

---

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE BELHADJ BOUCHAIB D'AÏN-TEMOUCHENT



Institut des Sciences

Département des Sciences et Techniques

# MÉMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Électromécanique

Présenté par :

Mr. BENNI Kamel

Mr. BOUKREDIMI Kamel

---

## ANALYSE FREQUENTIELLE DE CONVERTISSEUR STATIQUE DC/DC.

---

Encadrant: Dr. BENAÏSSA MOHAMED - PR

Examineur : Dr. BENAZZA BAGHDADI - Maa

President : Dr. MECIRDI NOUREDDINE - MAA

Maitre Conférence "B" à U.B.B.A.T.

---

# Sommaire

Remerciement.....	6
CHAPITRE I.....	9
GENERALITES SUR COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE.....	9
I.1 Définition de la CEM.....	10
I.2 Émission et susceptibilité.....	10
I.3 Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences [4].....	11
I.4 Classifications des perturbations électromagnétiques .....	11
I.4.1 Définition .....	11
I.4.2 Perturbations conduites .....	12
I.4.3 Perturbations rayonnées .....	13
I.5 Les normes en CEM.....	13
I.5.1 Généralités .....	13
I.5.2. Emissivité.....	14
I.5.3. Immunité .....	14
I.6 Conclusion .....	15
Chapitre II .....	16
ANALYSE ET MODELISATION D'UN CONVERTISSEUR STATIQUE DC/DC .....	16
II.1 Introduction .....	17
II.2 Convertisseur DC-DC de type hacheurs.....	17
II.2.1 Les applications des hacheurs dans l'industrie.....	18
II.3 Différents types d'hacheurs .....	18
II.3.1 Convertisseur Buck.....	18
II.3.2 Convertisseur Boost.....	20
II.3.3 Convertisseur Buck-Boost.....	22

II-4. MODELISATION DU CONVERTISSEUR DC-DC .....	23
II.4.1 Réversibilité des hacheurs .....	23
II-6. CONCLUSION .....	27
CHAPITRE III .....	28
Analyse par TF et TFCT d'un Hacheur Buck .....	28
III.1 INTRODUCTION.....	29
III-2. Montage à base de Hacheur Buck.....	29
III-2.1 Analyse de la tension au niveau du MOSFET .....	31
III.2.2 Analyse du courant au niveau du MOSFET .....	33
III.2.3 Analyse par la TFCT de la tension et du courant au niveau du MOSFET .....	35
III.2.4 Analyse de la tension par TF et TFCT au niveau de la charge .....	37
III.2.5 Analyse de la tension par TF et TFCT au niveau du RSIL .....	39
II.3 Conclusion.....	42
Bibliographie et Webographie .....	44

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Environnement Electromagnétique .....	10
<b>Figure I.2</b> : Systèmes « coupables » et « victimes » .....	14
<b>Figure II-1</b> : Convertisseur DC/DC.....	17
<b>Figure II-2</b> : Schéma de base d'un convertisseur buck [21] .....	18
<b>Figure II.3</b> : Phases de fonctionnement d'un hacheur buck.....	19
<b>Figure II.4</b> : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck [15] .....	20
<b>Figure II-5</b> : Schéma de base d'un hacheur Boost. ....	20
<b>Figure II.6</b> : Phases de fonctionnement d'un hacheur boost.....	21
<b>Figure II-7</b> : formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost [15].....	21
<b>Figure II-8</b> : le hacheur Buck-Boost. ....	22
<b>Figure II-9</b> : Formes d'ondes de la tension de sortie d'un hacheur de type Buck-Boost.[15]	23
<b>Figure II-10</b> : Hacheur à deux quadrants réversible en courant.....	25
<b>Figure II-11</b> : Formes d'ondes de du signal de sortie réversible en courant. [15] .....	25
<b>Figure II-12</b> : Hacheur à deux quadrants réversible en tension .....	26
<b>Figure II-13</b> : Formes d'ondes du signal de sortie réversible en courant et en tension. ....	27
<b>Figure III-1</b> : un hacheur série connecté à un RSIL [22].....	29
<b>Figure III-2</b> : Composants d'un RSIL [22].....	30
<b>Figure III-3</b> : RSIL [22] .....	31
<b>Figure III.4</b> : Tension à la sortie du MOSFET.....	32
<b>Figure III-5</b> : TF de la tension à la sortie du MOSFET .....	33
<b>Figure III-6</b> : Courant à la sortie du MOSFET .....	34
<b>Figure III-7</b> : TF du courant à la sortie du MOSFET .....	34
<b>Figure III-8</b> : TFCT de la tension à la sortie du MOSFET .....	36
<b>Figure III-9</b> : TFCT du courant à la sortie du MOSFET .....	37
<b>Figure III-10</b> : Tension au niveau de la charge.....	38
<b>Figure III-11</b> : TF au niveau de la charge .....	38
<b>Figure III-12</b> : TFCT au niveau de la charge .....	39
<b>Figure III-13</b> : Tension à l'entrée du RSIL.....	40
<b>Figure III-14</b> : Tension à la sortie du RSIL .....	40
<b>Figure III-15</b> : TF à l'entrée du RSIL .....	41
<b>Figure III-16</b> : TF à la sortie du RSIL.....	41

**Figure III-17** : TFCT à la sortie du RSIL ..... 42  
**Figure III-18** : TFCT à la sortie du RSIL ..... 42

## **Liste des tableaux**

**Tableau I-1** : Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences ..... 11

## **Remerciement**

Tout d'abord nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous a guidé dans nos pas, qui nous a donné le courage, la volonté, et la patience pour surmonter les épreuves que nous avons rencontré tout au long de nos vie.

nous tenant à exprimer nos sincère gratitude et reconnaissance à notre encadrant : Mr BENAÏSSA Mohamed maître de conférence à CBBAT pour avoir accepté de diriger ce travail, pour son aide, sa disponibilité et ses conseils.

