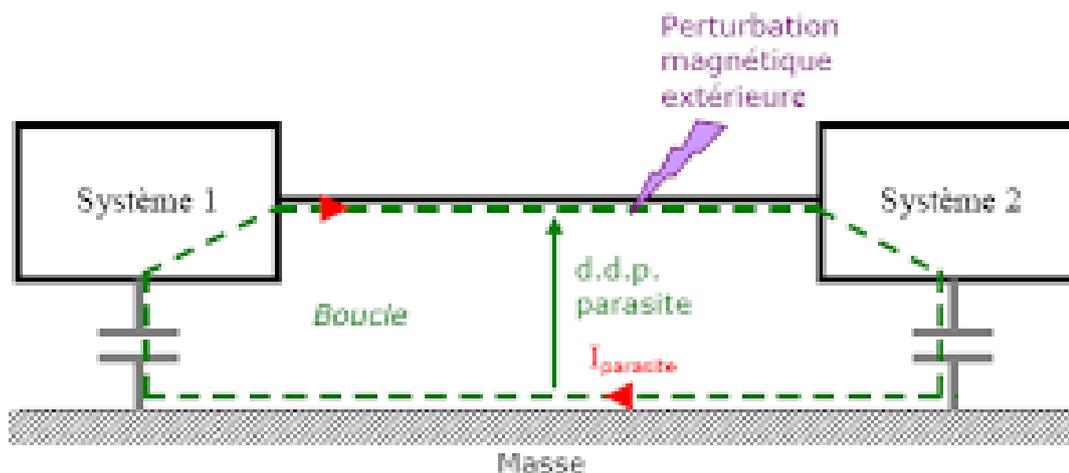


Figure I.7 : Couplage d'un champ magnétique avec la boucle formée par un conducteur et la terre. [10]

### I.5.2.5. Couplage champ à câble

Un champ électrique variable engendre sur les conducteurs parallèles à ses lignes de champ un courant électrique. Ce phénomène est appelé couplage champ à câble.

Dans le cas du réseau filaire cuivré, les lignes aériennes se comportent comme de véritables antennes vis-à-vis des multiples champs électriques alentours, qui y induisent des courants parasites de mode commun. Le réseau électrique domestique présente un comportement identique face aux perturbateurs électromagnétiques présents dans les habitations. (Figure I.8).

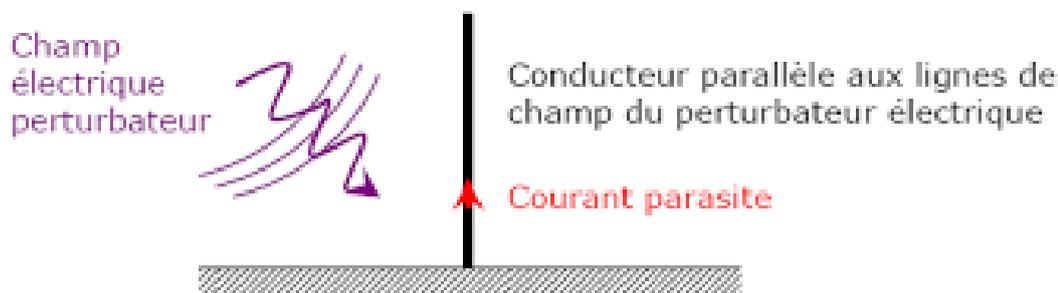


Figure I.8 : couplage d'un champ électrique avec un conducteur. [10]

### I.5.2.6. Couplage champ à câble à plan de masse

La capacité entre deux conducteurs voisins n'est jamais nulle. Sous l'action d'une perturbation extérieure, une différence de potentiel peut être engendrée entre ces deux conducteurs, donnant naissance à un courant de mode commun entre les deux systèmes. Ce phénomène est appelé couplage conducteur à plan de masse. Dans le cas d'une ligne bifilaire, un courant parasite de mode commun apparaîtra au niveau de la capacité existant entre le conducteur cuivré et la masse (Figure I.9) [11]

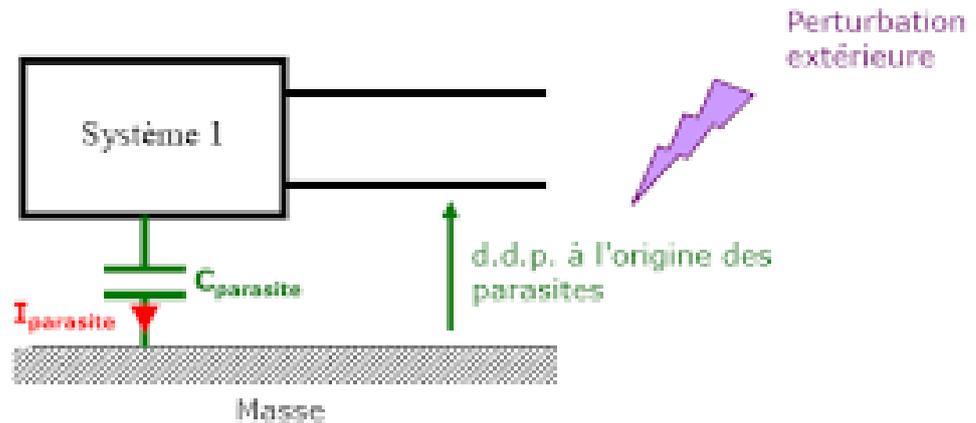


Figure I.9 : couplage inducteur à plan de masse. [10]

### I.5.3. Classification par fréquence

#### I.5.3.1. Les perturbations à basse fréquence «BF»

Par convention, on appelle « basse fréquence » ou « BF » une perturbation dont le spectre représentatif reste inférieur à 1 MHz. Les câbles blindés sont médiocrement efficaces en BF, mais les chemins de câbles métalliques bien interconnectés sont efficaces dès le continu.

#### I.5.3.2. Les perturbations haute fréquence «HF»

Par convention, on appelle « haute fréquence » ou « HF » une perturbation dont le spectre représentatif s'étend au-delà de 1 MHz. L'effet d'antenne des câbles en HF est significatif et la mise en œuvre de la reprise des écrans de câbles blindés y est critique[12]

### I.5.4. Classification par durée

#### I.5.4.1. Perturbations permanentes

Ce sont les perturbations provenant essentiellement :

- d'émetteur radio (par rayonnement direct, ou par induction sur les câbles)
- du champ magnétique généré par les lignes d'alimentation
- de la déformation de la tension de l'alimentation (harmoniques, ondulation DC...)

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.5.4.2. Perturbations transitoires

Ce sont des perturbations provenant essentiellement :

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

Dans la réglementation, il est globalement admis que la susceptibilité de l'appareil permette une dégradation temporaire de fonction, mais avec auto-récupération de cette fonction une fois la perturbation terminée (sans intervention de l'utilisateur). [7]

### **I.5.5. Classification par conduction et rayonnement**

On classe les couplages en deux catégories :

#### **I.5.5.1. Par conduction**

Si la source et la victime sont voisins avec ou sans liaison galvanique, le couplage est dit proche et il peut être de nature capacitive, inductive ou résistive. Les outils d'analyse font appel à des modèles de types réseau électrique où les couplages sont représentés par des capacités, des mutuelles ou des résistances (dans le cas de liaisons galvaniques directes). Les phénomènes perturbateurs sont dans ce cas les variations rapides de courant ou de tension.

Ce type de perturbations est appelé perturbations conduites et elles se développent dans les câbles ou conducteurs de liaisons aux réseaux, sources d'énergie ou charges.

#### **I.5.5.2. Par rayonnement**

Si source et victime sont éloignées et sans liaison galvanique, la perturbation est transmise par une onde électromagnétique, on parle de perturbations rayonnées ou propagées. Les phénomènes sont décrits avec les outils théoriques et expérimentaux propres à ce domaine. [13]

## **I.6. NOTATION**

Pour des distances à la source inférieures à  $\lambda/2\pi$  nous considérerons que nous sommes en champs proches.

Pour des distances à la source supérieures à  $\lambda/2\pi$  nous considérerons que nous sommes en champs lointains. [14]

### **I.6.1. Le champ lointain**

Ou région de Fraunhofer, où les propriétés du champ électromagnétique sont bien établies. Il apparaît le phénomène classique de propagation des ondes électromagnétiques. Cette région se situe généralement à plusieurs longueurs d'onde du périmètre de la source avec un champ électromagnétique dont l'amplitude diminue lorsque la distance à l'antenne augmente et s'annule à l'infini.

### **I.6.2. Le champ réactif**

Très proche : entourant immédiatement la source, appelée zone d'évanescence ou de Rayleigh. L'onde électromagnétique n'est pas encore formée. Les deux champs électrique et magnétique sont indépendants.

### **I.6.3. Le champ proche**

Ou région de Fresnel. Dans cet espace, situé un peu plus loin de la source, le phénomène de propagation commence à apparaître mais on dit que l'onde n'est pas encore formée. Les champs électriques et magnétiques sont toujours indépendants.

#### **I.6.3.1. Couplage par un champ d'induction magnétique**

Le champ magnétique variable créé par un conducteur parcouru par un courant, est intercepté par un conducteur voisin se comportant comme une boucle. Il y a donc apparition d'une force contre-électromotrice. Il est pratique de modéliser le couplage entre les 2 boucles par une mutuelle entre les deux circuits.

### **I.6.3.2. Couplage par champ électrique**

Un champ électrique  $E$  variable appliqué sur un circuit conducteur ouvert fait apparaître une tension  $V$ . Le couplage par champ électrique est équivalent au couplage par l'intermédiaire d'une capacité. Une différence de tension variable entre ces deux circuits va générer un courant électrique de l'un vers l'autre à travers la capacité parasite. [15]

## **I.7. LES SOURCES DE PERTURBATIONS**

Tout appareil est soumis à diverses perturbations électromagnétiques, et tout appareil électrique en génère. Ces perturbations sont générées de multiples manières. A la base, leurs faits générateurs sont principalement des variations brusques de grandeurs électriques (Tension ou Courant).

Les sources des émissions électromagnétiques peuvent être d'origine:

- Naturelle: atmosphériques, galactiques, solaires, bruit thermique...
- Artificielle : parmi ces sources, certaines sont :
  - 1- Intentionnelles (émetteurs radioélectrique, téléphone portable, four à induction .....).
  - 2- Non intentionnelles : systèmes d'allumage des moteurs à explosion, électronique de protection, appareillage de puissance. [15]

## **I.8. EFFET DE LA PERTURBATION**

Dans le but d'étudier l'immunité des circuits intégrés vis-à-vis d'une perturbation électromagnétique, il est d'abord nécessaire de bien comprendre l'impact des perturbations sur les différents types de composants. Dans cette partie, nous nous intéressons aux conséquences des perturbations électromagnétiques sur un circuit intégré en fonctionnement. Les réactions des circuits numériques et analogiques diffèrent légèrement. D'abord nous nous intéressons aux circuits intégrés numériques et ensuite aux circuits analogiques.

### **I.8.1. Circuits numériques**

Trois principales conséquences sont répertoriées sur l'impact d'une perturbation électromagnétique sur un circuit intégré numérique :

-Le problème de marge d'immunité en tension des entrées. Lorsque la tension d'alimentation diminue, ce qui correspond à la tendance actuelle, les seuils de commutation aussi diminuent et par conséquent les marges de bruit en entrée sont plus faibles voire nulles. Par conséquent, la perception d'une perturbation peut se traduire par une inversion du niveau de référence (Figure I.10).

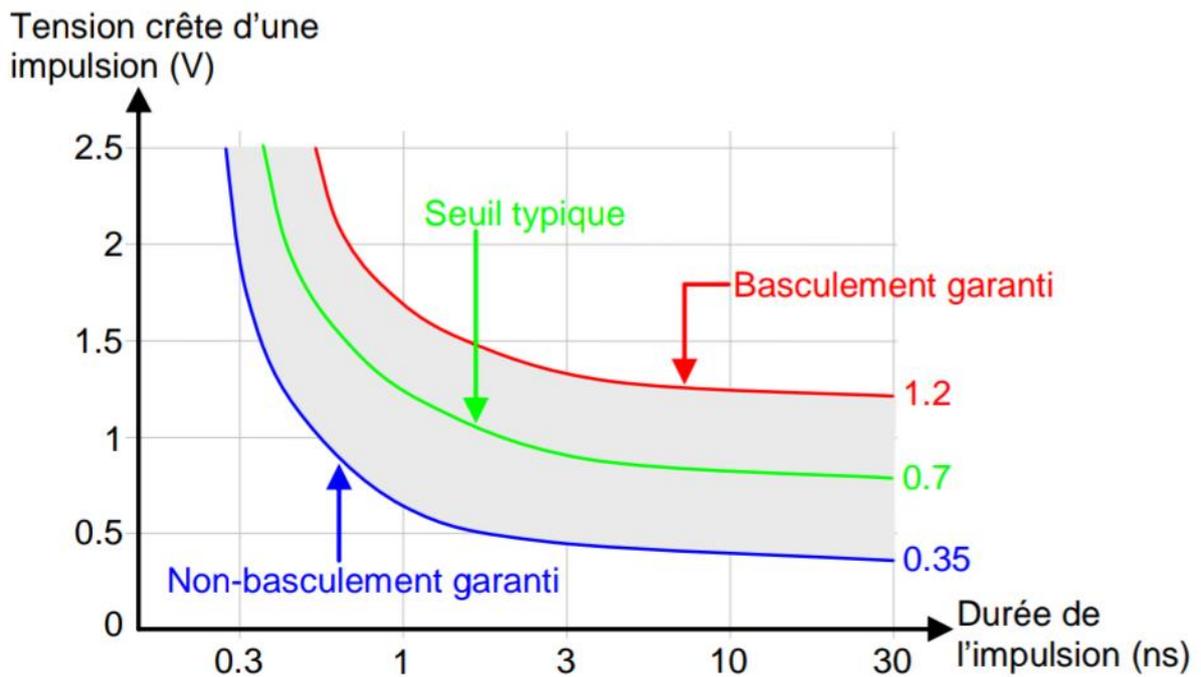


Figure I.10 : Exemple de marge dynamique d'une entrée logique CMOS rapide. [16]

-Le problème d'immunité des sorties en courant. Du fait de sa faible impédance, la sortie d'un composant élémentaire peut être perturbée par l'injection d'un courant parasite d'une amplitude de l'ordre de dix milliampères. Cela peut se traduire par un changement d'état de cette sortie. (Figure I.11)

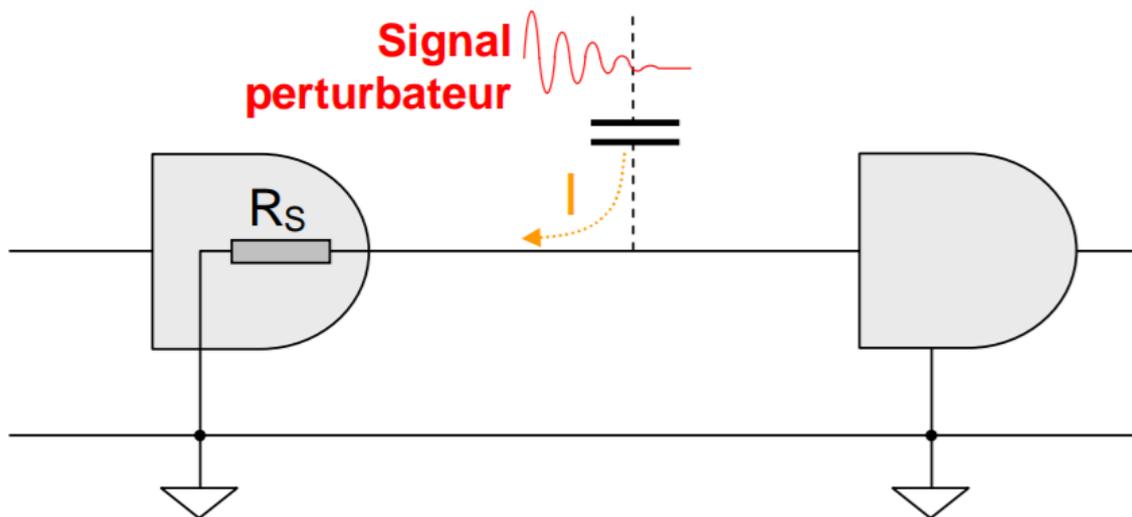


Figure I.11 : Principe de perturbation d'une sortie numérique. [16]

-Le Phénomène de latchup. Le phénomène décrit par « A. Charoy » est bien connu. Il s'agit d'un type particulier de court-circuit pouvant se produire dans une puce. Il est dû à la mise en conduction involontaire d'une succession de jonction PNPN formant un thyristor parasite entre

l'alimentation et la masse. C'est le déclenchement de ce thyristor qui court-circuite l'alimentation et la masse. (Figure I.12)

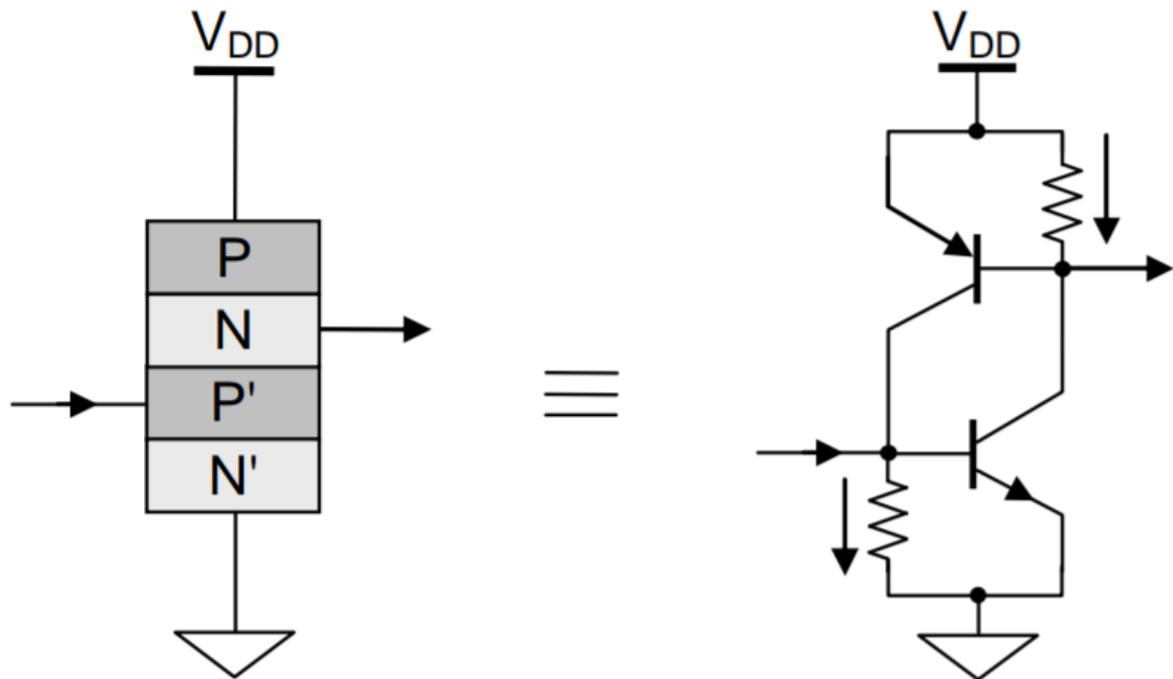


Figure I.12 : Schéma du thyristor parasite à l'origine du latchup. [16]

### I.8.2.Circuit analogique

Dans un circuit intégré analogique, les conséquences d'une perturbation électromagnétique ne sont pas les mêmes lorsque cette perturbation est dans ou en dehors de la bande de fonctionnement de ce circuit. Une perturbation injectée dans la bande de fonctionnement d'un circuit est susceptible de créer un dysfonctionnement, même si sa puissance est faible. La perturbation se superpose au signal utile. Cela se traduit par la création de tensions d'offset. Dans l'exemple d'un capteur de température, S. Baffreau montre que le traitement du système est erroné à cause des données en entrée. On peut également mentionner la fluctuation du courant d'alimentation des composants. Les convertisseurs numérique/analogique (analogique/numérique) par exemple y sont très sensibles. De même que certains amplificateurs opérationnels. (Figure I.13)