Nous remercions Mr MECIRDI Noreddine maître assistante à CUBBAT d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie Mr BENAZZA Baghdadi maître assistante à CUBBAT d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Enfin nous remercions toute personne ayant contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail.

**BENNI & BOUKREDIMI**

## **INTRODUCTION GENERALE**

En présence d'un phénomène naturel, comme la foudre, de décharges électrostatiques, ou simplement en présence d'un autre appareil électrique, il est probable d'observer des dysfonctionnements des appareils électroniques d'origine électromagnétique. Les appareils électriques et électroniques engendrent dans leurs milieux de fonctionnement des perturbations de nature électromagnétiques qui troublent le bon fonctionnement des appareils avoisinant. Ceci est dû au fait que les systèmes électroniques emploient de manière croissante des technologies extrêmement sensibles aux variations de signaux eux-mêmes de plus en plus rapides.

Au cours de la réalisation d'appareil électriques ou électroniques des experts en compatibilité électromagnétique interviennent en amont du projet pour prévenir les différentes difficultés sur le plan électromagnétique qui pourraient avoir un impact néfaste sur le plan économique. La compatibilité électromagnétique se focalise, en se basant sur des normes, à l'étude de trois principaux points : les sources de perturbation, leur mode de couplage et de propagation, et à la susceptibilité électromagnétique.

Dans ce mémoire de fin d'études, nous allons étudier les perturbations électromagnétiques engendrées par un convertisseur statique DC/DC de type hacheur abaisseur. Une étude temporelle, spectrale et spectro-temporelle sera réalisée.

Ce mémoire est composé de trois chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons les généralités sur la compatibilité électromagnétique en électronique de puissance.

Le deuxième chapitre est consacré à l'analyse et la modélisation d'un convertisseur statique DC/DC.

Dans le troisième chapitre nous présentons les résultats de simulation de l'étude d'un convertisseur DC/DC de type hacheur abaisseur.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.





# **CHAPITRE I**

## **GENERALITES SUR COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE**

## I.1 Définition de la CEM

La Compatibilité Electromagnétique (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. Ces problèmes ont certes toujours existé, mais ils deviennent aujourd'hui de plus en plus importants en raison de la concentration dans un même environnement d'appareil sous de systèmes dont les niveaux de puissance et de sensibilité sont très différents [1] [2].

## I.2 Émission et susceptibilité

La compatibilité doit être assurée dans sa globalité. Nous devons donc définir deux types de phénomènes (figure I.1) :

- Les émissions parasites ou perturbations désignent les signaux (volontaires ou non) dont la propagation est de nature à nuire au bon fonctionnement d'un appareil ou à la santé des êtres vivants situés au voisinage. Ces émissions parasites sont directement liées à l'activité des éléments électriques et/ou électroniques.
- La susceptibilité désigne un comportement d'un appareil ou d'un être vivant, en réponse à une contrainte externe, jugée incompatible avec une utilisation normale. Cette contrainte peut être volontaire ou non, naturelle ou artificielle. Lorsque la susceptibilité d'un circuit intégré est faible, cela signifie que son immunité est forte [3].

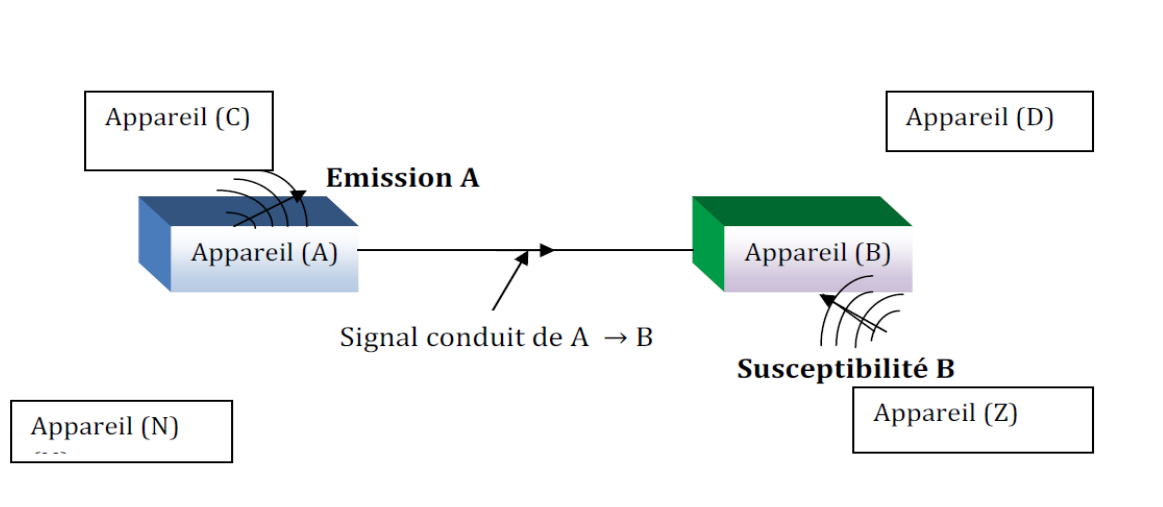


Figure I.1 : Environnement Electromagnétique

## I-3 Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences [4]

Soit la classification en tableau I.1, selon les fréquences et leurs limites de plages correspondant aux normes en émission [5]

Fréquences	0 Hz à 50 Hz	50 Hz à 2 KHz	9 Hz à 150 KHz	150 KHz à 30 MHz	150 KHz à 300 MHz	30 MHz à 1 GHz
<b>Grandeurs les plus souvent observées</b>	Sous harmoniques des courants	Harmoniques des courants et des tensions	Courants radio fréquences Tension perturbatrice Champs magnétiques	Courants radio fréquences Champ proche	Rayonnement des câbles Puissances perturbatrices	Rayonnement avec les champs généralement couplés
<b>Appellation « d'usage »</b>	Flicker	Conduit BF	Conduit limite BF-RF	Conduit RF (ou HF)	Champs conduits	Rayonné
<b>Convertisseurs statiques et appareils Électriques prouvent être Concerné</b>	Gradateur en trains d'ondes Cycloconvertisseur	Redresseur Gradateurs en angle de phase	Appareils Électriques d'éclairage et analogues	Micro-ordinateurs Alimentation à découpage	Outils électriques avec moteurs ou dispositifs thermiques Appareils Electro-domestiques	Micro-ordinateurs Alimentation à découpage Tout système numérique

Tableau I.1 : Classification des émissions des convertisseurs selon les fréquences

## I.4 Classifications des perturbations électromagnétiques

### I.4.1 Définition

La perturbation électromagnétique est un phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, d'un équipement ou d'un système.

Ces perturbations peuvent être un bruit électromagnétique, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation [6].

## **I.4.2 Perturbations conduites**

Les perturbations conduites les plus communes, sont les harmoniques de courant et de tension. Les générateurs d'harmoniques sont des charges non linéaires. Elles n'absorbent pas un courant sinusoïdal, bien qu'elles soient alimentées par une tension sinusoïdale (redresseurs à diode et à thyristors, lampes à décharges...). En plus des harmoniques de courant et de tension, les perturbations conduites comprennent les inter-harmoniques (causés essentiellement par les cyclo-convertisseurs) [7], [8]. Pour les convertisseurs DC/DC et DC/AC, ces courants et tensions correspondent généralement au fondamental et aux harmoniques de bas ordres. Les tensions et courants harmoniques ont un nombre d'effets indésirables sur les appareils et équipements utilisés. Les principales conséquences des effets nocifs de la distorsion harmonique engendrées à court terme sont rappelées ci-dessous [9] :

- ✓ **Echauffement les pertes par effet Joule** se composent des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques, ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs,....
- ✓ **Dysfonctionnement de certains équipements** en présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- ✓ **Excitation des résonances** des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiés laissant apparaître des surtensions ou des surintensités qui risquent de détériorer les câbles, disjoncter les fusibles.
- ✓ **Bruits acoustiques** dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances) générés par les harmoniques de courant.
- ✓ vibrations mécaniques et bruits acoustiques dans les générateurs et les moteurs.

De plus, ces effets nocifs instantanés (échauffement, surtension, surintensité,...), provoquent un vieillissement accéléré des appareils électriques [9]. La perturbation conduite est engendré par les gradients de tension  $dV/dt$  et de courant  $dI/dt$  dus essentiellement à la commutation

rapide, généralement les convertisseurs statiques sont des sources majeures de ces perturbations.

Dans ce cas les perturbations interviennent soit en mode commun (MC) ou mode différentiel (MD).

### **I.4.3 Perturbations rayonnées**

On parle d'un couplage ou perturbation en mode rayonné lorsque la perturbation électromagnétique de la source vers la victime s'effectue sans aucune liaison physique qui les relie. Les perturbations EM rayonnées sont caractérisées par la « propagation » de champ électrique ou de champ magnétique ou de champ électromagnétique rayonné par un composant (source) qui va attaquer un autre composant (victime). On distingue deux types de couplages pour ce mode [10] qui sont :

- ✓ Couplage en champ lointain ;
- ✓ Couplage en champ proche.

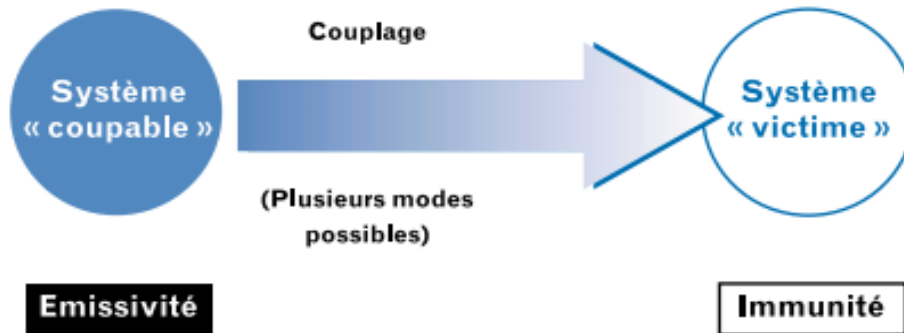
Ces types de couplages sont limités physiquement par des zones qui sont appelées : zone de champ proche et zone de champ lointain. La notion de la zone de champ proche et zone de champ lointain est toujours mise en évidence dans le domaine de la CEM. Cependant, nous proposons dans cette partie une définition sur la limite de ces 2 zones.

## **I.5 Les normes en CEM**

### **I.5.1 Généralités**

La CEM met en jeu un système « coupable » et un (ou des) système(s) « victime(s) » (figure I.2). Il existe donc des normes relatives à chacun des deux types de systèmes mentionnés ci-dessus : les normes d'émissivité pour les « coupables » et d'immunité pour les « victimes » dont les références sont régulièrement publiées dans le Journal Officiel des Communautés Européennes. Chacune de ces normes se rapporte à un produit, une famille de produits ou à un type d'environnement. Le but des normes est tout d'abord de servir d'outil, pour démontrer, de manière rigoureuse et reproductible, la présomption de conformité aux exigences essentielles de la directive CEM. Leur application est de nature volontaire. Elles prennent en compte la plupart des phénomènes de perturbations rencontrés et permettent ainsi de valider l'aptitude d'un dispositif ou d'un système à fonctionner de façon satisfaisante dans un

environnement électromagnétique prédéterminé, en fonction des niveaux de sévérité appliqués



**Figure I.1** : Systèmes « coupables » et « victimes »

### **I.5.2. Emissivité**

Les normes fondamentales contiennent à la fois des indications précises sur les méthodes de mesure et des valeurs limites. Ces normes découlent de celles du CISPR (Comité international spécial des perturbations radioélectriques), destinées à protéger les radiocommunications. La plupart de ces normes concernent une famille de produits (exemple : les appareils de traitement de l'information ...)