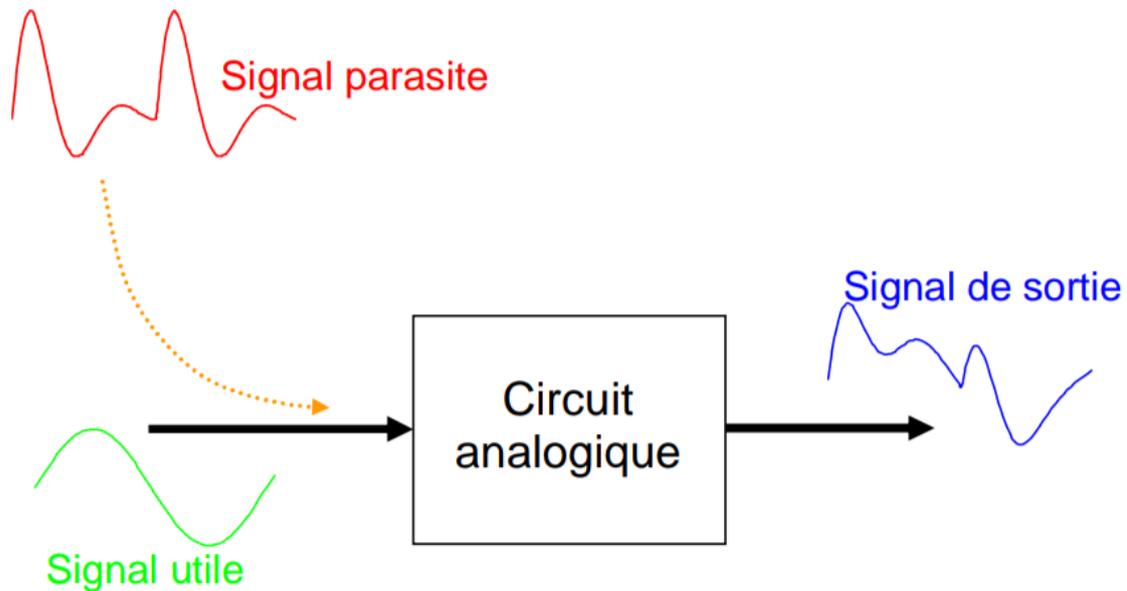


Figure I.13 : Superposition de deux signaux. [16]

Lorsqu'une perturbation est en-dehors de la bande de fonctionnement du circuit intégré, il faut une puissance nettement plus élevée pour arriver à induire la même perturbation que si elle était dans la bande du circuit. Lorsque le signal de perturbation a une fréquence très grande devant la fréquence maximale du signal utile, il se produit un phénomène dit de détection d'enveloppe. (Figure I.14) [16]

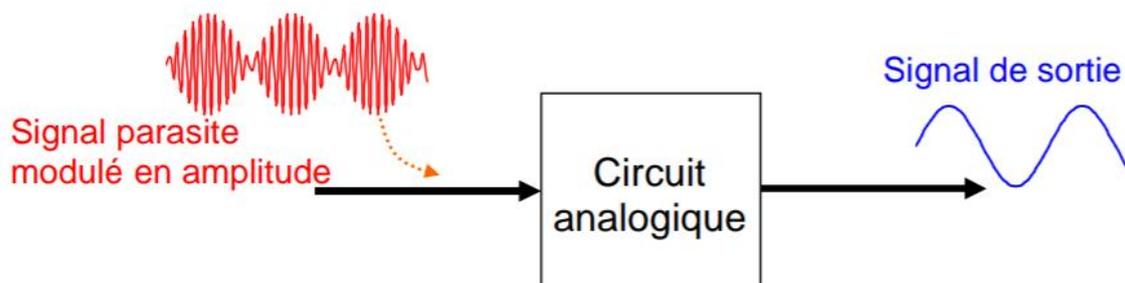


Figure I-18 : Détection de l'enveloppe d'un signal.

Figure I.14 : Détection de l'enveloppe d'un signal. [16]

### I.8.3. Les effets thermiques

Une électrisation par contact ou un champ électromagnétique suffisamment puissant peuvent chauffer les substances qui y sont exposées (C'est le principe du four à micro-onde, des plaques à induction, de la soudure à l'arc...). Pour les effets thermiques des champs électromagnétiques, dans la réglementation de sécurité électrique, ce sujet est traité dans le cadre de la limitation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques. Cette réglementation permet de limiter la chauffe excessive des tissus biologiques, sans toutefois de preuve incontestable que celle-ci suffit pour éviter tout effet biologique sur le long terme.

### I.8.4. Les effets non thermiques

L'existence même de ces effets est sujet à polémique. Ces effets sont difficiles à prouver car, d'une part, elle concernerait une catégorie minoritaire de population possédant un potentiel d'hypersensibilité électromagnétique, et d'autre part totalement in quantifiable car le phénomène source de ces effets n'est pas identifié. [7]

## I.9. DISPOSITIFS DE MESURE DES PERTURBATIONS

On distingue deux catégories de dispositifs de mesure utilisés en CEM. La première concerne la mesure des perturbations conduites à haute fréquence, elle comprend le Réseau Stabilisé d'Impédance de Ligne (RSIL) et les capteurs de courant passif basés sur le principe du transformateur de courant. Dans la seconde catégorie, on trouve divers types d'antennes destinées aux mesures en champ proche ou lointain. Dans tous les cas, le signal issu du capteur est analysé dans le domaine temporel (oscilloscope) et plus généralement dans le domaine fréquentiel grâce à l'analyseur de spectre hétérodyne.

### I.9.1. Le RSIL

Le RSIL s'apparente à un filtre qui est inséré entre le dispositif sous test et le réseau fournissant l'énergie. Son rôle est double. Il doit isoler le réseau, sur lequel peuvent exister des perturbations de mode commun et de mode différentiel, de l'équipement sous test. Cependant, il doit présenter à la fréquence du réseau une chute de tension sortie/entrée inférieure à 5% de la tension nominale lorsqu'il est parcouru par le courant nominal. Enfin, il doit présenter une impédance de fermeture constante vis-à-vis des perturbations à haute fréquence émises par le dispositif sous test, tant en mode commun que différentiel, et ceci indépendamment de l'impédance présentée par le réseau d'énergie. Cette impédance est normalisée par le CISPR [1-2]. La norme définit les limites de variation de cette impédance, mesurée entre une borne de sortie et la terre dans la gamme de fréquence 10kHz-100MHz. (Figure I.15) [14]



Figure I.15 : Photo d'un RSIL. [14]

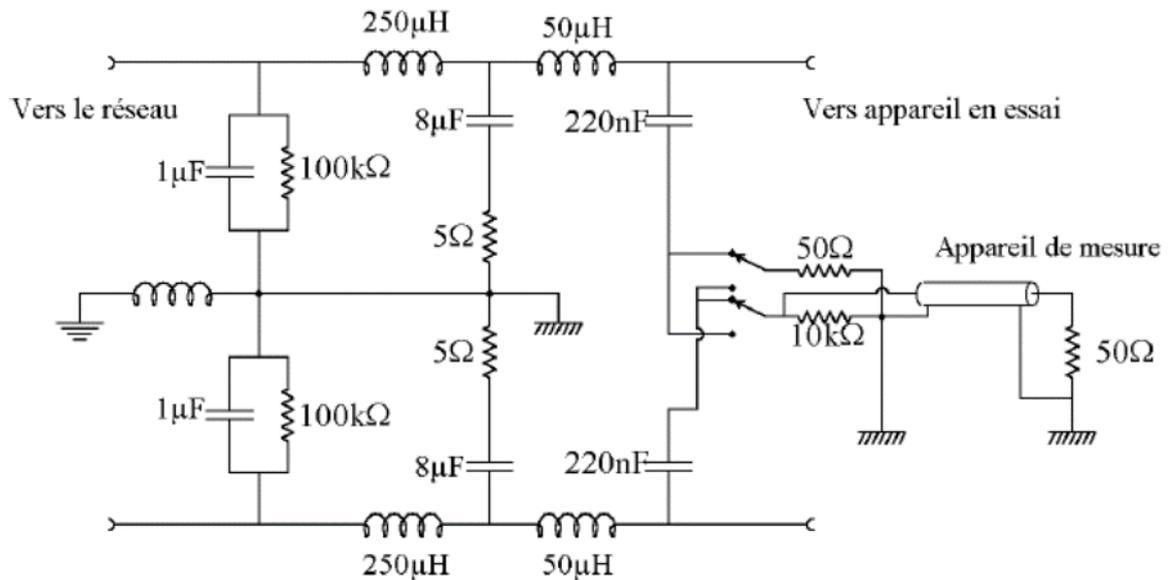


Figure I.16 : Schéma de principe d'un RSIL monophasé. [14]

## I.10.LA CEM EN ELECTRONIQUE DE PUISSANSE

Les convertisseurs, alimentations à découpage, onduleurs alimentant les machines électriques, sont des sources de perturbations électromagnétiques très importantes, qui trouvent leur origine dans les commutations rapides des semi-conducteurs de puissance. Cette rapidité réduit les coûts et encombrements des convertisseurs, mais seulement si la CEM est assurée. A défaut, les communications et les autres équipements électroniques sont perturbés, et la qualité du convertisseur est mise en cause. Une prise en compte tardive de la CEM conduit à des surcoûts et délais importants. La réduction des temps de commutation a fait entrer l'électronique de puissance dans le domaine scientifique des hautes fréquences, de telle sorte que les « trucs et astuces » ne sont plus suffisants, mais qu'il faut une remise en cause profonde des approches scientifiques. [17]

L'évolution des technologies dans l'électronique de puissance a permis un accroissement important du nombre de convertisseurs statiques dans tous les domaines industriels et grand public. L'augmentation de la puissance et de la rapidité de ces convertisseurs a fait que ces derniers créent des perturbations électromagnétiques de plus en plus importantes. L'étude de la compatibilité électromagnétique est devenue donc un passage obligatoire pour les concepteurs de circuits en électronique de puissance. Dans un circuit de convertisseur statique, on retrouve les éléments suivants.

- Pistes de circuits imprimés (CI)
- Câbles de connexion
- Plans de masse
- Composants discrets : passifs (résistances, condensateurs, inductances...) ou actifs (transistors, diodes ...).
- Diélectriques et châssis La configuration du circuit de convertisseur statique et la disposition de ses différents éléments définissent les différents couplages qui existent. Ces couplages créent et amplifient les perturbations électromagnétiques.

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

### I.10.1. Causes des perturbations en électronique de puissance

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

### I.10.2. Classification des perturbations en électronique de puissance étendue spectrale du bruit

L'étude de la compatibilité électromagnétique peut se faire à plusieurs niveaux tels que les lignes d'alimentation, redresseur, convertisseur et sa commande, aussi filtrage, charge, etc (figure I.17) notre étude n'est pas basée sur les convertisseurs de puissance toutes les perturbations sont rassemblée dans un convertisseur

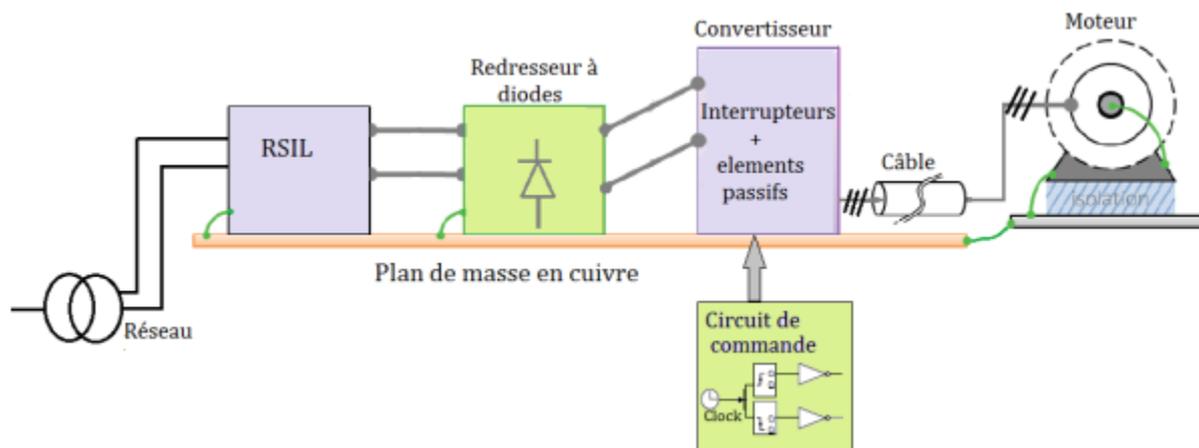


Figure I.17 : Exemple d'une chaîne de conversion d'électronique de puissance. [18]

L'ensemble des dispositifs de conversion émettent une pollution électromagnétique sur une plage très large de fréquences décrite dans la (Figure I.18). Les différents étages de puissance impactent sur des plages de fréquences qui couvrent 7 décades. Les étages de commande contribuent aussi à l'émission de perturbations conduites et rayonnées qui dépendent de la structure de conversion, de la nature de la technologie des interrupteurs utilisés et de son mode de commutation.

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

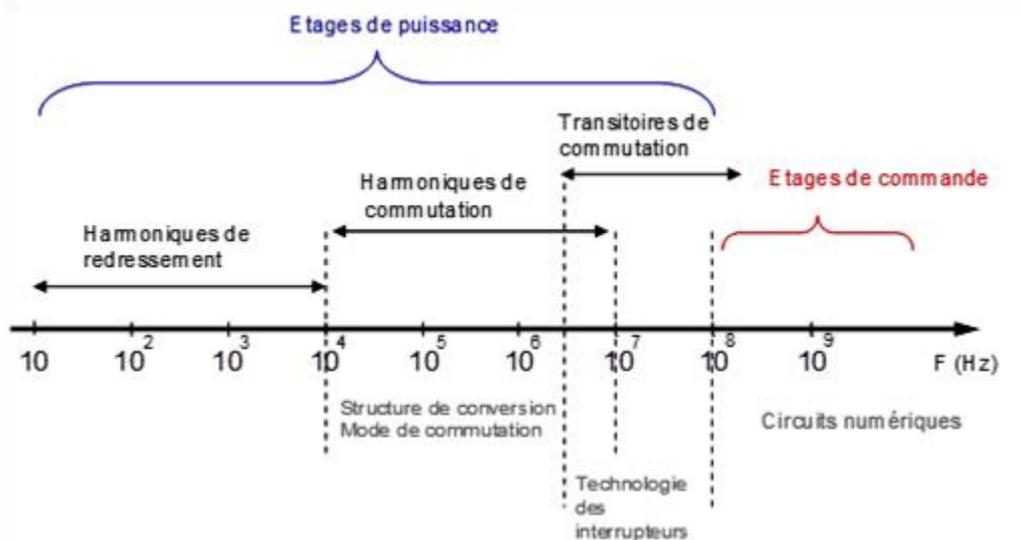


Figure I.18 : Etendue spectrale des phénomènes de perturbateurs. [18]

### I.10.3. Génération d'un signal parasite

Le signal alternatif peut correspondre au signal utile et peut avoir différentes formes (sinusoïdal, créneau...). Ce signal alternatif peut aussi être généré par des émissions parasites causées par des pics de courant ou de tension transitoires. Ces appels de courant sont semblables à des impulsions caractérisées par des temps de montées et de descentes rapides lui conférant de nombreuses composantes harmoniques à haute fréquence. La (Figure I.19) présente un exemple de bruit de commutation simultanée et son spectre

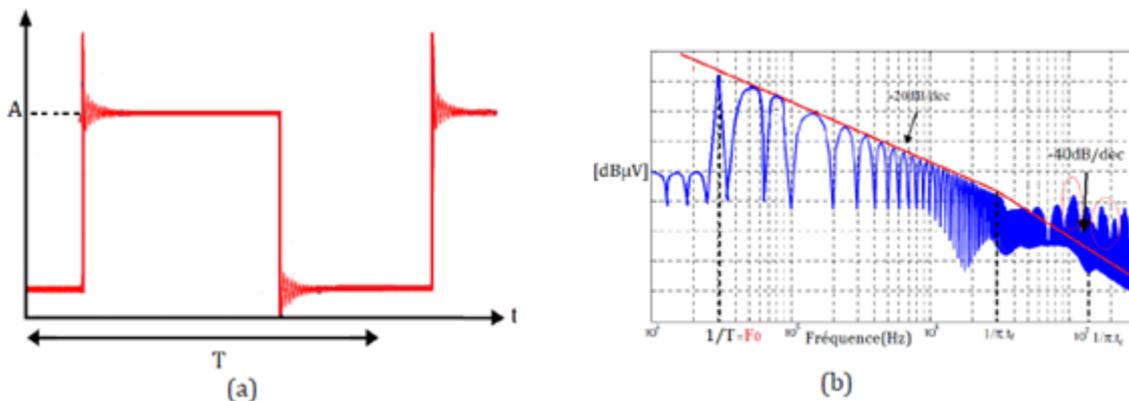


Figure I.19 : Forme d'une onde qui prend en compte les transitoires de commutation(a), spectre (b). [18]

### I.10.4. Origine et chemins des perturbations électromagnétiques

Pour comprendre l'origine des perturbations électromagnétiques, commençons par analyser le comportement spectral des formes d'ondes en électronique de puissance. La forme la plus élémentaire et la plus générique est l'onde trapézoïdale qui permet de définir des temps de montée et de descente plus facilement. Il est donc assez simple d'établir l'expression analytique de cette forme dans le domaine temporel et fréquentiel. Prenons l'exemple d'un signal trapézoïdal de période T et d'amplitude A comme l'indique la (figure. I.20) (a)

On appelle : tr: Temps de montée.

tf : Temps de descente du trapèze dissymétrique (avec tr ≠ tf).

$\tau$  : Durée d'impulsion.

L'expression du module de la transformée de Fourier du signal trapézoïdale est donnée par la relation (1.1) en posant  $t_r = r\tau$  et  $t_f = f\tau$ . Son évolution en fonction de la fréquence est donnée sur la figure I.19) (b) :

$$c_{n.rms} = A\sqrt{2}\left(\alpha + \frac{r+f}{2}\right) \frac{\sin(\pi nr)}{\pi nr} \cdot \frac{\sin[\pi n(\alpha+r)]}{\pi n(\alpha+r)} \cdot \frac{\sin[\pi n(\alpha-f)]}{\pi n(\alpha-f)} \quad (1.1)$$

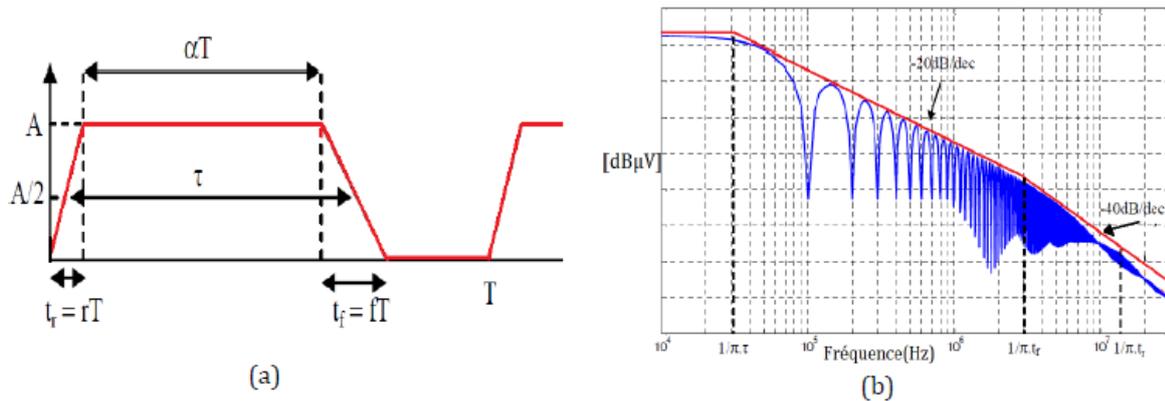


Figure I.20 : Forme d'une onde trapézoïdale dissymétrique (a), spectre (b). [18]

Quelques travaux précédemment réalisés modélisent les sources de perturbations et montrent une influence des facteurs suivants dans les cellules de commutation:

#### I.10.4.1. Le temps de commutation

Le temps de commutation est un facteur important dans le mécanisme de génération de perturbations car il contrôle les « dv/dt » et les « di/dt ». La diminution de la vitesse de commutation diminue les perturbations conduites mais crée des pertes de commutation supplémentaires.