### **I.5.3. Immunité**

Il existe trois types de normes relatives à l'immunité des systèmes :

- ✓ les normes fondamentales qui décrivent un phénomène de perturbation électromagnétique et la méthodologie d'essai correspondante (exemple : immunité aux décharges électrostatiques) [11] ;
- ✓ les normes génériques qui se réfèrent aux normes fondamentales et fixent des niveaux de sévérité en fonction de deux types d'environnements relatifs aux milieux domestique et industriel [12] [13] ;
- ✓ -les normes spécifiques aux produits ou familles de produits qui, en plus des normes génériques ci-dessus, tiennent compte de la spécificité des équipements concernés en décrivant par exemple le mode de fonctionnement en essai [14]

## **L.6 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons mis en revue quelques notions de base relative à la compatibilité électromagnétique en électronique de puissance. Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse et la modélisation d'un convertisseur statique DC/DC de type hacheur.



## **Chapitre II**

# **ANALYSE ET MODELISATION D'UN CONVERTISSEUR STATIQUE DC/DC**

## II.1 Introduction

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (*monophasée ou triphasée*) [15].

La conversion DC/DC consiste à générer une tension ou un courant continu à partir d'une source d'alimentation également continue. Le besoin de ce type de conversion est très important dans la plupart des appareillages électriques notamment dans l'alimentation de circuits électriques nécessitant souvent plusieurs niveaux de tensions différents à partir d'un bloc d'alimentation unique [16].

Nous présentons dans ce chapitre deux types de convertisseurs statiques DC/DC, à savoir le hacheur série (boost) et le hacheur parallèle (buck).

En début de chapitre, nous introduisons les différents modes de fonctionnement de ces deux convertisseurs, leurs caractéristiques de sortie et les différents paramètres qui les influent, puis nous donnons la modélisation de ces hacheurs en électronique de puissance.

## II.2 Convertisseur DC-DC de type hacheurs

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques qui permettent le transfert de l'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue. (Ils sont l'équivalents des transformateurs en alternatif) [17].

Ce convertisseur a pour vocation d'assurer l'influence d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu [18] la figure ci-dessous rappelle le schéma de principe des hacheurs :

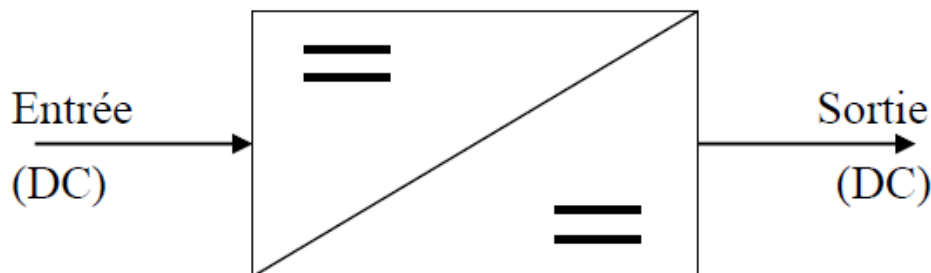


Figure II-1 : Convertisseur DC/DC

## II.2.1 Les applications des hacheurs dans l'industrie

Le hacheur est principalement utilisé pour [19]:

- ✓ la variation de vitesse d'un moteur à courant continu ;
- ✓ le freinage par récupération ;
- ✓ l'alimentation d'appareil électronique grand public (PC, ...).

## II.3 Différents types d'hacheurs

IL existe une variété de convertisseurs DC/DC possibles. Dans ce qui suit on évoque seulement trois types de convertisseurs [15]:

- ✓ abaisseur de tension «Buck » ;
- ✓ élévateur de tension « Boost » ;
- ✓ Convertisseur« Buck-Boost »

### II.3.1 Convertisseur Buck

Le hacheur dévolteur permet de transférer l'énergie d'une source de tension fixée  $V_i$  vers un récepteur qui peut être l'induit d'une machine à courant continu ou bien une simple résistance inductive. La structure la plus simple qui puisse exister est une structure à deux interrupteurs, où le générateur de tension constante  $V_i$  peut être, par exemple, une batterie d'accumulateurs (ou toute autre source de tension : alimentation stabilisée), ... [20]

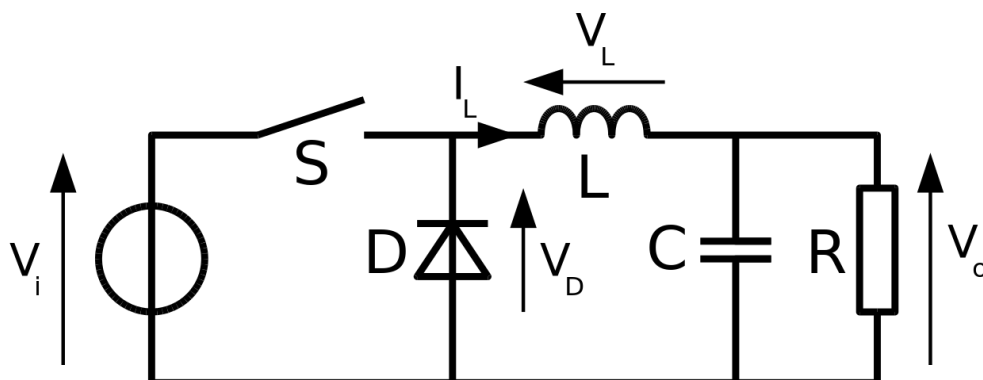


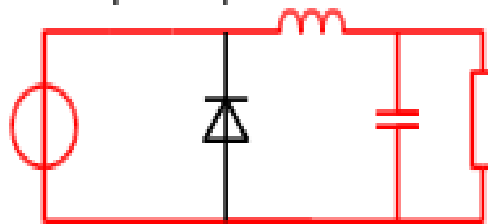
Figure II-2 : Schéma de base d'un convertisseur buck [21]

### Principe de fonctionnement

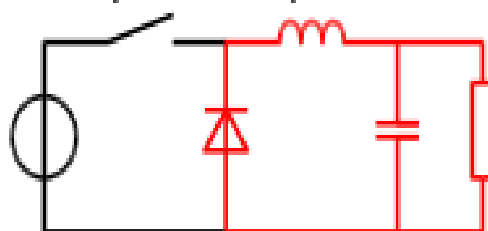
Le composant principal est l'inductance, qui passe alternativement de charge (réduisant la tension, fournit par le générateur, disponible pour le circuit en aval) à source (fournissant une tension alors que le générateur est mis hors circuit). Le fonctionnement peut être divisé en deux phases suivant l'état de l'interrupteur S (figure II.3):

- 1- On ferme l'interrupteur S. Le courant fourni par le générateur, initialement nul, augmente linéairement et traverse l'inductance. L'inductance s'oppose à cette augmentation du courant, produisant une tension opposée, et elle stocke l'énergie reçue sous forme magnétique. la tension aux bornes de l'inductance vaut  $V_l = V_i - V_0$ . La diode étant polarisée en inverse avec la tension  $V_i$  du générateur, aucun courant ne la traverse.
- 2- L'interrupteur S est ouvert. Le générateur est mis hors circuit, plus aucun courant ne le traverse. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. Le courant traversant l'inductance décroît. L'inductance s'oppose à cette réduction du courant, produisant une tension qui la met en situation de source pour le circuit aval, en utilisant l'énergie magnétique stockée à la phase précédente. La tension aux bornes de l'inductance vaut :  $V_l = -V_0$ .

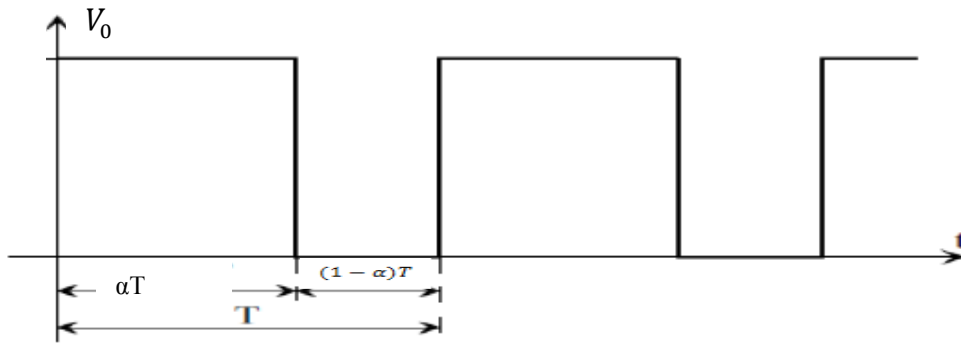
Interrupteur passant



Interrupteur bloqué



**Figure II-3:** Phases de fonctionnement d'un hacheur buck



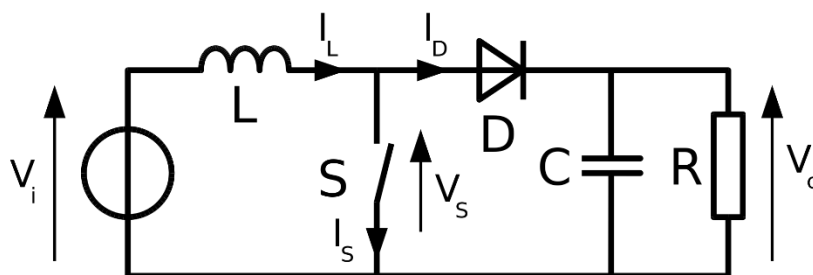
**Figure II-4** : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck [15]

### II.3.2 Convertisseur Boost

Appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle.

C'est un convertisseur direct DC/DC. 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) (figure II.5).

L'interrupteur S 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) [21].



**Figure II-5** : Schéma de base d'un hacheur Boost.

#### Principe de fonctionnement

- 1- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [23].

2- Lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa force électromotrice s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité (figure II.6).