#### I.10.4.2. La fréquence de commutation $f_0$

L'augmentation de la fréquence de commutation se traduit par une translation du spectre à hautes fréquences. Pour avoir une réduction des perturbations conduites il est préférable de choisir la valeur la plus faible pour cette fréquence.

#### I.10.4.3. Composants parasites de la cellule de commutation

Dans la cellule de commutation, il existe des éléments parasites comme les inductances de câblage, les capacités propres de semi-conducteurs et les capacités entre pistes et plan de référence, qui modifient le fonctionnement électrique du convertisseur créant des répercussions sur le spectre. [18]

### I.11. REGLEMENTATION EN CEM

#### I.11.1. Au niveau international

Le CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques) est chargé de définir les normes internationales liées à la CEM. Ces normes régissent entre autres les niveaux d'émission et de susceptibilité des équipements électriques ou électroniques, ainsi que les méthodes de mesure et d'essai. Ces normes servent de base aux autres pays pour rédiger leur propre législation.

Le CISPR fait partie de la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), qui s'occupe des normes liées à l'électricité et à l'électronique. La CEI est complémentaire à l'organisme international de normalisation ISO.

### I.11.2 Au niveau européen

Dans l'Union Européenne, c'est le CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique) qui définit les directives et normes. Une des principales directives est la directive 89/336/CEE qui spécifie que tout équipement électrique doit obligatoirement être conforme en matière de CEM pour être commercialisé dans les pays de la CEE. Les produits conformes portent le label CE. Cette directive a été appliquée obligatoirement par les états membres à partir de 1996, (Tableau I.1) [19]

Tableau I.1 : Principales normes d'émissions qui peuvent concerner les convertisseurs statiques. [13]

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

## I.12. SOLUTION

### I.12.1. La conception d'un circuit imprimé

La conception d'un circuit imprimé est généralement de mise lorsqu'on veut relier des composants électroniques entre eux. De cette façon, on est en mesure de réaliser un circuit électronique complexe. Le circuit imprimé est présent dans pratiquement tous les appareils électroniques. Et il est assez facile de le concevoir à condition d'avoir les connaissances requises (Figure I.17) [20]

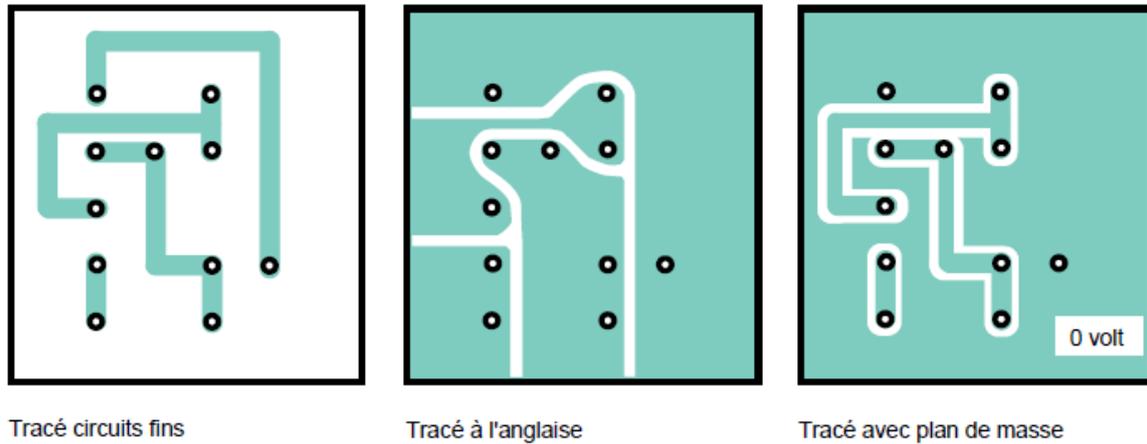


Figure.21 : le tracé des circuits imprimé. [21]

### I.12.2. Le blindage

- Un blindage est une enveloppe conductrice continue, entourant un circuit
- Empêche les émissions du circuit de rayonner à l'extérieur (émission rayonnée)
- Empêche les champs EM de parvenir dans le circuit et d'y créer des perturbations (immunité aux rayonnements).

C'est donc le moyen idéal pour éliminer les rayonnements, que ce soit pour respecter les normes d'émission, rendre le circuit insensible (immunité totale), ou encore pour éliminer les auto-perturbations entre les différentes parties d'un système (intégrité des signaux). Malheureusement, une enveloppe continue, entourant totalement un circuit est impossible à réaliser [22]

### I.13. CONCLUSION

Dans cette partie, nous présentons une introduction générale à la compatibilité électromagnétique. Le but de la CEM est d'assurer une compatibilité entre les équipements et composants d'un même environnement. Ainsi, dans un environnement donné, tous les éléments doivent respecter les marges définies. En effet, une perturbation électromagnétique peut avoir plusieurs origines. Lorsqu'elle est produite, une perturbation électromagnétique emprunte un chemin et se propage jusqu'à la victime. En fonction de son immunité, cette perturbation peut ne pas avoir d'effet sur la victime tout comme elle peut entraîner sa destruction. Plusieurs techniques permettent aujourd'hui de caractériser l'émission et l'immunité des équipements. [23]

Dans le prochain chapitre nous allons voir les différents types des hacheurs soit réversibles ou irréversibles, en plus on va étudier la modélisation du hacheur Buck dans les deux différents modes (continue et discontinue) et développer ces équations dans les circuits étudiées.

# CHAPITRE II

Généralités sur les  
convertisseurs DC/DC et la  
modélisation du hacheur Buck.

## II.1. INTRODUCTION

L'électronique de puissance a pour objet l'échange d'énergie entre au moins deux systèmes électriques. Pour cela, elle assure d'une part une fonction de modulation de l'énergie électrique en rendant compatibles les caractéristiques (fonction de la tension, du courant et de la fréquence) de ces deux systèmes et d'autre part (en général) une fonction de contrôle de cet échange d'énergie. C'est, par conséquent, une discipline qui correspond au traitement de l'énergie électrique (en combinant les aspects conversion et contrôle). Les dispositifs électriques permettant d'assurer ces fonctions portent le nom générique de convertisseurs statiques (on devrait d'ailleurs plutôt parler de modulateurs d'énergie).

Les fonctions de base de l'électronique de puissance trouvent leurs applications dans tous les domaines d'utilisation de l'électricité, c'est-à-dire dans toutes les industries et notamment dans la variation de vitesse des moteurs électriques. [24]

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. [25]

Le présent chapitre traite de la conversion DC/DC, qui a pour but d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu, en plus on va préciser la modélisation des hacheurs Buck dans le mode courant continu et courant discontinu.

## II.2. HACHEUR

### II.2.1. Définition

Un hacheur comme illustré dans la figure II.1 est un convertisseur continu/continu permettant de convertir une énergie continue fixe à un niveau donné de tension ou de courant en une énergie continue variable à un autre niveau de tension ou de courant.

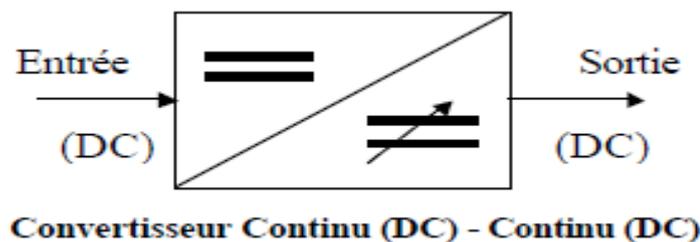


Figure II.1 : Convertisseur DC-DC [26]

On obtient une tension de valeur moyenne variable en établissant et interrompant périodiquement l'alimentation de la charge par la source grâce à des interrupteurs.

### II.2.2. Les différents types d'hacheurs

On distingue plusieurs types des hacheurs :

- ✓ Hacheur abaisseur « Buck Converter »
- ✓ Hacheur élévateur « Boost Converter »
- ✓ Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost Converter »

- ✓ Hacheur monophasé en pont « Full Bridge Converter » [27]

### II.3.REPRESENTATION DES SOURSES

Dans l'étude des convertisseurs DC/DC, nous distinguerons l'alimentation (source génératrice d'énergie) de la charge du convertisseur (source réceptrice) comme illustré dans figure II.2(a) et figure II.2(b).

#### II.3.1L'alimentation

L'alimentation peut être une source de tension, ou bien une source de courant. Par convention, les représentations adoptées pour de telles sources sont telles que celles définies dans la figure II.2.



Figure II.2 : Conventions adoptées pour les générateurs [28]

- ✓ source de tension (Figure II.2(a)): nous considérerons une source de tension parfaite.
- ✓ source de courant (Figure II.2(b)): nous considérerons une source de tension parfaite, en série de laquelle on place une inductance, qui confère à l'ensemble le caractère source de courant recherché.

#### II.3.2.Charge

Dans la conversion DC/DC, la charge ((type)) est la résistance, seul dipôle susceptible d'absorber de la puissance. On ne peut légitimement considérer un tel dipôle comme une source de tension ou de courant digne de ce nom. Pour cette raison, toute charge résistive est associée à un condensateur, ou `a un ensemble constitué d'un condensateur et d'une inductance de façon à pouvoir considérer le dipôle équivalent qui résulte de cette association comme une source de tension ou de courant, suivant les besoins. Ceci est illustré dans la figure. II.3.



Figure II.3 : Conventions adoptées pour les récepteurs [28]

- ✓ source de tension (Figure II.3(a)) : l'association d'une résistance et d'un condensateur en parallèle confère à ce dipôle le caractère d'une source de tension,
- ✓ source de courant (Figure II.3(b)) : l'ajout d'une inductance en série avec la source de tension permet de conférer à l'ensemble le caractère d'une source de courant.

### II.3.3. Association des sources

L'influence d'énergie entre l'alimentation et la source est réalisée par le convertisseur statique. Nous rappelons que nous ne nous intéressons dans cette étude qu'aux convertisseurs dits « directs ».

Ainsi, lors des commutations au sein de ce convertisseur, il existe forcément une séquence de fonctionnement pendant laquelle l'alimentation et la charge sont reliées directement. Ceci exclu totalement certaines possibilités d'association des alimentations et des charges définies ci-dessus, puisqu'on ne peut connecter entre elles que des sources de natures différentes.

Les possibilités d'association de ces sources se résument ainsi au nombre de deux, ainsi qu'illustré dans la figure II.4.

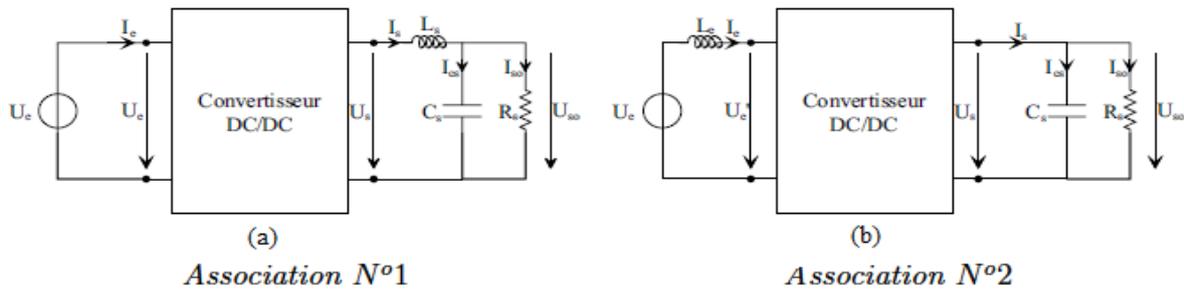


Figure II.4 : l'association des alimentations et des charges [28]

## II.4. PRESENTATION DES CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU (DC/DC)

Un convertisseur DC/DC a pour vocation d'assurer la fluence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu. La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée dans la figure II.5(a).

Une telle représentation peut laisser penser que dans tous les cas de figure, la source de courant  $I_s$  sera la charge qui, suivant les modes de fonctionnement, absorbera ou restituera de la puissance, alors que la source de tension  $U_e$  est l'alimentation, susceptible de fournir ou de stocker de la puissance.

Pour certains convertisseurs, on est amené à changer une telle représentation, surtout si la fluence d'énergie ne peut se faire que de la source de courant vers la source de tension (suivant la structure du convertisseur). On se réfère alors à la représentation symbolique donnée dans la figure II.5(b). Suivant le convertisseur DC/DC considéré, nous nous référerons soit à l'une, soit à l'autre de ces représentations [28]

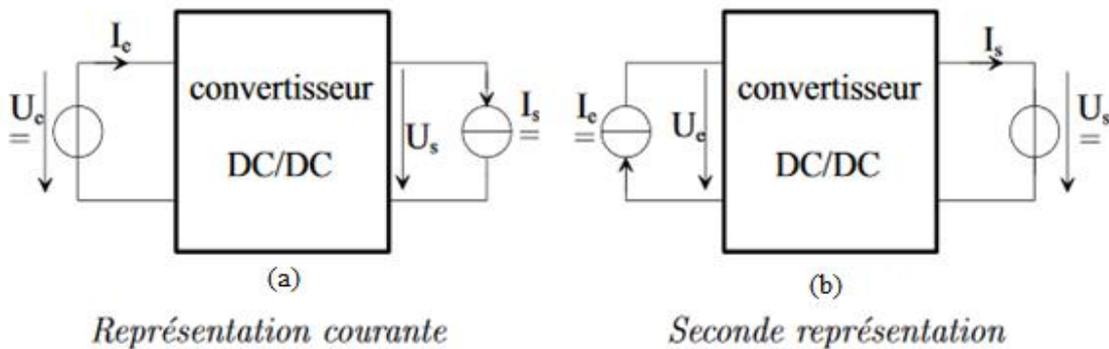


Figure II.5: Schéma Principe d'un hacheur [28]

## II.5. NOTION DE RAPPORT CYCLIQUE

Le rapport cyclique  $\alpha$  est défini comme le temps  $t_{on}$  pendant lequel l'interrupteur K est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage T, soit :

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T} \quad (II.1)$$

Défini également le temps pendant lequel l'interrupteur K est ouvert (bloqué) par : [26]

$$t_{off} = T - t_{on} \quad (II.2)$$

## II.6. HACHEUR BUCK (SERIE)

### II.6.1. Définition

C'est le montage le plus simple et le plus ancien. On dit qu'il s'agit d'un hacheur à un bras. Il permet de relier une entrée de type « v » (qui n'a pas de discontinuité de tension) à une sortie de type « i » (qui n'a pas de discontinuité de courant). C'est un hacheur « Un quadrant » qui n'a aucune réversibilité. L'énergie ne peut circuler que de l'entrée vers la sortie. Il ne comprend qu'un seul interrupteur commandé et une diode de roue libre. Cependant ce transfert est réglable. Le paramètre de réglage est le rapport cyclique de la commande de l'interrupteur.

Nous allons voir que ce hacheur (présenté dans la figure II.6) est de type abaisseur, la tension de sortie étant toujours inférieure à la tension d'entrée [29]

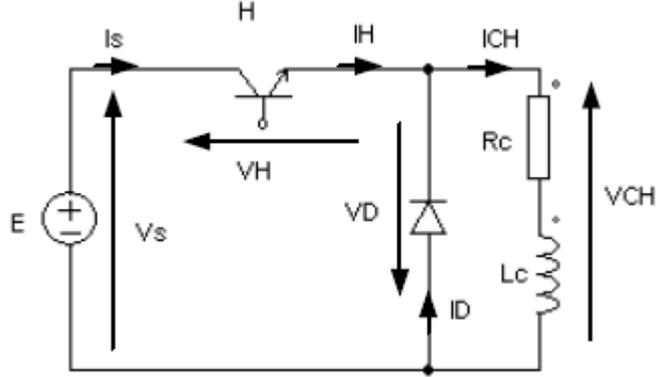


Figure II.6 : Schéma de principe d'un hacheur série [38]

### II.6.2.Principe de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage  $T$  ( $T=1/f$ ), comporte deux étapes.

1)-Lors de la première, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha.T$ , avec  $0 < \alpha < 1$ ,  $\alpha$  est appelé rapport cyclique. La diode se comporte comme un interrupteur ouvert L'équation qui régit le circuit est :

$$E = R_c I_c + L_c \frac{dI_c}{dt}$$

L'intégration de cette équation conduit à :

$$I_c = I_h = \frac{E}{R_c} + \left( I_m - \frac{E}{R_c} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{Avec } \tau = \frac{L_c}{R_c}$$

$$\text{D'où à } t = \alpha.T \quad I_M = \frac{E}{R_c} + \left( I_m - \frac{E}{R_c} \right) e^{-\frac{\alpha.T}{\tau}} \quad (1)$$

2)-Lors de la seconde, on bloque le transistor. La diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha.T$  à  $T$ , l'équation différentielle est alors :

$$R_c I_c + L_c \frac{dI_c}{dt} = 0$$

$$\text{L'intégration de cette équation conduit à : } I_c = I_D = I_M \cdot e^{-\left(\frac{t-\alpha.T}{\tau}\right)}$$

$$\text{D'où à } t = T \quad I_m = I_M \cdot e^{-\left(\frac{T-\alpha.T}{\tau}\right)} \quad (2)$$

Des relations (1) et (2) on tire :

$$I_m = \frac{E}{R} \cdot \frac{e^{-\left(\frac{T-\alpha.T}{\tau}\right)} - e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)}} = -\frac{E}{R} \cdot \frac{1 - e^{-\left(\frac{\alpha.T}{\tau}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)}} \cdot e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)} \quad \text{D'où} \quad I_M = I_m \cdot e^{\left(\frac{t-\alpha.T}{\tau}\right)}$$

La tension aux bornes de la charge est :

$$V_c = R_c \cdot I_c + L_c \cdot \frac{dI_c}{dt} \quad \text{D'où} \quad V_c \cdot dt = R_c \cdot I_c \cdot dt + L_c \cdot dI_c$$

L'intégration des deux membres pendant la durée d'une période, conduit à :

$$\int_0^T V_c \cdot dt = R_c \int_0^T I_c \cdot dt + L_c \int_{I_m}^{I_M} dI_c$$

On déduit la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :  $V_{cmoy} = \alpha \cdot E$  [38]

## II.7.HACHEUR BOOST (PARALLELE)

### II.7.1.Définition

Hacheur parallèle, hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur de type Boost. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage), il est illustré dans la figure II.7 [27]

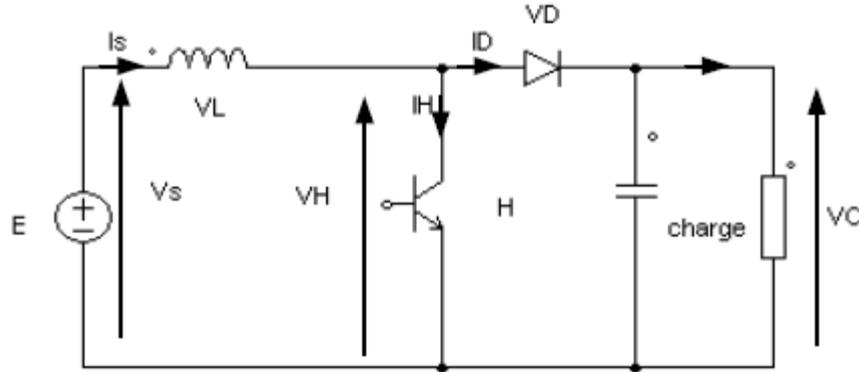


Figure II.7 : Schéma de principe d'un hacheur parallèle [38]

### II.7.2.Principe de fonctionnement

1)-Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à  $\alpha \cdot T$ , l'interrupteur commandé est fermé (passant). Cette fois, la source et la charge ne sont pas en contact durant cette phase. La diode est alors bloquée :

$$E = L \cdot \frac{dI_s}{dt}; \quad V_H = 0; \quad I_s = I_H; \quad I_D = 0$$

Le courant varie linéairement d'une valeur minimale  $I_m$  pour  $t=0$  à la valeur maximale  $I_M$  pour

$$t = \theta, \text{ soit : } I_s = \frac{E \cdot t}{L} + I_M$$

$$\text{D'où à } t = \alpha \cdot T \quad I_M = \frac{E \cdot \alpha \cdot T}{L} + I_M \quad (1)$$

2)-Lors de la seconde partie du cycle, de  $\alpha \cdot T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. C'est alors que la source et la charge sont reliées.

$$\text{On a : } V_H = E_c; \quad V_D = 0; \quad I_s = 0; \quad I_s = I_D;$$

L'équation de fonctionnement est :

$$V_{cmoy} = E - L \cdot \frac{dI_s}{dt}$$

$$\text{Soit : } (V_{cmoy} - E)dt = -L \cdot dI_s \quad \text{d'où } (V_{cmoy} - E)(T - \alpha \cdot T) = -L(I_m - I_M) \quad (2)$$

D'après les relations (1) et (2), il vient :

$$(V_{cmoy} - E)(T - \alpha.T) = E.\alpha.T \quad \text{D'où} \quad V_{cmoy} = \frac{E}{(1-\alpha)} \quad [38]$$

## II.8.CONVERTISSEUR BUCK-BOOST

### II.8.1.Définition

Dernier convertisseur de la famille des hacheurs non isolés, le convertisseur parallèle série (Figure II.8), également appelé élévateur-abaisseur pour son aptitude à fournir une tension plus faible ou plus élevée que celle appliquée à son entrée, ceci dépend de la valeur du rapport cyclique. De plus c'est un montage inverseur de tension et qui peut être considéré comme une liaison indirecte entre deux sources de tension continue par l'intermédiaire d'une source de courant continu (bobine) [27]

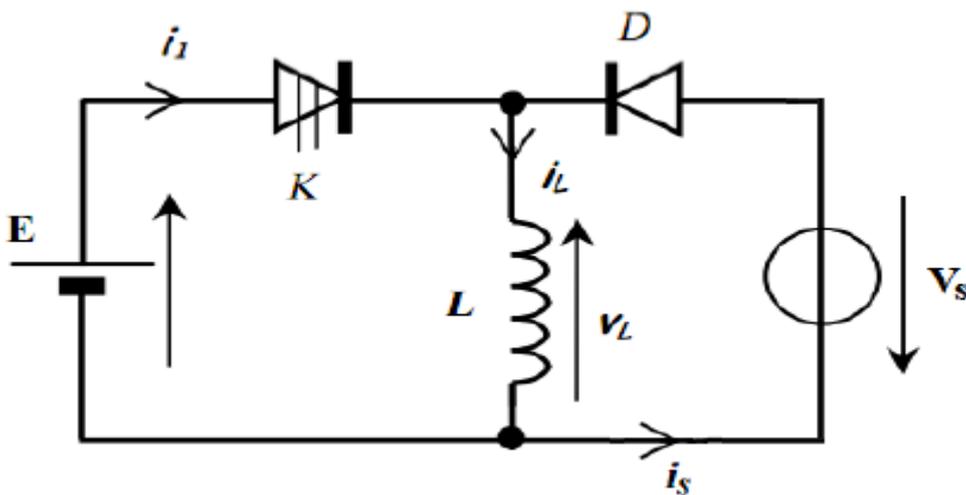


Figure II.8 : Schéma de principe d'un hacheur parallèle-série [23]

### II.8.2. Principe de fonctionnement

Lors de la première partie du cycle de fonctionnement, de 0 à  $\alpha.T$ , l'interrupteur commandé est fermé (passant). La diode est ouverte et l'inductance stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée.

Lors de la seconde partie du cycle, de  $\alpha.T$  à  $T$ , on ouvre l'interrupteur commandé et la diode devient passante. L'inductance restitue son énergie à la charge.

Remarque: On note que le sens de la tension de sortie est inversé par rapport aux deux cas précédents [31]

## II.9. HACHEUR REVERSIBLES

Certains convertisseurs sont réversibles, c'est-à-dire qu'ils permettent de renvoyer l'énergie électrique de la charge vers la source en permutant les rôles de l'entrée et de la sortie.

Si la charge est réversible et qu'on souhaite récupérer cette énergie, la source d'entrée et le convertisseur devront l'être aussi [24]

Les structures que nous venons de voir ne sont réversibles, ni en tension, ni en courant. L'énergie va donc toujours de la source vers la charge. Il est possible de modifier ces dispositifs pour inverser le sens de parcours de l'énergie.

Ainsi, une source peut devenir une charge et inversement. Ce type de comportement se rencontre usuellement dans les systèmes d'entraînement électriques. Ainsi, un moteur en sortie d'un hacheur représente une charge.

Cependant, si on veut réaliser un freinage, le moteur va devenir générateur, ce qui va entraîner un renvoi d'énergie à la source [30]

Il existe deux catégories de hacheurs réversibles :

### II.9.1. Hacheur deux quadrants

#### II.9.1.1. Hacheur réversible en courant

Dans ce système, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que la tension reste de signe constant. Cette fois, la cellule est formée de deux composants. Le premier est un composant commandé à l'amorçage et au blocage (transistor, IGBT, GTO, ...) alors que le second est une diode.

Ils sont montés en antiparallèle (Figure II.9). Le courant dans l'interrupteur peut être positif ou négatif. Il n'y aura plus de phénomène de conduction discontinue, dû à l'impossibilité, pour le courant, de changer de signe. Simplement, suivant le sens du courant, l'un ou l'autre des composants assurera la conduction.

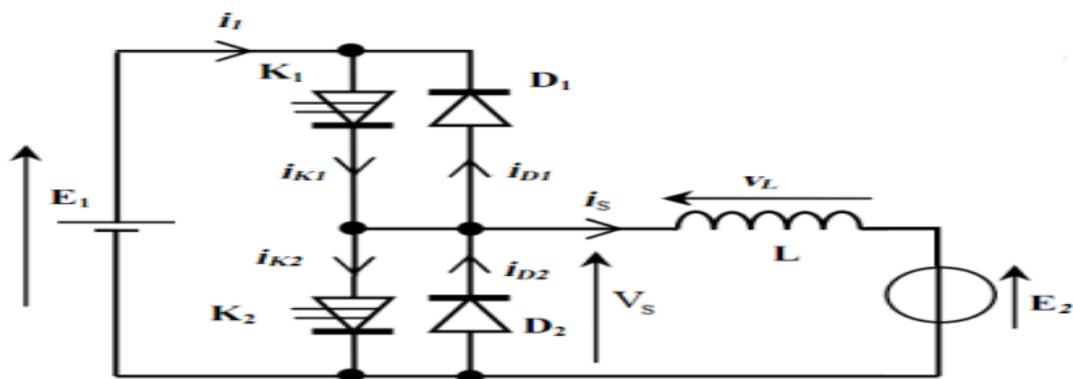


Figure II.9: Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant [31]

Tant que le courant  $i_L$  est positif, T1 et D2 assurent le fonctionnement du hacheur en Conduisant à tour de rôle comme nous l'avons expliqué précédemment.

Si  $i_L$  vient à s'annuler puis changer de signe, alors, dès que l'on détecte le passage par 0, on lance la commande de T2. C'est alors T2 et D1 qui assurent à tour de rôle la conduction.

#### II.9.1.2. Hacheur réversible en tension

La tension appliquée à la charge peut prendre les valeurs positives (+E1) ou négatives (-E1), ce qui permet (suivant la valeur du rapport cyclique) de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative. En revanche, le courant doit rester de signe constant dans la charge, car les interrupteurs ne sont pas réversibles.

Ce type de hacheur(Figure II.10) est utilisé pour l'entraînement d'une machine à courant continu dans un sens de rotation pour le fonctionnement en moteur avec freinage par récupération dans l'autre sens de rotation, pour le fonctionnement en génératrice, c'est le cas des ascenseurs.

Lors de la première phase de fonctionnement, dans l'intervalle de temps  $[0, \alpha.T]$  les deux Interrupteurs commandés T1 et T2 sont fermés et les diodes D1 et D2 ouvertes. La charge est sous tension  $+E$ .

Lors de la seconde phase de fonctionnement, sur l'intervalle de temps  $[\alpha.T, T]$ , les interrupteurs commandés sont ouverts et les diodes passantes. La charge est sous tension  $-E$  [29].31

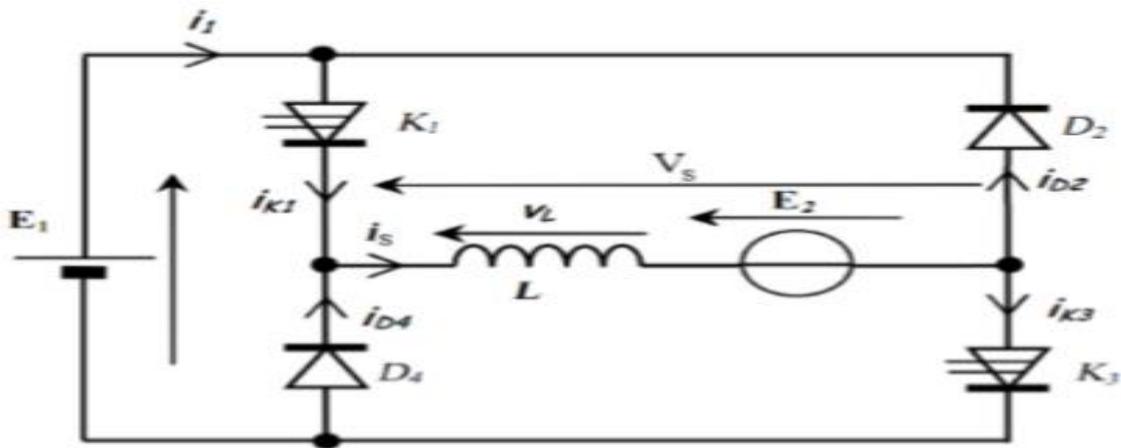


Figure II.10: Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension [31]

### II.9.2.Hacheurs quatre quadrants (réversible en tension et en courant)

On reprend la structure du hacheur réversible en tension que nous venons de donner en remplaçant les interrupteurs par des interrupteurs réversibles en courant. Dans ce cas, le courant dans la charge peut changer de signe. Comme pour le hacheur simplement réversible en courant, ce sera la diode ou le transistor qui sera passant, suivant le signe du courant dans l'interrupteur.

Cette fois, la tension moyenne et le courant moyen de sortie peuvent être positifs ou négatifs. Source et charge peuvent avoir leurs rôles inversés suivant le signe de ces grandeurs.

Ce type de hacheur (Figure II.11) est souvent employé pour l'entraînement d'une machine à courant continu dans les deux sens de rotation avec freinage par récupération (domaine de la traction électrique à courant continu).

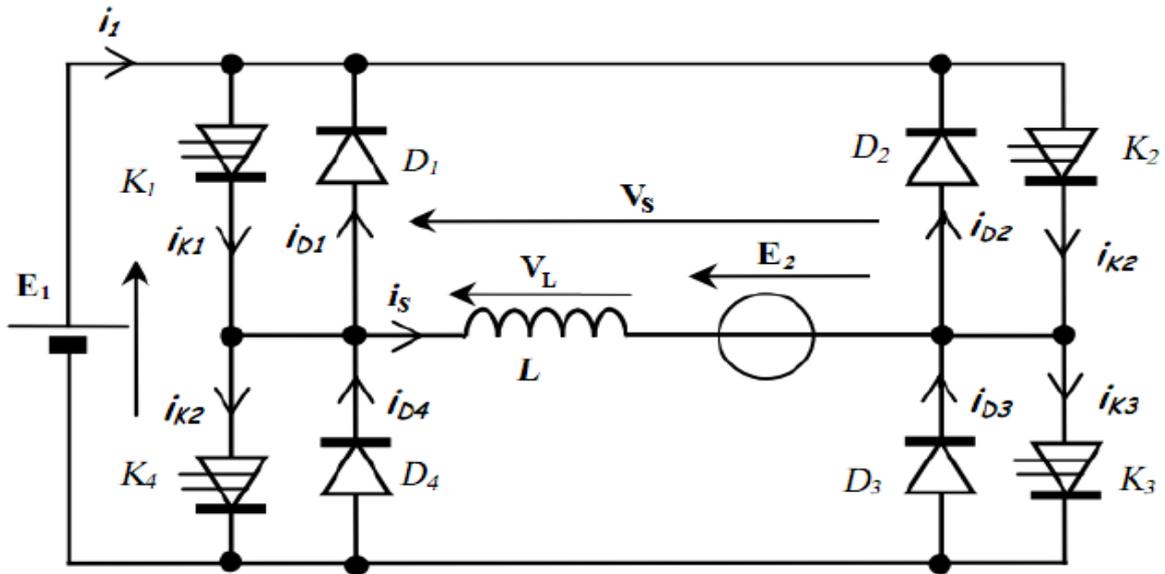


Figure II.11: Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension [31]

On parle d'un convertisseur qui assure non seulement la réversibilité en courant, mais également la réversibilité en tension, dans ce cas on trouve deux configurations possibles :

- $U_s$  et  $I_s$  sont de signes identiques, le convertisseur doit donc permettre le fonctionnement dans les quadrants 1 et 3 (figure II.12).
- $U_s$  et  $I_s$  sont de signes opposés, le convertisseur doit donc permettre le fonctionnement dans les quadrants 2 et 4 (figure II.12).

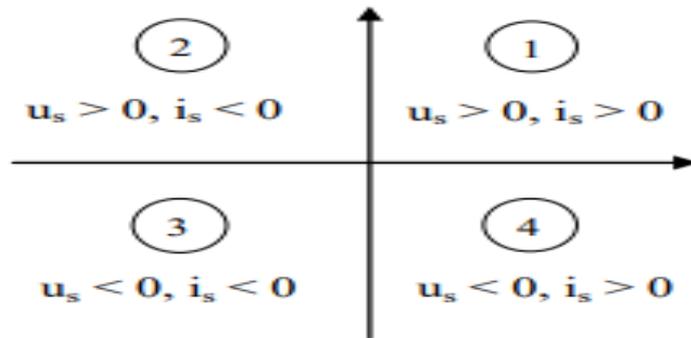


Figure II.12 : Quadrants de fonctionnement [31]

Par la suite nous traitons les quatre quadrants pour ce fonctionnement, en considérant que la charge est toujours une machine à courant continu à excitation indépendante, modélisée par la mise en série d'une force électromotrice  $E$  ainsi qu'une résistance d'induit  $R$  et une inductance  $l_a$ . L'inductance  $L$  est l'équivalent de l'inductance  $L_a$  et une autre inductance destinée à limiter l'ondulation de courant dans la machine, avec une conduction continue (courant ininterrompu), on suppose aussi que tous les interrupteurs sont parfaits [31].

## II.10. MODELISATION DES CONVERTISSEURS DC/DC

Il existe différentes méthodes d'analyse des convertisseurs DC/DC. Une analyse et une modélisation étendues pour les convertisseurs de puissance DC/DC sont proposées. Dans cette

approche, les équations différentielles qui décrivent le courant d'inductance et la tension du condensateur sont déterminées et résolus en fonction des conditions aux limites de la période de commutation.

Les valeurs des courants et des tensions à la fin d'une période deviennent des conditions initiales pour la prochaine période de commutation. Cette méthode est très précise et produit un ensemble d'équations qui nécessitent des calculs approfondis.

De plus, pour les valeurs spécifiées des paramètres du convertisseur (inductance et condensateur), nous pouvons calculer la valeur maximale du courant et de la tension inverse du transistor et de la diode, afin d'aider l'utilisateur à choisir le type de transistor et de diode approprié.

### II.10.1. Convertisseur Buck

Le hacheur Buck (ou abaisseur), montré sur la figure II.13, contient un condensateur et une Inductance avec un rôle de stockage d'énergie, et deux commutateurs complémentaires: lorsqu'un commutateur est Fermé, l'autre ouvert et vice-versa.

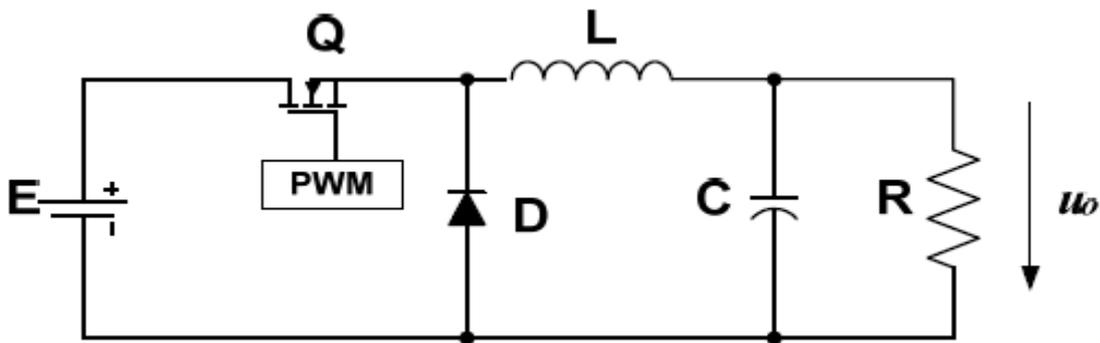


Figure II.13: Le schéma de convertisseur abaisseur [32]

Les commutateurs sont alternativement ouverts et fermés avec une fréquence de commutation PWM. La sortie qui en résulte est une tension régulée de plus petite amplitude que la tension d'entrée. Le fonctionnement du convertisseur sera analysé en fonction de l'état des commutateurs.