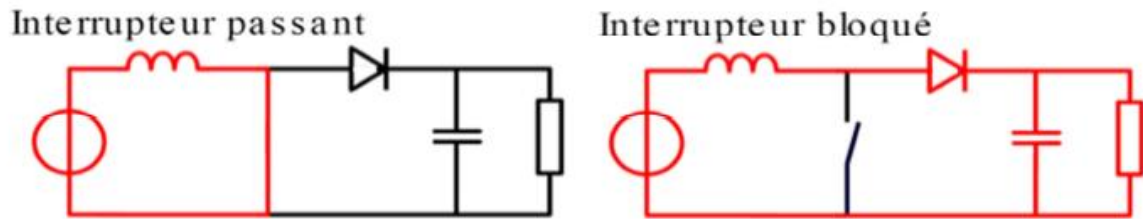


Figure II-6 : Phases de fonctionnement d'un hacheur boost

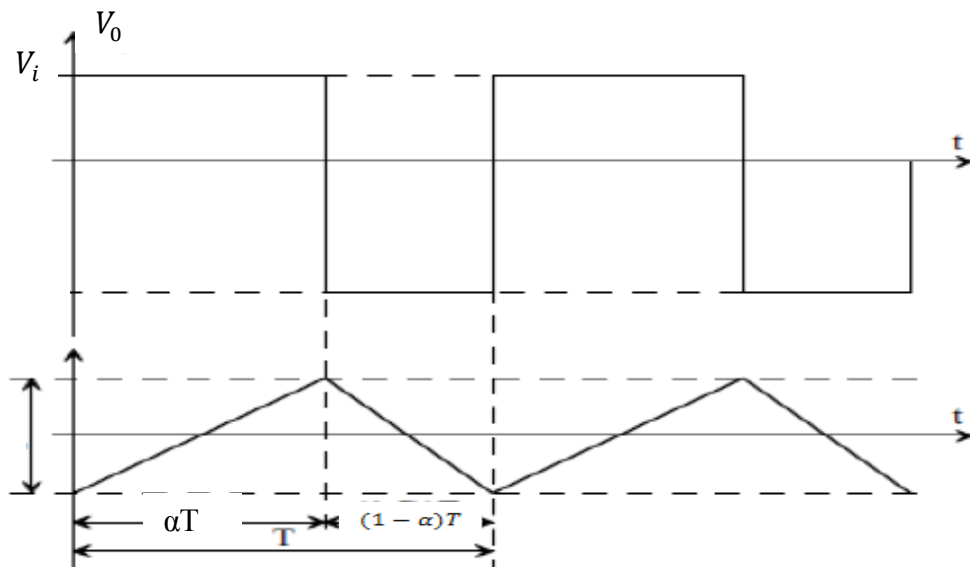


Figure II-7 : formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost [15]

### II.3.3 Convertisseur Buck-Boost

Appelé aussi Hacheur inverseur, dévolteur-survolteur.

Le hacheur inverseur est un convertisseur indirect DC/DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive).

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée ; son schéma de base est illustré sur la Figure II-8.

L'interrupteur  $S$  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). [15]

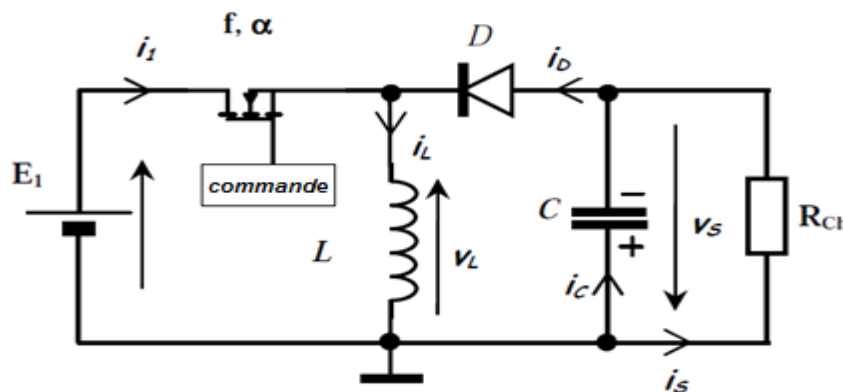


Figure II-8 : le hacheur Buck-Boost.

#### Principe de fonctionnement

L'interrupteur  $S$  est fermé pendant la fraction  $\alpha T$  de la période de découpage  $T$ . La source d'entrée fournit l'énergie à l'inductance  $L$ . La charge est déconnectée du montage (diode  $D$  bloquée). Lors du blocage du transistor, la diode  $D$  assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la Figure II-9. En régime permanent, la valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle, ce qui impose la relation suivante :

$$V_s = E_1 \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Par définition,  $0 \leq \alpha \leq 1$ , ce qui induit que le montage est abaisseur et élévateur de tension (négative). La tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée lorsque  $\alpha < 0,5$  et elle est supérieure dans le cas contraire (abaisseur/élévateur). [24]

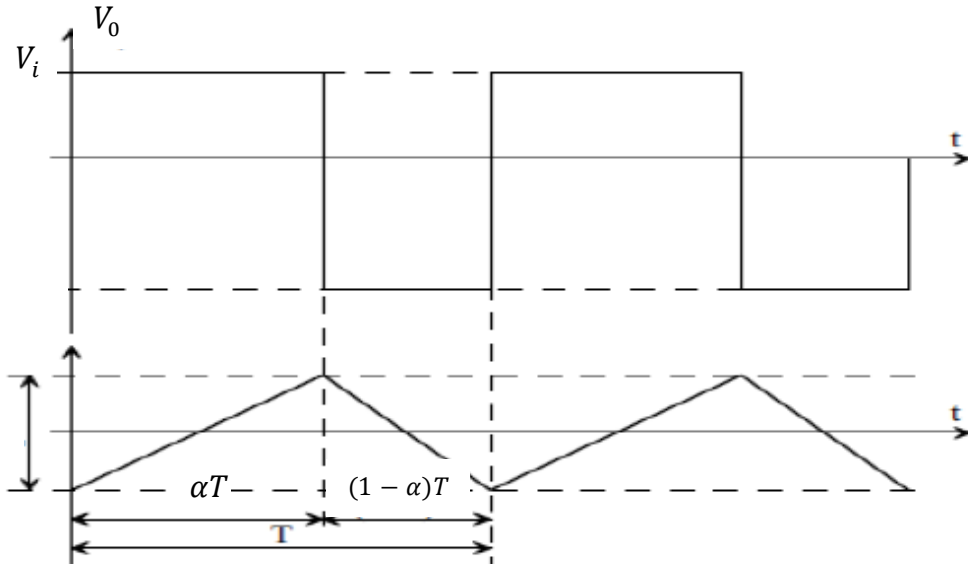


Figure II-9 : Formes d'ondes de la tension de sortie d'un hacheur de type Buck-Boost.[15]

## II-4. MODELISATION DU CONVERTISSEUR DC-DC

### II.4.1 Réversibilité des hacheurs

Certains hacheurs sont réversibles : ils peuvent alors fournir de l'énergie à la charge, généralement une machine à courant continu dans ce type d'application, ou bien en prélever ce qui permet de freiner la machine.