➤ **Le premier intervalle de temps: le transistor est en état ON et la diode est OFF.**

Pendant cette période, correspondant au rapport cyclique du signal d'attaque PWM, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous:

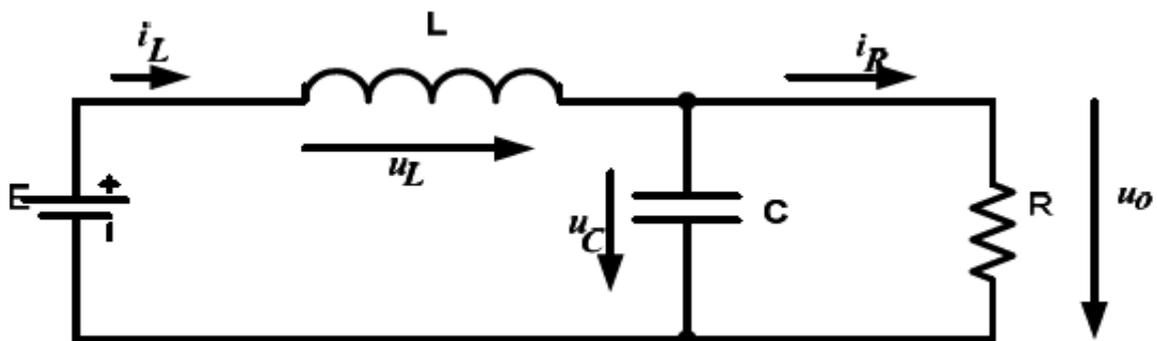


Figure II.14: Le circuit équivalent pendant l'état ON du transistor et l'état OFF de la diode [32]

Pour ce circuit équivalent, on écrira les équations qui décrivent le fonctionnement du convertisseur.

$$\frac{du_0}{dt} = \left(i_L - \frac{u_0}{R}\right) \cdot \frac{1}{C}; \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E - u_0}{L}; \quad (\text{II.4})$$

➤ **La deuxième période: le transistor est bloqué et la diode est allumée.**

Au moment où le transistor bascule en état OFF, la tension aux bornes de l'inductance change la polarité et la diode bascule en état ON. Le diagramme équivalent du convertisseur pendant cette période est illustrée dans la figure II.15 ci-dessous:

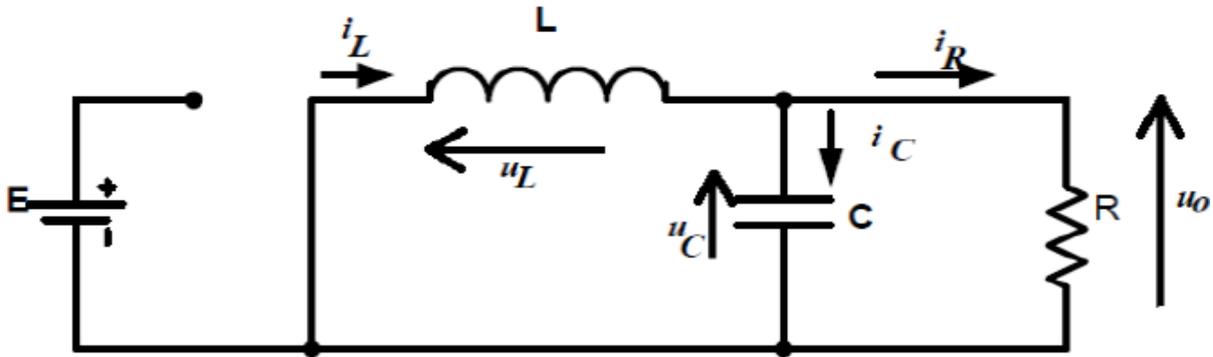


Figure II.15 : Le circuit équivalent pour l'état OFF du transistor et l'état ON de la diode. [32]

Pour cette période de fonctionnement, la tension de sortie  $u_0$  et le courant traversant l'inductance  $i_L$  satisfont aux équations suivantes:

$$\frac{du_0}{dt} = \left(i_L - \frac{u_0}{R}\right) \cdot \frac{1}{C}; \quad (\text{II.5})$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{u_0}{L}; \quad (\text{II.6})$$

➤ **Le troisième mode de fonctionnement: le transistor et la diode sont tous les deux fermés.**

Si le courant d'inductance devient nul avant la fin de la période d'activation de la diode, le transistor et la diode se fermeront naturellement. Ce régime de fonctionnement est appelé mode courant discontinu. Le schéma équivalent de ce régime de fonctionnement est présenté ci-dessous :

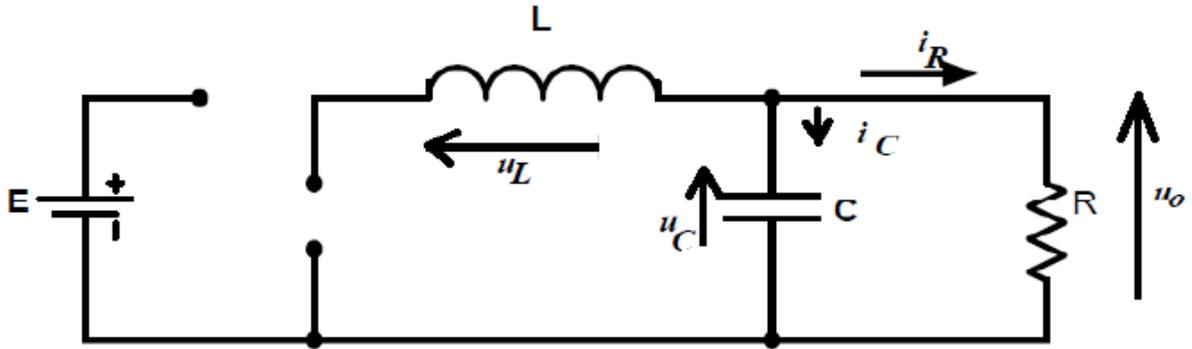


Figure II.16 : Le circuit équivalent avec transistor et diode à l'état bloqué [32]

Pour cette période de fonctionnement, la tension de sortie  $u_o$  et le courant traversant l'inductance  $i_L$  satisfont aux équations suivantes:

$$\frac{du_o}{dt} = -\frac{u_o}{R} \cdot \frac{1}{C}; \quad (\text{II. 7})$$

$$\frac{di_L}{dt} = 0; \quad (\text{II. 8})$$

### II.10.1.1. Le mode de courant continu

La valeur minimale d'inductance pour le fonctionnement en mode courant continu (CCM) est calculée à partir des équations de tension de sortie et de courant d'inductance.

Ainsi, la tension de sortie  $u_o$  et le courant traversant l'inductance  $i_L$  satisfont aux équations suivantes:

$$u_L = E - U_0 \dots \dots \dots t \in (0, \alpha \cdot T) \quad (\text{II. 9})$$

$$u_L = -U_0 \dots \dots \dots t \in (\alpha \cdot T, T) \quad (\text{II. 10})$$

$$i_L = \frac{E - U_0}{L} \cdot t \dots \dots \dots t \in (0, \alpha \cdot T) \quad (\text{II. 11})$$

$$i_L = -\frac{U_0}{L} \cdot t \dots \dots \dots t \in (\alpha \cdot T, T) \quad (\text{II. 12})$$

Les formes d'onde de tension et de courant d'inductance sur une période de commutation sont représentées sur la figure 5 :

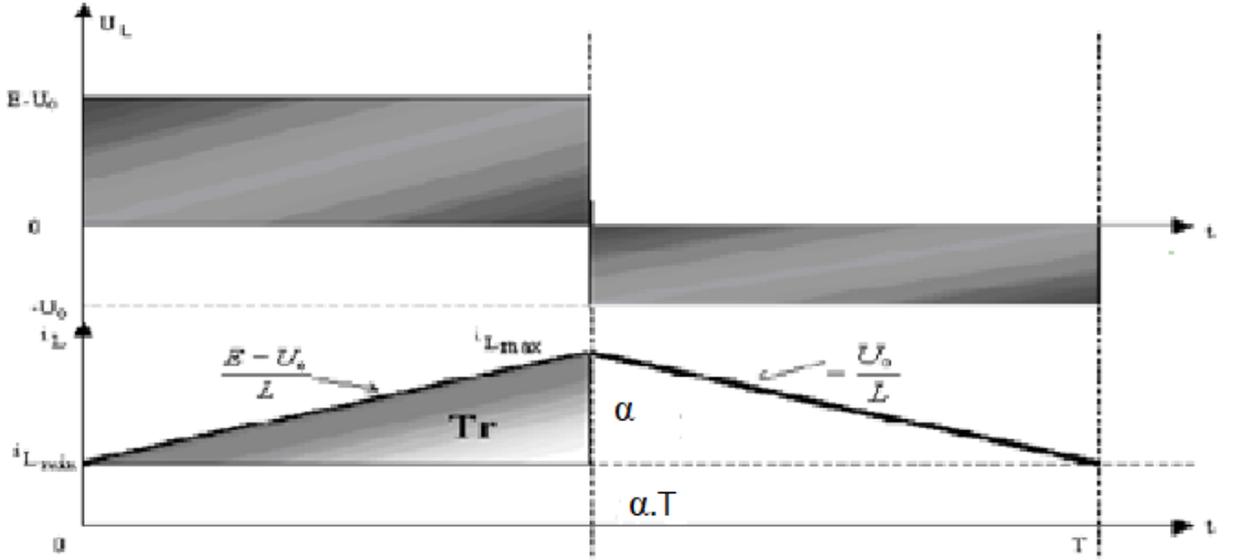


Figure II.17 : Les formes d'onde de la tension de sortie et du courant d'inductance [32]

En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. Donc :

$$(E - U_0) \cdot \alpha \cdot T = U_0 \cdot T(1 - \alpha) \Rightarrow U_0 = \alpha \cdot E \quad (\text{II.13})$$

Sur la base de la forme d'onde du courant d'inductance, l'équation suivante peut être écrite:

$$I_{Lmax} = I_{Lmin} + \frac{E - U_0}{L} \cdot \alpha \cdot T \quad (\text{II.14})$$

La valeur moyenne du courant d'inductance est égale au courant de sortie:

$$\frac{I_{Lmax} + I_{Lmin}}{2} = \frac{U_0}{R} = I_0 \cdot R \quad (\text{II.15})$$

A partir des équations (12) et (13) résulte le minimum et les valeurs maximales du courant d'inductance :

$$I_{Lmin} = \frac{U_0}{R} - \frac{E - U_0}{2L} \cdot \alpha \cdot T \quad (\text{II.16})$$

$$I_{Lmax} = \frac{U_0}{R} + \frac{E - U_0}{2L} \cdot \alpha \cdot T \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Donc: } \Delta i = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{E - U_0}{L} \cdot \alpha \cdot T \quad (\text{II.18})$$

A partir des équations (6) et (11), l'ondulation du courant d'inductance peut être calculée :

$$\Delta i = \frac{E \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)}{L} \cdot T \quad (\text{II.19})$$

De la condition  $I_{Lmin} \geq 0$ , il résulte :

$$\frac{2L}{RT} \geq 1 - \alpha. \quad (\text{II.20})$$

Cette relation peut être utilisée pour déterminer la valeur minimale d'inductance, lorsque la fréquence de commutation et la valeur de charge sont connues.

$$I_{Lmin} = \frac{RT}{2} \cdot (1 - \alpha) \quad (II.21)$$

### II.10.1.2. Le mode de courant discontinu

En régime de courant discontinu, les formes d'onde de tension et de courant d'inductance sont représentées sur la figure ci-dessous:

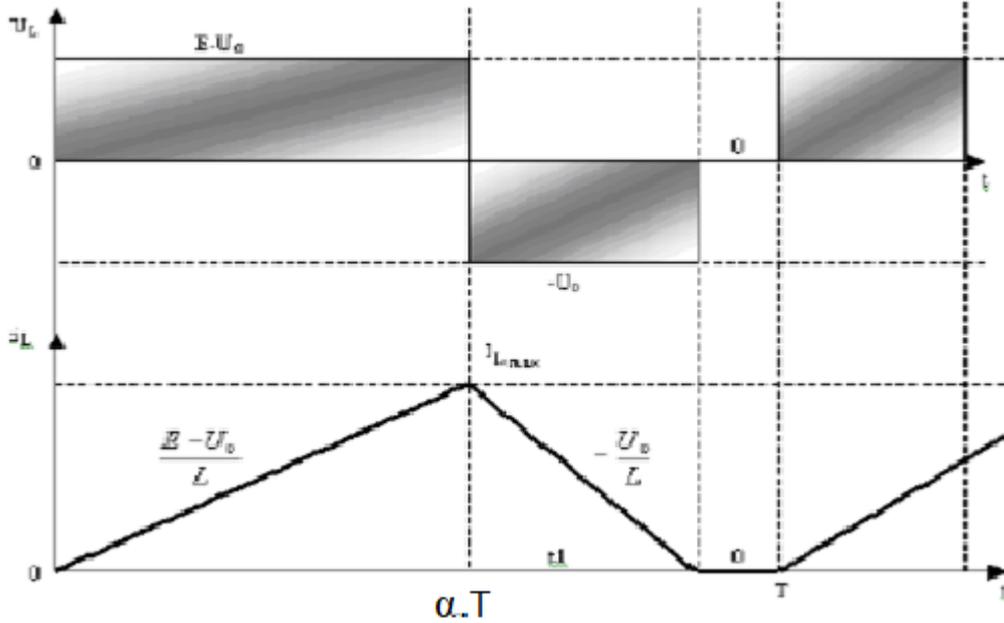


Figure II.18: Les formes d'onde de la tension et du courant d'inductance dans DCM [32]

La valeur moyenne du courant d'entrée est égale au courant traversant le transistor de commutation.

$$I_{iav} \cdot T = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot T \cdot I_{Lmax} \quad (II.22)$$

$$I_{Lmax} = \frac{E-U_0}{L} \cdot \alpha \cdot T \quad (II.23)$$

Des équations ci-dessus, il résulte:

$$I_{iav} = \frac{E-U_0}{2L} \alpha^2 \cdot T \quad (II.24)$$

En considérant qu'il n'y a pas de pertes dans le circuit, les puissances d'entrée et de sortie sont égales.

$$P_{in} = P_{out} \Leftrightarrow \frac{U_0^2}{R} = E \cdot I_{iav} \quad (II.25)$$

Donc :

$$\frac{U_0^2}{R} = \frac{E(E-U_0)}{2L} \cdot \alpha^2 \cdot T \quad (II.26)$$

$$\frac{U_0^2}{E^2} = \frac{RT}{2L} \left(1 - \frac{U_0}{E}\right) \cdot \alpha^2 \quad (II.27)$$

Indiquant le rapport de transfert de circuit :  $\frac{U_S}{E} = M$ :

$$M^2 + \frac{R.T.\alpha^2}{2.L}.M - \frac{R.T.\alpha^2}{2.L} = 0 \quad (\text{II.28})$$

$$a = \frac{R.\alpha^2.T}{2L} \quad (\text{II.29})$$

Les solutions de l'équation ci-dessus sont:

$$M = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 - 4a}}{2} \quad (\text{II.30})$$

En analysant ces solutions, on peut observer que la seule solution valide est : [32]

$$M = \frac{-a + \sqrt{a^2 - 4a}}{2}$$

## II.11. CONCLUSION

Les trois types de convertisseurs DC/DC que nous venons de présenter constitue une partie de la grande famille de convertisseurs DC/DC, dans le sens ou, selon la topologie mise en œuvre.

On est capable :

- D'abaisser des niveaux de tension ou de courant continu.
- D'élever des niveaux de tension ou de courant continu.
- D'élever ou d'abaisser à choix des niveaux de tension ou de courant continu.

Dans ce chapitre, nous avons étudiés aussi un exemple de modélisation de hacheur Buck, et le comportement du circuit dans les différents états et dans les deux modes continus et discontinus en donnant des formes d'onde de la tension et du courant avec un développement des équations qui sont reliés au circuit étudié. Les modèles utilisés peuvent être modélisé et simuler à l'aide d'un logiciel de type circuit (LTspice,PSpice,...) [33]

Dans le prochain chapitre, on va voir l'origine et les chemins de propagation des perturbations électromagnétiques dans un convertisseur statique Buck et dans un réseau DC/DC de deux Buck en parallèle, ensuite on va comparer entre la gravité de ces perturbations et en déduire lequel est plus polluant.

# CHAPITRE III

Etude sur Les Perturbations  
Electromagnétiques émises par  
un Hacheur Buck et un Réseau  
DC/DC.



### **III.1.INTRODUCTION**

Les préoccupations actuelles en matière de compatibilité électromagnétique (CEM) imposent une caractérisation de plus en plus poussée des sources de nuisance en termes de pollution électromagnétique conduite et/ou rayonnée. La CEM est une discipline scientifique et technique qui trouve aujourd'hui sa justification dans les problèmes de cohabitation entre les systèmes industriels et leur environnement. [34]

Par ailleurs, l'électronique de puissance est devenue incontournable lorsque l'on parle de conversion d'énergie électrique. En effet, à l'heure actuelle, les convertisseurs statiques sont présents dans la quasi-totalité des systèmes électriques, que ce soit dans le domaine de la production d'énergie, des systèmes embarqués, des transports ou encore dans la vie de tous les jours. [34]

Cette multiplication s'est accompagnée de problèmes de CEM. L'électronique de puissance utilise les semi-conducteurs de puissance en mode interrupteur. Ce fonctionnement confère aux convertisseurs un rendement très élevé. En revanche, il donne lieu à de nombreuses perturbations électromagnétiques (E.M) conduites et rayonnées. L'origine de ces dernières est liée aux variations des grandeurs électriques sur des courtes durées avec de fortes amplitudes et des fréquences élevées. [34]

L'origine des perturbations EM créées par un dispositif de conversion statique peut être appréhendée par une modélisation électrique de type 'circuit'. Celle-ci peut être utilisée pour simuler assez facilement le comportement CEM de la structure, en ce qui concerne les courants conduits grâce à des solveurs de type 'circuit' (MATLAB, PSpice, SABEUR, PSIM, PACTE ou autre) et, de façon plus approximative, lorsqu'il s'agit des champs rayonnés, ce qui nécessite d'intégrer les aspects géométriques du convertisseur et de l'environnement où l'on souhaite connaître l'intensité des champs rayonnés. Les objectifs de la modélisation CEM sont doubles à savoir : [34]

- La conception assistée par ordinateur (CAO) qui intègre les contraintes liées à la CEM, de façon à réduire les étapes de tests et de certification qui sont très coûteuses.
- L'analyse de phénomènes complexes dans les structures en vue d'améliorer leur fonctionnement

L'hacheur est un convertisseur statique d'énergie électrique qui réalise la conversion de cette énergie d'une source continue vers une autre source continue. Il permet ainsi d'obtenir une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. Ce convertisseur peut être réalisé à l'aide d'interrupteurs de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture tels que les MOSFETS. [34]

Le principe de ce convertisseur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur de puissance. Ce dernier doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. [34]

Ce chapitre est consacré à l'étude des perturbations E.M conduites basses et hautes fréquences engendrées par un hacheur abaisseur et par un réseau DC/DC de deux Bucks en parallèle respectivement dans des circuits électriques connectés d'une part à la source par un réseau

stabilisateur d'impédance de ligne (RSIL) afin de fixer l'environnement CEM et d'autre part à la charge via des connectiques. Ainsi pour mettre en évidence les perturbations engendrées par ce convertisseur, nous avons effectué des simulations dans le domaine temporel et fréquentielle.

### **III.2.DESCRPTION DU LOGICIEL LTSPICE**

LTspice est un logiciel de simulation électronique qui permet d'anticiper les caractéristiques et les performances d'un circuit électronique en assemblant à l'écran des composants virtuels comme illustré dans la figure III.1. A partir du noyau Spice développé à l'université Berkeley mais très peu convivial, la société LinaTechnology (LT) a développé une version plus visuelle, plus facile d'emploi, et gratuite. [35]

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

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

Les simulations permettent de faire au choix :

- L'Analyse du fonctionnement en continu du montage (point de repos)
- L'analyse temporelle (réponse temporelle à une excitation)
- L'analyse fréquentielle (réponse en fréquence du montage)
- L'analyse du bruit

LinearTechnology améliore de manière régulière le logiciel LTspice, ce qui en fait un outil fiable et à jour. Par ailleurs de nombreux fabricants concurrents comme Texas Instrument, proposent des modèles Spice de leurs composants (comme le TL081 par exemple). [35]

#### **III.2.1.Les différentes étapes d'utilisation du logiciel LTSpice**

L'utilisation du logiciel se fait en trois étapes :

1. Saisie du schéma
2. Simulation
  - (a) Choix et paramétrage de la simulation
  - (b) Exploitation des résultats

Après ces étapes, l'utilisateur rentre dans un mode itératif de modification du schéma ou du paramétrage de la simulation jusqu'à obtention d'un résultat satisfaisant

Exemple : réponse temporelle et fréquentielle d'un circuit RC

Pour illustre la démarche, nous allons simuler un circuit très simple : un réseau RC (résistance, capacité) et allons faire une analyse temporelle (réponse à un signal carré) et fréquentielle (mesure de la bande passante et de la phase).

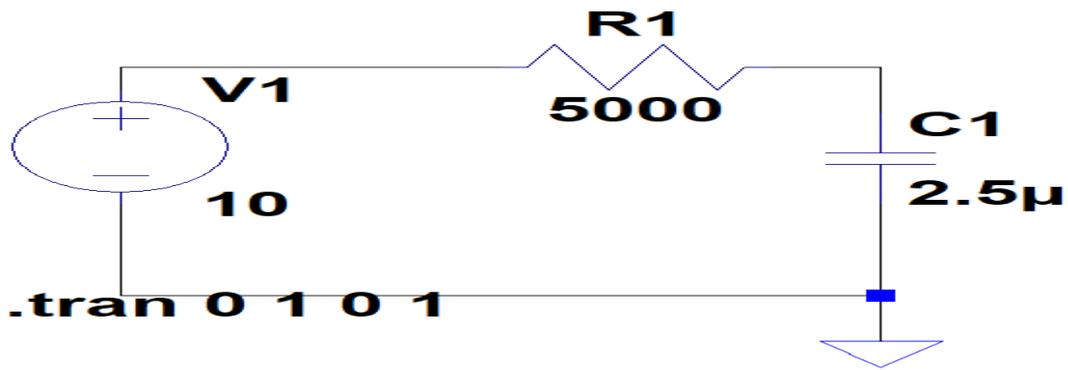


Figure III.1 : représentation d'un simple circuit RC sous LTspice [36].

### III.3.MODELE DU HACHEUR "BUCK" UTILISE SOUS LT SPICE

#### III.3.1.Modèle d'un seul Buck

##### III.3.1.1.Principe

Dans cette partie, on utilise le modèle approprié de la référence [37] seulement qu'on va substituer le transistor de puissance ou bien le MOSFET IRF150 par un IRF1310 ; c'est un modèle qu'il se compose principalement d'une source, un RSIL, une liaison, un Buck et une charge comme présenté ci-dessous dans la figure III.2.

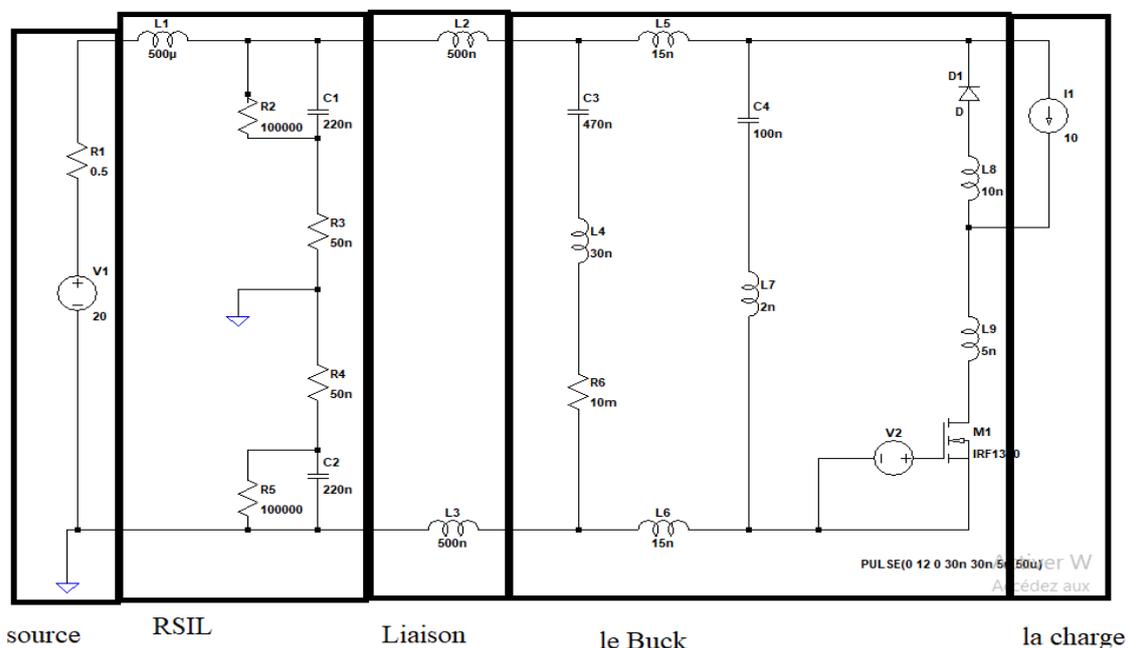


Figure III.2 : le modèle d'un seul Buck utilisé dans la simulation [37]

##### III.3.1.2.Résultats et interprétations

Nous allons mesurer le courant et la tension au niveau du RSIL, après cela on va relever celles du convertisseur.

### Chapitre III : Etude sur Les Perturbations Electromagnétiques émises par un Hacheur Buck et un Réseau DC/DC.

Le but est de calculer les perturbations électromagnétique émises par des convertisseurs DC/DC (hacheurs "Buck") lié au RSIL via une liaison dans un circuit électrique.

Les figures III.3 et III.4 présentent le domaine temporel et fréquentiel respectivement du courant RSIL en fonction du l'influence du hacheur Buck et la liaison entre les deux.

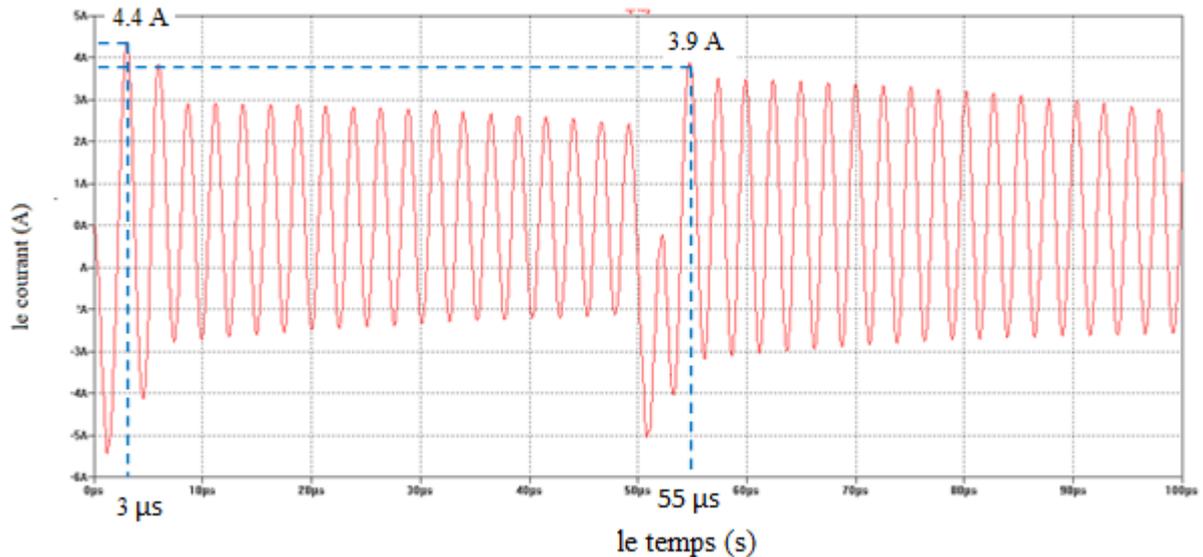


Figure III.3 : réponse temporelle du courant de RSIL.

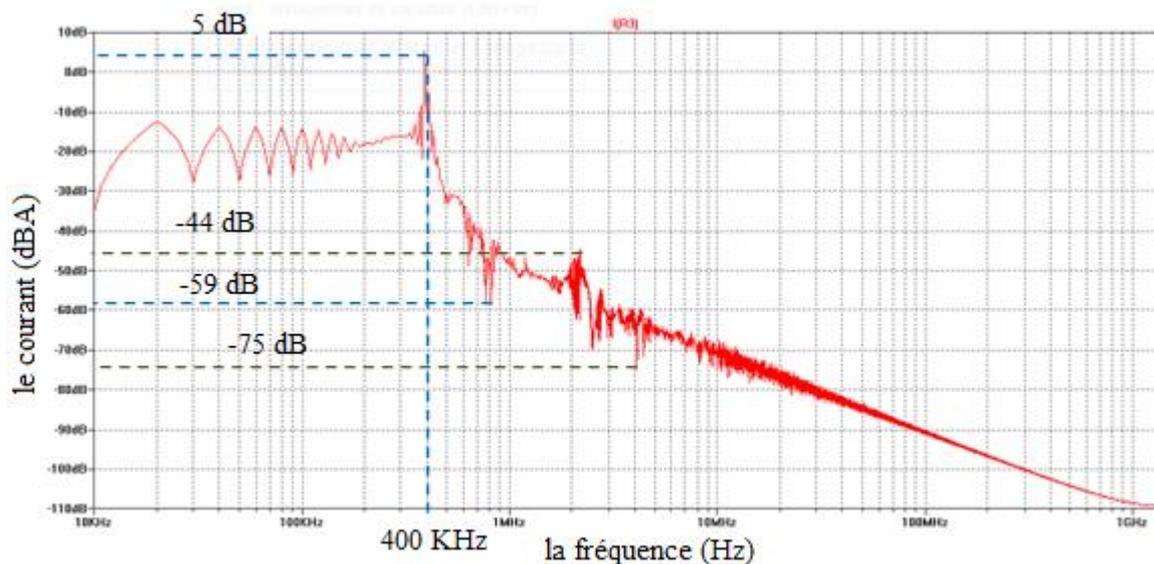


Figure III.4 : réponse fréquentielle du courant de RSIL.

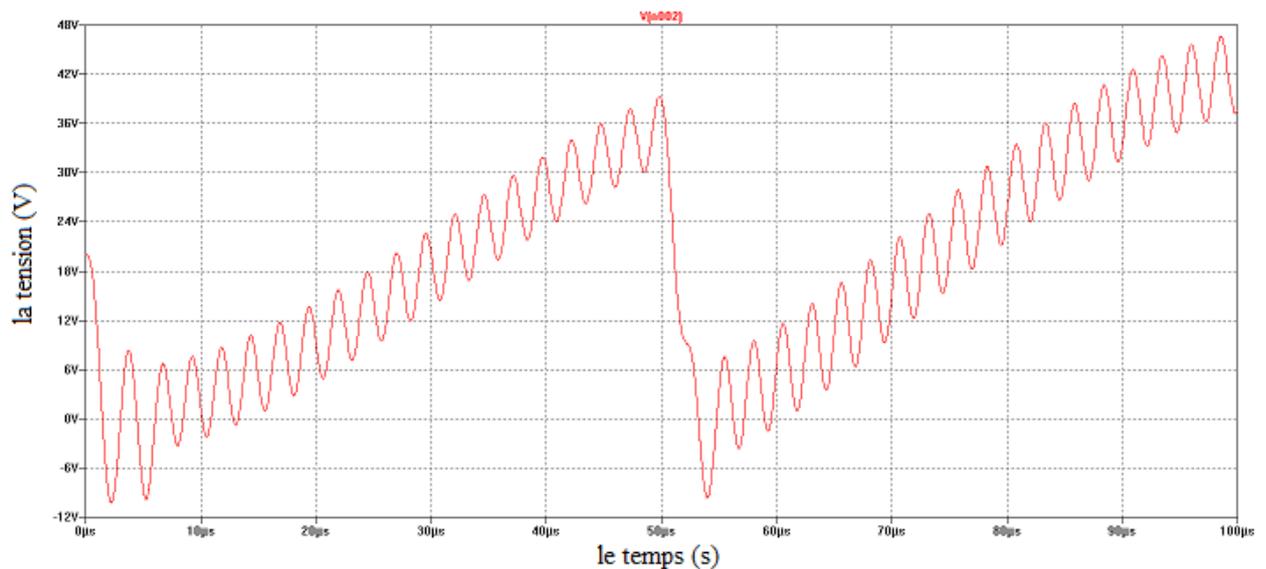
Le résultat des perturbations dans le domaine temporel (figure III.3) montre un courant perturbé varié d'une amplitude environ 4.4 A d'amplitude à 3 µs au moment de commutation et - 1 A d'amplitude à 50 µs.

La figure III.4 présente le spectre dans le domaine fréquentiel pour les niveaux des perturbations importants d'amplitude varie de 5 dBA au -59 dBA aux environs de 1 MHz. A partir de cette fréquence et jusqu'à 100 MHz, le spectre d'amplitude entre -44 dBA et -75 dBA

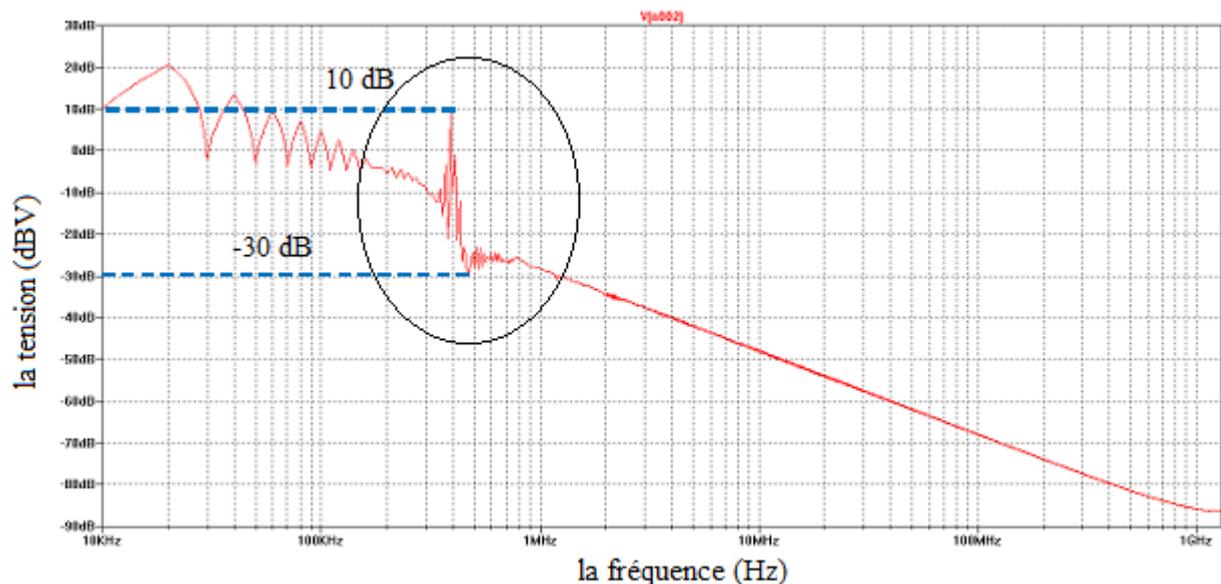
*Chapitre III : Etude sur Les Perturbations Electromagnétiques émises par un Hacheur Buck et un Réseau DC/DC.*

présente des perturbations plus élevée. Cette analyse montre toujours la présence des perturbations conduites dans les hautes fréquences où on remarque un pic de -44 dBA aux environs de 2 MHz, dus à la rapidité des commutations des composants semi conducteurs et les impédances parasites HF (résonances).

Les figures III.5 et III.6 représentent les réponses temporelles et fréquentielles respectivement de la tension du RSIL en fonction de l'influence du hacheur Buck et la liaison entre les deux.



*Figure III.5 : réponse temporelle de tension de RSIL.*



*Figure III.6 : réponse fréquentielle de tension de RSIL.*

Les résultats de perturbations dans le domaine temporel présenté dans la figure III.5 montrent une tension perturbée qui varie entre une amplitude -10 V au début de commutation et 39 V à la fin de cette commutation.

Chapitre III : Etude sur Les Perturbations Electromagnétiques émises par un Hacheur Buck et un Réseau DC/DC.

La figure III.6 présente le spectre dans le domaine fréquentiel pour des niveaux de perturbations importantes d'une amplitude de 20 dBV jusqu'au -30 dBV aux environs de 1 MHz. D'ici jusqu'au 100 MHz ; on a eu un spectre d'amplitude entre -30 dBV et -70 dBV qui présente à son tour des perturbations élevées dues à la rapidité des commutations des interrupteurs ainsi que les impédances parasites.

Les figures III.7 et III.8 représentent les réponses temporelles et fréquentielles respectivement du courant de sortie de Buck en fonction de l'influence de ce dernier et sa liaison avec le RSIL.

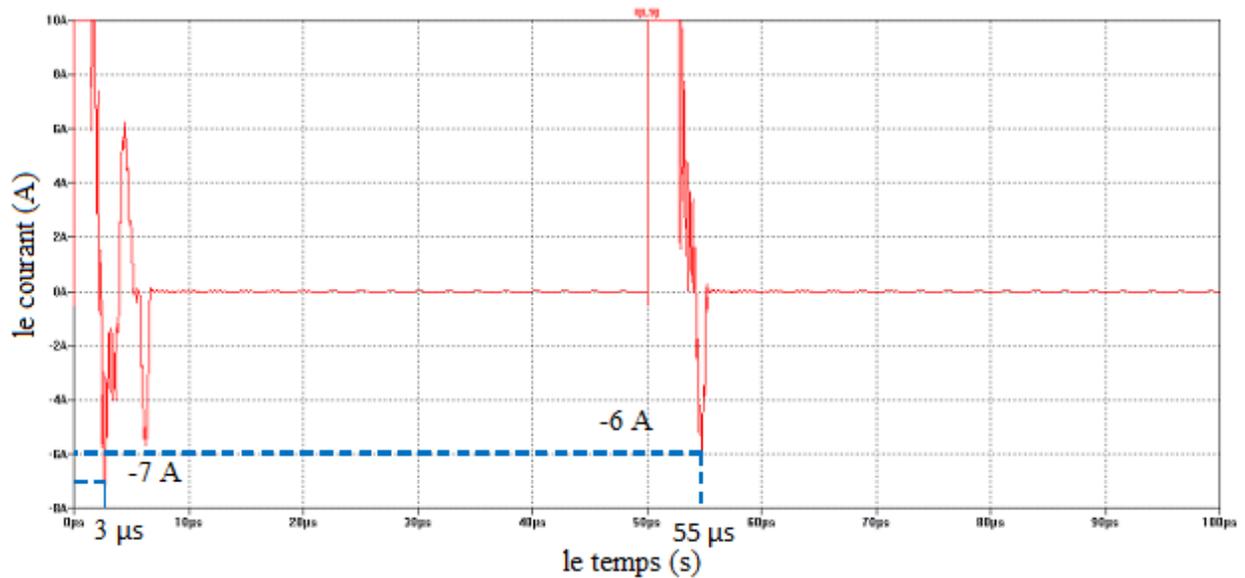


Figure III.7 : réponse temporelle du courant de sortie du Buck.

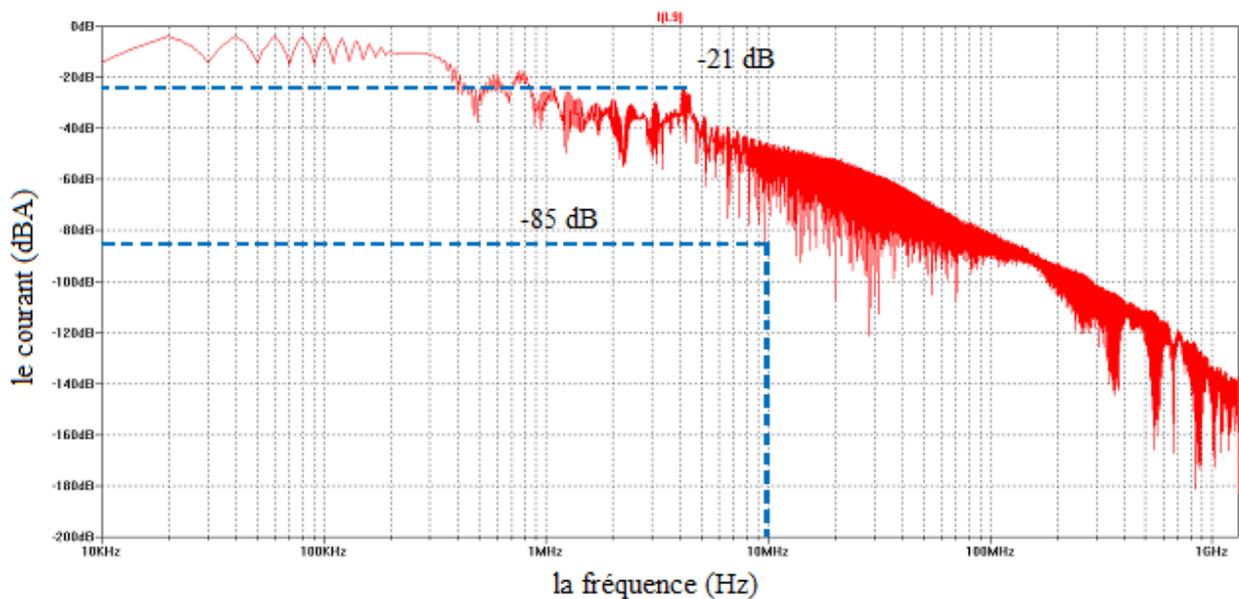


Figure III.8 : réponse fréquentielle du courant de sortie du Buck.