Les hacheurs de puissance sont utilisés, par exemple, pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu. Ils sont aussi un élément essentiel des alimentations à découpage. [21]



### II.4.1.a Hacheur deux quadrants réversible en courant

#### Fonctionnement du hacheur réversible en courant :

Si on associe un hacheur série, avec un hacheur parallèle, on obtient le circuit de la figure II-10 qui fonctionne en hacheur dévolteur/survolteur, où :

- ✓ Ts et Ds représentent l'hacheur série ;
- ✓ Tp et Dp représentent l'hacheur parallèle.
- ✓ Pour le fonctionnement en hacheur série :
  - ✓ Si Ts est ON et Ds est OFF :  $U = E, I = I_s > 0$
  - ✓ Si Ts est OFF et Ds est ON :  $U = 0$ , I continue de circuler dans le même sens ,  $I > 0$  Donc U et I sont positives, et la puissance  $P = UI$  est positive.
- ✓ Pour le fonctionnement en hacheur parallèle :
  - ✓ Si Tp est ON et Dp est OFF :  $U = 0$ , on aura le courant I en sens inverse due à  $E'$  (la f.e.m. du moteur). Donc  $I < 0$
  - ✓ Si Tp est OFF et Dp est ON:  $U = E$ , I circule du moteur à la source  $I = -I_s < 0$ . Donc  $U > 0$  et  $I < 0$  et la puissance  $P = UI$  est négative.

Donc le convertisseur travaille dans 2 quadrants, où U est toujours positive mais I peut être positif ou négatif.[25]

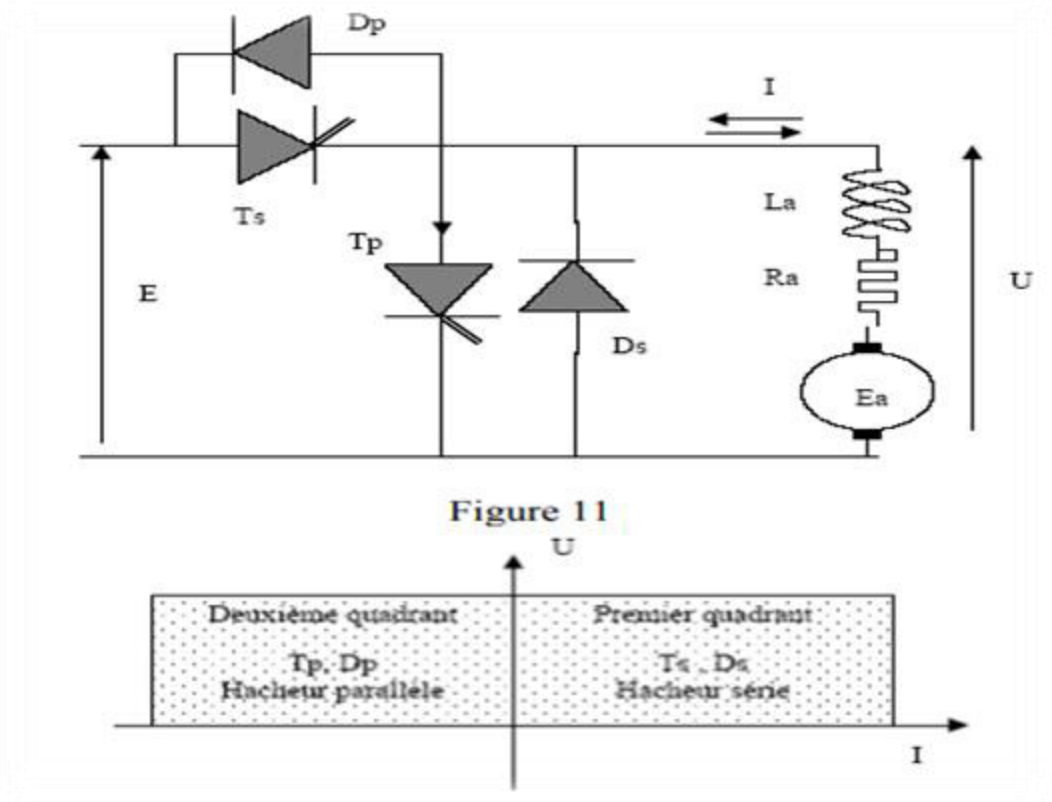


Figure II-10 : Hacheur à deux quadrants réversible en courant [25]

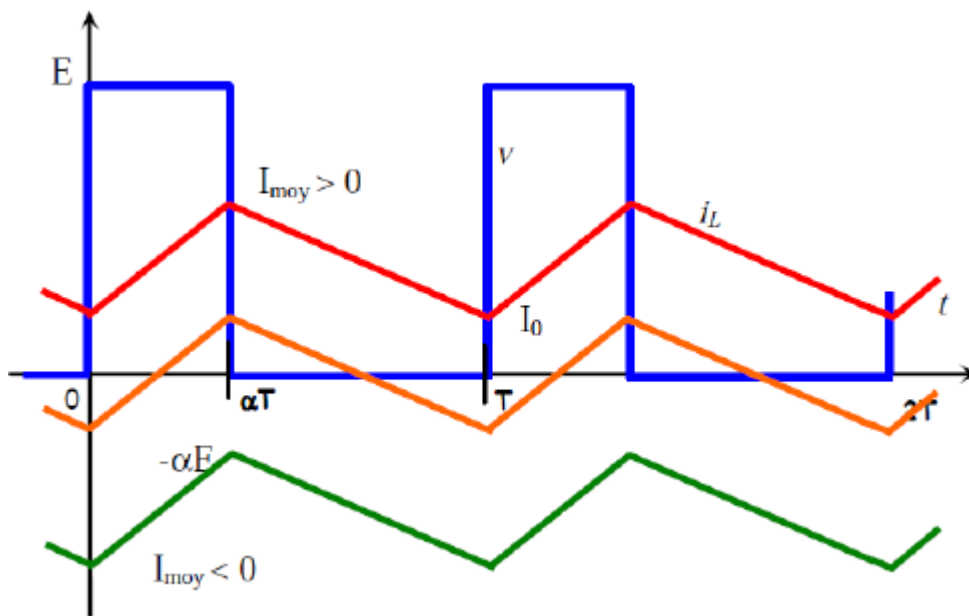


Figure II-11: Formes d'ondes de du signal de sortie réversible en courant. [15]

### II.4.1.b Hacheur deux quadrants réversible en Tension

La structure recherchée doit permettre une réversibilité en puissance moyenne du dispositif liée à une réversibilité en tension de la source de courant qui reste unidirectionnelle en courant. La source de tension est une source de tension continue constante. La réversibilité en puissance moyenne exige de cette source d'être réversible en courant.