La figure III.7 présente le résultat des perturbations au domaine temporel, elle montre un courant de sortie perturbé variant entre 10 A et -7 A au début de commutation. Du 7 µs jusqu'à la fin de commutation, le courant perturbé est nul.

La figure III.8 présente le spectre au domaine fréquentiel pour des niveaux élevés de perturbations électromagnétiques d'une amplitude entre -4 dBA et -40 dBA aux environs de 1 MHz ; d'ici au 100 MHz, le spectre d'amplitude entre -21 dBA et -85 dBA présente des perturbations plus élevées, l'analyse des réponses fréquentielles montre la présence de ces perturbation dans les hautes fréquences puisqu'on a un pic d'amplitude de -21 dBA aux environs de 4 MHz à cause des effets émises par les impédances parasites et la commutations des interrupteurs y compris les effets de câble de liaison.

### III.3.2.Modèle du réseau DC/DC à base de deux Buck en parallèle

#### III.3.2.1.Principe

on a utilisé le model approprié de la référence [37], cette fois on y ajoute un autre Buck en parallèle ce qui nous donne un réseau de deux Buck avec un RSIL ; comme déjà fait, on substitue le transistor de puissance IRF150 par IRF1310, donc ce circuit est constitué d'une source, un RSIL, une liaison, deux Bucks et deux charges respectivement.

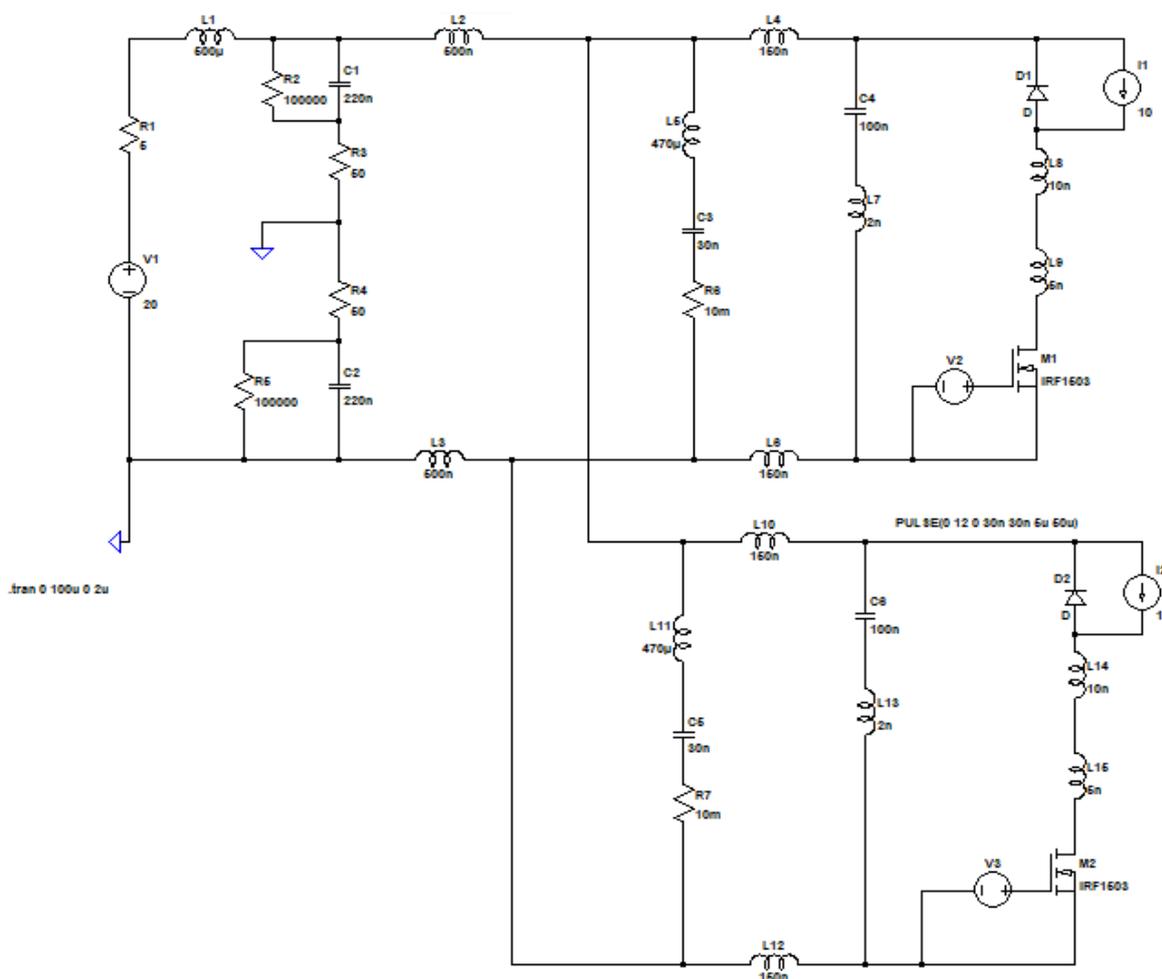


Figure III.9 : le model de deux Buck en parallèle utilisé dans la simulation [37].

#### III.3.2.2. Résultats et interprétations

### Chapitre III : Etude sur Les Perturbations Electromagnétiques émises par un Hacheur Buck et un Réseau DC/DC.

Les figures III.10 et III.11 montrent respectivement la réponse fréquentielle et temporelle du courant RSIL en fonction de l'influence du réseau DC/DC à base de deux hacheurs Buck et le câble de liaison coté source et coté charge.

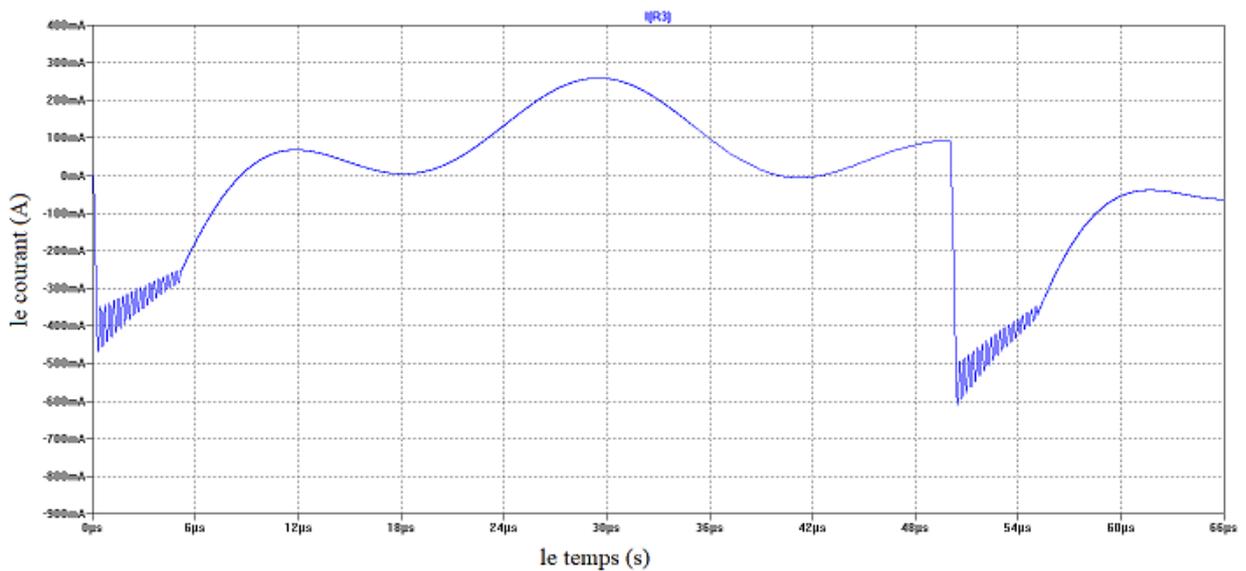


Figure III.10: réponse temporelle du courant de RSIL.

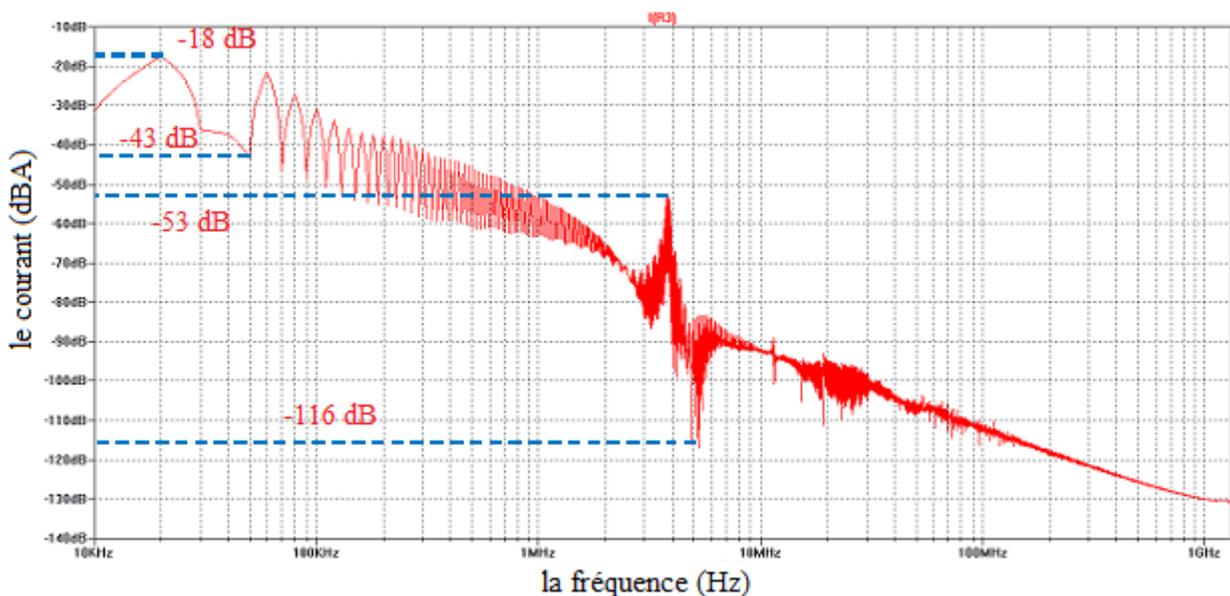


Figure III.11: réponse fréquentielle du courant de RSIL.

La figure III.10 illustre le résultat de perturbation au domaine temporel, cette figure nous montre un courant de RSIL moins perturbé d'amplitude entre 0 mA au début de commutation et 90 mA à sa fin, ces niveaux de perturbation nous ont donné un pic d'amplitude 270 mA aux environs de 30  $\mu$ s.

La figure III.11 présente le spectre au domaine fréquentiel des perturbations électromagnétiques, d'une amplitude entre -18 dBA et -63 dBA aux environs de 1 MHz. A partir de cette fréquence jusqu'à 100 MHz, un spectre d'amplitude entre -53 dBA et -116 dBA nous montre des niveaux importants des perturbations ; avoir analysé cette réponse marque la

présence de ces perturbation à les hautes fréquences (HF) où on observe un pic d'amplitude -53 dBV aux environs de 4 MHz du fait de la rapidité des commutateurs et les impédances parasites.

Les figures III.12 et III.13 représentent les réponses temporelles et fréquentielles respectivement du courant de RSIL en fonction de l'influence du réseau DC/DC à base de deux hacheurs Buck et le câble de liaison coté charge et coté source.

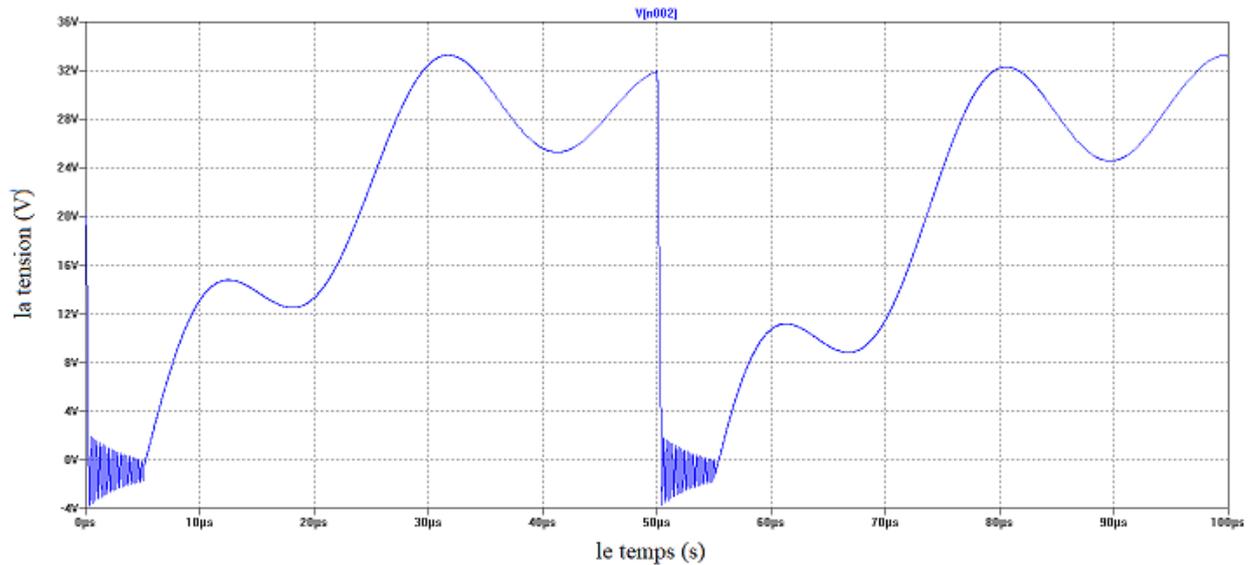


Figure III.12: réponse temporelle de tension de RSIL.

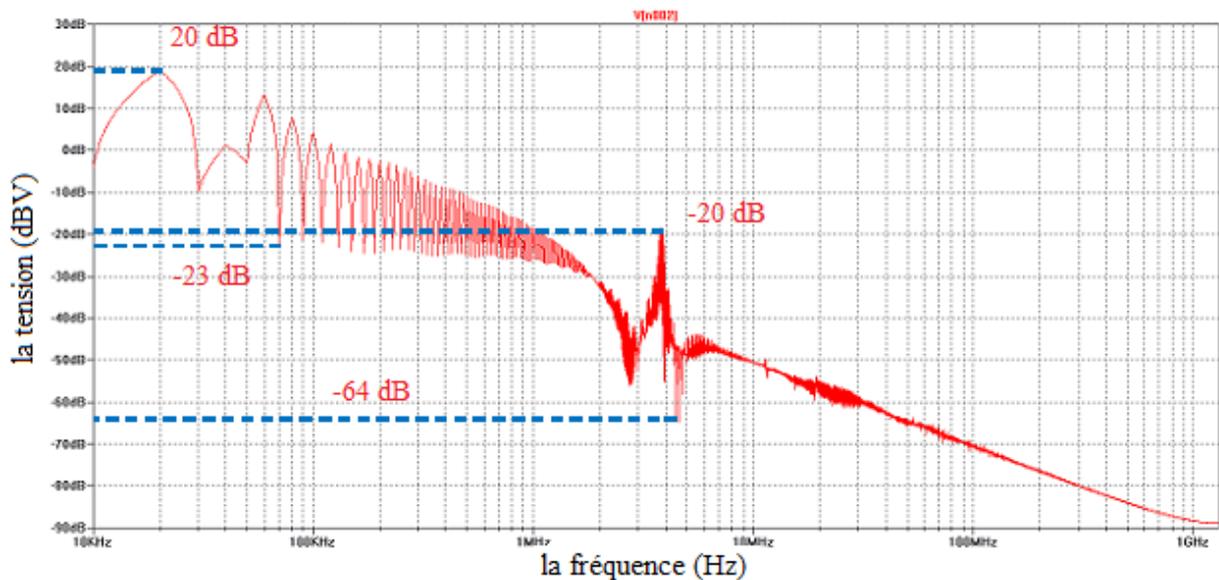


Figure III.13: réponse fréquentielle de tension de RSIL.

Le résultat des perturbations au domaine temporel comme le présente la figure III.12 montre une tension de RSIL moins perturbée variant entre -4 V et 33 V ; la courbe de tension est d'une amplitude de 20 V au début de commutation et 32 V à sa fin.

La figure III.13 illustre le spectre au domaine fréquentiel des perturbations électromagnétiques élevées d'une amplitude entre 20 dBV et -23 dBV aux environs de 1 MHz. De là jusqu'à 100 MHz, le spectre d'amplitude entre -20 dBV et -64 dBV montre des niveaux

élevés des perturbations aux limites de 100 MHz ; après avoir examiné la réponse fréquentielle, ces perturbations conduites vers le RSIL sont de hautes fréquence puisqu'on a un pic d'amplitude -20 dB à 4 MHz, il est bien connu que les principaux générateurs de ces perturbations sont les effets capacitifs et inductifs émis par la commutations des interrupteurs de puissance et l'ensemble des impédances parasites.

Les figures III.14 et III.15 représentent les réponses temporelles et fréquentielles respectivement du courant de sortie de Buck en fonction de l'influence du réseau DC/DC à base de deux Bucks et le câble de liaison coté charge et coté source.

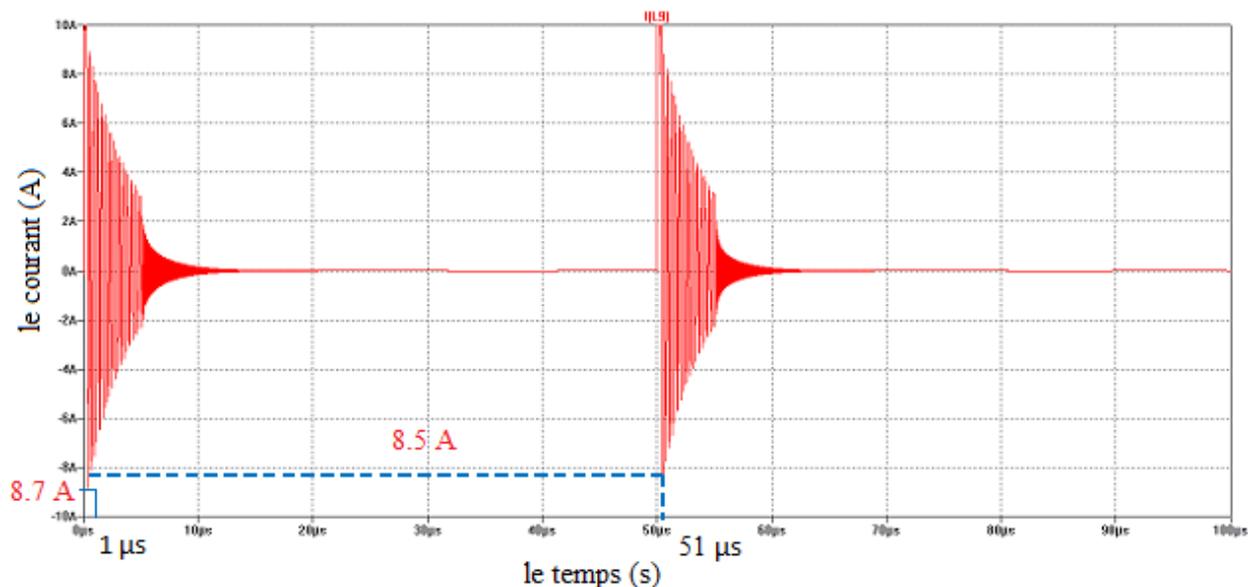


Figure III.14: réponse temporelle du courant de sortie de Buck.

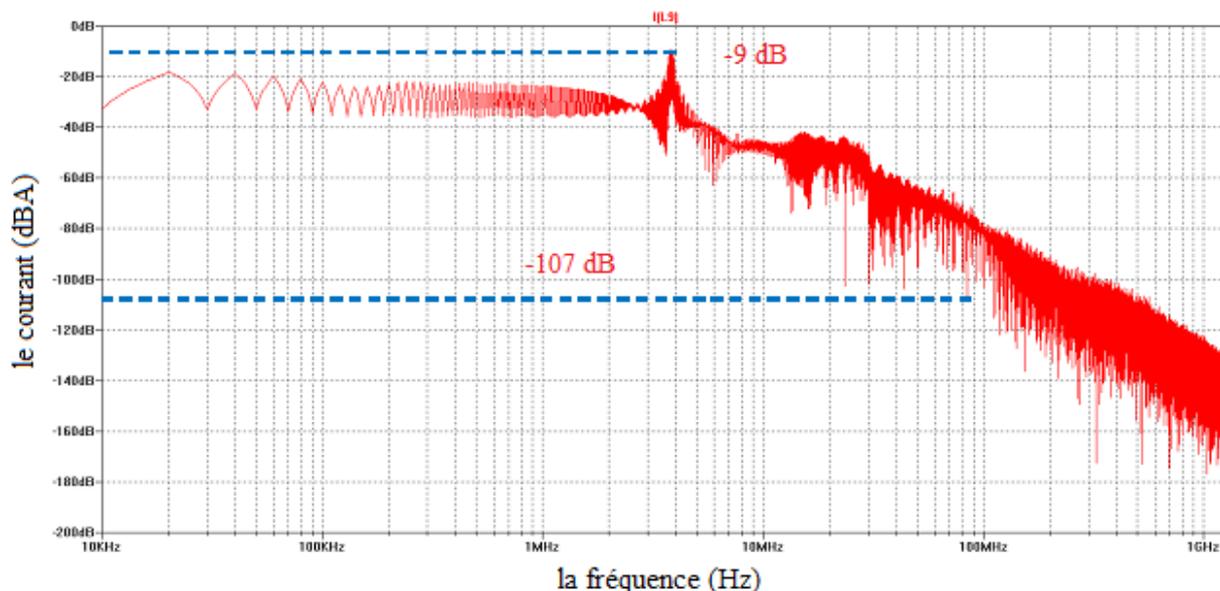


Figure III.15: réponse fréquentielle du courant de sortie de Buck.

La figure III.14 présente le résultat des perturbations au domaine temporel, elle nous montre un courant perturbé sortant de Buck d'une amplitude entre 10 A et -9 A au début de

commutation ; la courbe de 20  $\mu$ s jusqu'à la fin de commutation présente des niveaux de perturbations aux limites du nul.

La figure III.15 illustre le spectre au domaine fréquentiel des perturbations conduites vers le Buck d'amplitude entre -20 dBA et -40 dBA aux environs du 1 MHz. De cette fréquence jusqu'à 100 MHz, un spectre d'amplitude entre -9 dBA et -107 dBA présente des niveaux importants des perturbations si bien qu'on aie un pic d'amplitude à peu près de -9 dBA aux limites de 4 MHz, avoir examiné la réponse fréquentiel nous mène à identifier les générateurs principaux des perturbations électromagnétiques hautes fréquences tels que la commutation des interrupteurs de puissance ainsi que l'ensemble des impédances parasites y compris les effets inductifs et capacitifs venantes du câble de liaison.

#### **III.4.Conclusion et comparaison**

On a pu voir le comportement CEM d'un convertisseur statique DC/DC « Buck » connecté à un RSIL via une liaison qui est à l'origine des perturbations Electromagnétiques de l'environnement électrique. Les résultats obtenus confirment la réalité de la pollution électromagnétique du convertisseur statique DC/DC « Buck ».

D'après notre étude, on a vu qu'il y'a beaucoup de éléments parasites à l'instar des interrupteurs de commutations et l'ensemble des effets capacitifs et inductifs générés par les câbles de liaison entre le RSIL et le convertisseur DC/DC (Buck).

Par suite, les perturbations électromagnétiques émises par le circuit d'un seul hacheur Buck sont plus élevées que celles émis par le circuit de réseau DC/DC à base de deux hacheurs Buck en parallèle, en effet on distingue parfaitement l'influence de l'ajout des hacheurs sur les perturbations électromagnétiques.

# **Conclusion Générale**

Dans de nombreux domaines d'activité, l'action des perturbations électromagnétiques sur les systèmes électroniques peut entraîner des dysfonctionnements susceptibles de générer des risques. C'est pourquoi la validation de la compatibilité électromagnétique (CEM) des systèmes, qui suit les phases de conception et développement, est basée sur l'application des normes bien définies.

Le but principal de notre travail concernait l'étude sur l'impact des perturbations électromagnétiques à base des hacheurs Buck avec un RSIL sur un réseau DC/DC. Dans le premier chapitre, nous avons commencé par une présentation des généralités sur la CEM et l'électronique de puissance, avec les différentes classifications des perturbations ainsi que les différents types de couplages.

Puis dans le deuxième chapitre on a effectué une étude élargie sur les convertisseurs DC/DC dont on a exposé clairement les différents types en détaillant leurs modes de fonctionnement continu et discontinu et voir leur modélisation en faisant des équations dans chaque étape.

Et dans le troisième chapitre, nous avons abordé une brève description du logiciel LTSPICE qui présente une méthode de simulation des perturbations électromagnétiques en l'utilisant dans le domaine temporel et fréquentiel, en outre on a estimé et comparer les résultats obtenues de cette simulation par des brèves interprétations dont le but est de distinguer et mieux comprendre les points de différences entre le circuit contenant un Buck avec un RSIL, et un réseau de deux Bucks en parallèle avec un RSIL.

D'après les résultats obtenus de la simulation des deux modèles récents, on a conclu que les perturbations électromagnétiques dépendent du nombre des convertisseurs dans le circuit, en effet plus qu'on a des convertisseurs en parallèle " Réseau DC/DC " dans le circuit, moins qu'on a des perturbations dans la structure de l'environnement par rapport qu' un couplage d'un seul hacheur "Buck" qui est plus polluant que celui d'un réseau DC/DC .

En effet, ce travail nous a permis d'élargir nos connaissances dans divers domaines tels que le domaine de l'électronique de puissance.

Enfin, pour une utilisation industrielle, il serait intéressant d'automatiser et de développer des interfaces utilisateur pour les différentes procédures développées par exemple pour l'optimisation des modèles de semi-conducteurs et pour celle des paramètres du câble.

Les résultats obtenus sont encourageants et cette étude a été réalisée dans la perspective d'utiliser ces dernières pour un dimensionnement précis du filtre CEM.

# Bibliographie

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] Mohammed Melit, « Etude des perturbations dans les convertisseurs de l'électronique de puissance » Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont II et faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Jijel, le 19 avril 2008. Algerie.
- [2] Ali Jaafar, « Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance » Thèse de doctorat, 14 Novembre 2011, école doctorale, Université Paris-Est, France.
- [3] P. Poulichet, « Introduction à la compatibilité électromagnétique » Cours, école de la chambre de commerce et d'industrie de Paris, Septembre 2010.
- [4] Patrick Poulichet, « Propagation de courants parasites en mode différentiel » Cours, cité descartes, BP 99, 93162 noisy le grand cedex, Septembre 2013.
- [5] Smahiwalid, Slimaniahmed, « Simulation d'une agression rayonnée d'un câble électrique » Thèse de fin d'étude, université kasdimerbahouargla, 25 juin 2018.
- [6] Pr Bachir Maouche, « CEM: Terminologie-définition, Contexte et Enjeux » Cours, université de Béjaia, 2016/2017.
- [7] Alain Charoy, « Compatibilité électro-magnétique » Livre, Paris, Dunod, 2005, 701 p.
- [8] Dr Bendaoud, « compatibilité électromagnétique » cours, université de sidi bel abbes, 2018.
- [9] Fabrice Caignet, « compatibilité électromagnétique » Cours, laas-cnrs , Juillet 2016, Rennes, France.
- [10] Sandrine Roblot, « Caractérisation des couplages électromagnétiques dans les réseaux filaires cuivre en vue d'optimiser les transmissions à haut débit » Thèse de doctorat, université de Limoges, le 17 octobre 2007.
- [11] Sandrine Roblot « Caractérisation des couplages électromagnétiques dans les réseaux filaires cuivre en vue d'optimiser les transmissions à haut débit », 20 mai 2010, Xlim , université de Limoges , France .
- [12] Jean Paul Prulhiere , « guide de bonnes pratiques de CEM pour les mesures en environnement industriel à l'usage des PEM-PMI » Cours, direction générale de la compétitivité de l'industrie et des services, université de Bordeaux 351 Cours de la libération, 33405 Talence cedex.
- [13] Abdallah Darkawi, « La Compatibilité Électromagnétique (CEM) » Thèse de fin d'étude, École d'ingénieur, France, 2016.
- [14] CERGE, « compatibilité électromagnétique », Académie de paris, Créteil, Versailles.

Adresse URL : <http://sitelec.org/cours/cem2.pdf>

[15]B. MAOUCHE, «Couplages des perturbations dans la compatibilité électromagnétique (CEM)» Cours, université de Bejaïa, 2016/2017.

[16] Paul Sabatier, Samuel AKUE BOULINGUI,« Etude du couplage électromagnétique entre circuits intégrés par émulation du perturbateur-Application en téléphonie 3G» Thèse doctorat, l'université de Toulouse, 12 Novembre 2009.

[17] Centrale supélec« compatibilité électromagnétique en électronique de puissance », 2018, consulté le 23/03/2020.

Site web : <https://exed.centralesupelec.fr/formation/compatibilite-electromagnetique-en-electronique-de-puissance>,

[18] Mr. Guettiche Nabil, Mr.Akliouche Imed, «Développement des modèles CEM de composants d'électronique de puissance pour la caractérisation des perturbations en mode rayonné» Thèse de fin d'étude, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, le 25 septembre 2017.

[19] Hakim azizi, « étude de l'influence des perturbations électromagnétiques externes sur les équipements a champ forts » Thèse de fin d'étude, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 14 septembre 2017.

[20] Christophe, « Circuit imprimé présentation et différentes étapes de conception» cours en ligne, 12 avril 2019.

[21] Delaballed, Jaque, « La CEM : la compatibilité électromagnétique», Université de Limoges, Décembre 2001.

[22] J. Unger–heig-vd, « Introduction à la compatibilité électromagnétique (CEM) »,5.Blindage, Ecole ULB GDRO ESISAR, Valence, 2006.

[23]Samuel AKUE BOULINGUI, «Etude du couplage électromagnétique entre circuits intégrés par émulation du perturbateur - Application en téléphonie 3G» Thèse de doctorat, université de Toulouse, le 12 Novembre 2009.

[24] Raphael Lanthier, « Convertisseurs Statiques » Cours, Académie de Clermont-Ferrand, France, 2019.

[25] ATCHOUM SAFA, « Réalisation d'un convertisseur BUCK – MPPT » Thèse de fin d'étude, Année Universitaire 2016/2017, Département de Génie Electrique Université LARBI BEN M'HIDI Oum El-Bouaghi ,Algerie.

[26] Philipe Ferrari, « énergie et convertisseurs d'énergie : Chapitre 4 Hacheurs » Cours, Université de Savoie, France.

[27] Mr. KHALEM Sofiane et Mr. GHERBI Azzedine, « Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continu-continu et continu-alternatifs » Thèse de fin d'étude, année universitaire 2015/2016 ; UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA, BOUMERDES, Algerie.

[28] A. Rufér et P. Barrade ; « électronique de puissance Conversion DC/DC » Cours, école polytechniques fédérale de la lusanne, Suisse.

[29] ,Michel Garnero, « la conversion dc/dc : les hacheurs. » cours , 10 septembre 2005.

Site web : <http://garnero.michel.free.fr/Docs-isen/ENP/1-Hacheurs.pdf>

[30] Riva Ferrari, « les convertisseurs DC/DC : les hacheurs », cours en ligne , publié au 2015, consulté le 09/09/2020.

Site web : <https://slideplayer.fr/slide/2957975/>

[31] Bougandoura Abdelwahab, « Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants » Thèse, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi, le 22 juin 2013.

[32] Ovidiu Aurel Pop and Serban Lungu, « Modelling of DC-DC converters » Livre, Technical University of Cluj-Napoca; Romania, Octobre 2010.

[33] SENOUCI MOHAMED et BENNI ASMA, « Etude Sur Les Perturbations électromagnétiques Générées Par Des Convertisseurs Statiques DC/DC abaisseurs (Buck) » Thèse, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Année universitaire 2016/2017.

[34] S. Rezini, Z. Azzouz, « Impact des émissions EM conduites produites par un hacheur abaisseur » Thèse, Université des Sciences et de la technologie-Mohamed Boudiaf El Mnaouar, Oran, 10 Septembre 2017.

[35] Gilles Brocard, « Le simulateur LTspice IV - 2è édition Manuel, méthodes et applications » février 2013, Collection : Technique et ingénierie, Dunod.

[36] « Méthode Physique, les circuits RC et RL » Cours en ligne par ThemesDNA.com consulté le 23/08/2020.

Site web : [https://www.methodephysique.fr/circuits\\_rl\\_rc/](https://www.methodephysique.fr/circuits_rl_rc/)

[37] Mikael Foissac. « Méthodologie d'analyse CEM conduite d'un réseau multi convertisseurs », Electric Power. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.

[38] Ourabi Lassad, « Electronique de puissance chapitre I : les convertisseurs DC/DC (les hacheurs) » support de cours ; I.S.E.T de Bizzerte ; 28 avril 2020.

# *La liste des notations*

CEM : Compatibilité électromagnétique.

PEM : Perturbation électromagnétique.

IGBT : Insulated Gate Effect Transistor.

EMS : Electro Magnetic Susceptibility.

EMI : Electro Magnetic Interference.

## Résumé

L'utilisation variée, dans la vie quotidienne, de dispositifs d'électronique de puissance notamment les convertisseurs statiques est devenue de plus en plus courante. Les applications technologiques actuelles de ces derniers requièrent simultanément un niveau de précision et de performance élevée, de sorte qu'ils puissent jouer un rôle très important dans les systèmes de conversion d'énergie. Cependant, en pratique ces convertisseurs posent de nombreux problèmes tels que les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM) liés aux perturbations électromagnétiques constituant ainsi une difficulté majeure à surmonter.

L'objectif visé dans notre projet est l'étude sur l'impact des perturbations électromagnétiques à base des hacheurs Buck avec un RSIL, Ce mémoire se compose de deux parties, la première partie concerne l'étude théorique sur la CEM et l'électronique de puissance ainsi que les différents types de convertisseurs DC/DC.

La deuxième partie commence par une brève description du fonctionnement du logiciel LTSPICE qui présente une méthode de simulation des perturbations électromagnétiques en l'utilisant dans le domaine temporel et fréquentiel, en outre on a estimé et comparé les résultats obtenus de cette simulation par des brèves interprétations dont le but est de distinguer et mieux comprendre les points de différences entre le circuit contenant un Buck avec un RSIL, et un réseau de deux Bucks en parallèle avec un RSIL.

Enfin, une conclusion qui résume l'ensemble des travaux présentés et des perspectives aux futurs travaux sont proposés.

Par suite la réduction des perturbations liées à la CEM est possible en agissant sur le Câblage afin de garantir un comportement des convertisseurs statiques moins polluant possible.

**Mots clés :** Compatibilité électromagnétique (CEM), Electronique de puissance, Hacheur DC/DC Buck, Les perturbations électromagnétiques (PEM), Réseau DC/DC.

## Abstract

The varied use, in everyday life, of power electronic devices, in particular static converters, has become more and more common. The current technological applications of the latter simultaneously demand a high level of precision and performance, so that they can play a very important role in energy conversion systems. However, in practice these converters pose many problems such as electromagnetic compatibility (EMC) problems associated with electromagnetic disturbances thus constituting a major difficulty to be overcome.

The objective of our project is the study on the impact of electromagnetic disturbances based on Buck choppers with an RSIL, This thesis consists of two parts, the first part concerns the theoretical study on EMC and electronics as well as the different types of DC / DC converters.

The second part begins with a brief description of the operation of the LTSPICE software which presents a method for simulating electromagnetic disturbances by using it in the time and frequency domain, in addition we have estimated and compared the results obtained from this simulation by brief interpretations. Whose goal is to distinguish and better understand the points of difference between the circuit containing a Buck with an RSIL, and a network of two Bucks in parallel with an RSIL.

Finally, a conclusion which summarizes all the work presented and perspectives for future work are proposed.

Consequently, the reduction of disturbances linked to EMC is possible by acting on the wiring in order to guarantee the behavior of the static converters that is less polluting as possible.

**Key words :** Electromagnetic compatibility (CEM), Power electronics, DC / DC Buck chopper, Electromagnetic disturbances (PEM), DC / DC network.

### المخلص

أصبح الاستخدام المتنوع ، في الحياة اليومية ، للأجهزة الإلكترونية للطاقة ، ولا سيما المحولات الثابتة ، أكثر شيوعاً. تتطلب التطبيقات التكنولوجية الحالية لهذا الأخير في وقت واحد مستوى عالٍ من الدقة والأداء ، بحيث يمكنهم لعب دور مهم للغاية في أنظمة تحويل الطاقة. ومع ذلك ، من الناحية العملية ، فإن هذه المحولات تطرح العديد من المشكلات مثل مشاكل التوافق الكهرومغناطيسي (EMC) المرتبطة بالاضطرابات الكهرومغناطيسية وبالتالي تشكل صعوبة كبيرة يجب التغلب عليها.

الهدف من مشروعنا هو دراسة تأثير الاضطرابات الكهرومغناطيسية على أساس مروحيات باك مع RSIL ، تتكون هذه الأطروحة من جزأين ، الجزء الأول يتعلق بالدراسة النظرية على EMC والإلكترونيات وكذلك الأنواع المختلفة من محولات DC / DC.

يبدأ الجزء الثاني بوصف موجز لتشغيل برنامج LTSPICE الذي يقدم طريقة لمحاكاة الاضطرابات الكهرومغناطيسية باستخدامه في مجال الوقت والتردد ، كما قمنا بتقدير ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من هذه المحاكاة بتفسيرات موجزة. هدفه هو تمييز نقاط الاختلاف وفهمها بشكل أفضل بين الدائرة التي تحتوي على Buck مع RSIL ، وشبكة من اثنين Buck بالتوازي مع RSIL.

أخيراً، تم اقتراح استنتاج يلخص جميع الأعمال المقدمة وآفاق العمل المستقبلي وبالتالي ، يمكن الحد من الاضطرابات المرتبطة ب EMC من خلال العمل على الاسلاك الكهربائية من أجل ضمان سلوك المحولات الثابتة الأقل تلويثاً قدر الإمكان.

**الكلمات الدالة:** التوافق الكهرومغناطيسي (CEM) ، إلكترونيات الطاقة ، مفرمة DC / DC Buck ، الاضطرابات الكهرومغناطيسية (PEM) ، شبكة DC / DC