En prenant l'exemple d'un moteur à courant continu, le convertisseur doit permettre un fonctionnement réversible (moteur/génératrice) de cette machine par réversibilité du flux d'excitation. La réversibilité n'étant pas la même dans les deux sources, les phases actives de fonctionnement dans les deux cas nécessitent un croisement de l'interconnexion des sources.

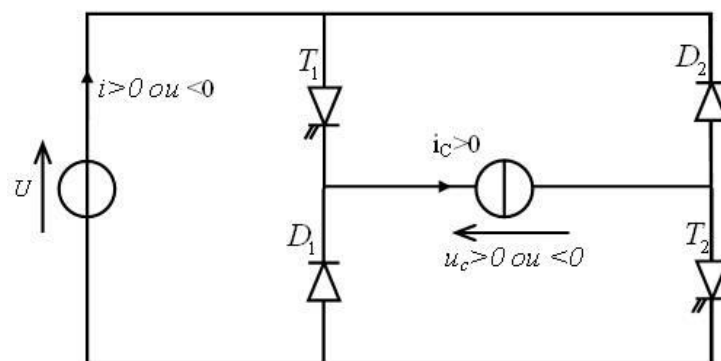
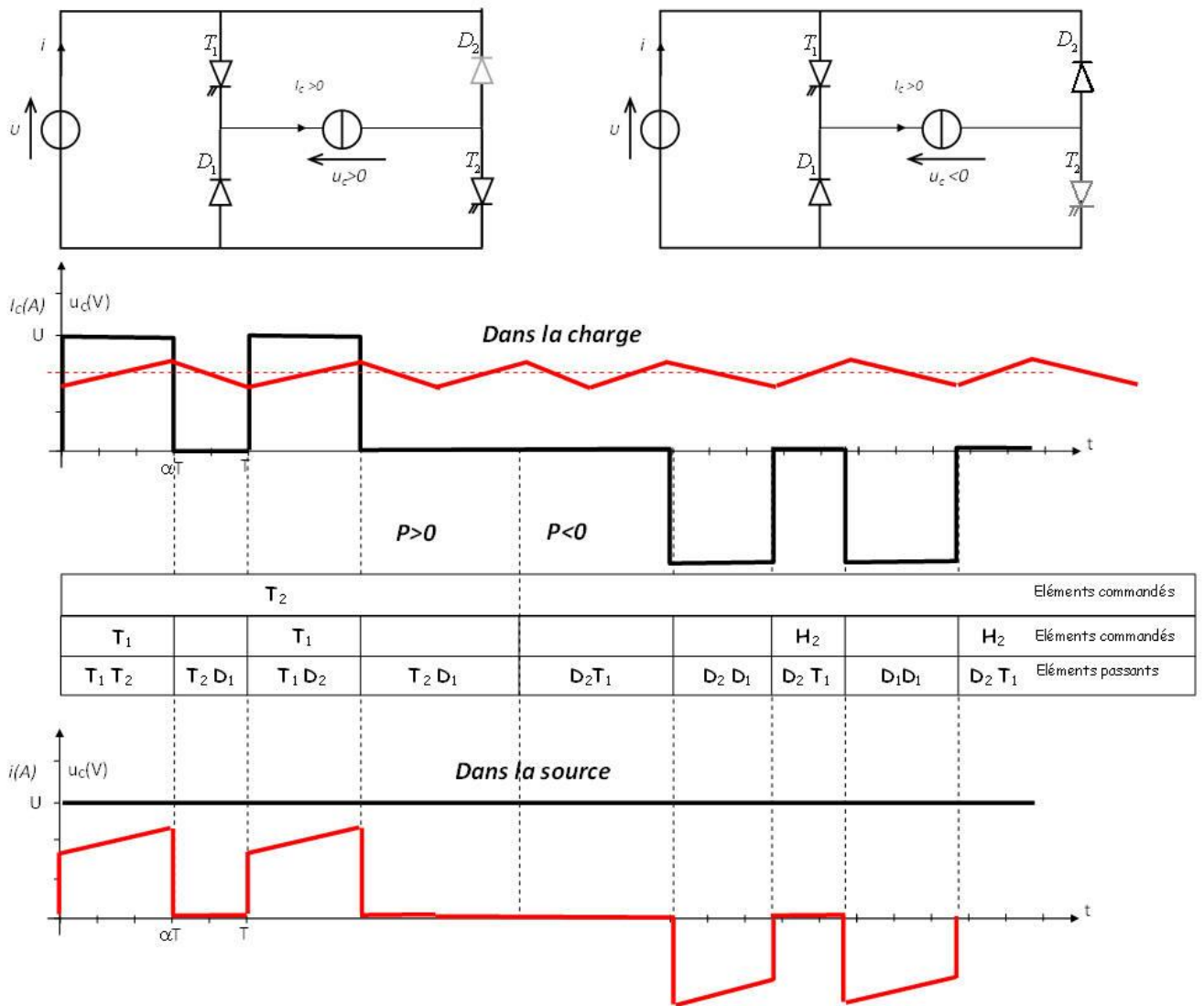


Figure II-12 : Hacheur à deux quadrants réversible en tension



**Figure II-13** : Formes d'ondes du signal de sortie réversible en courant et en tension.

## II-6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné les notions de base des convertisseurs statiques DC/DC de type hacheur (boost, buck et buck/boost). Le principe de fonctionnement de chaque type a été mis en revue. En fin de chapitre nous avons étudié la réversibilité en courant et en tension.

## **CHAPITRE III**

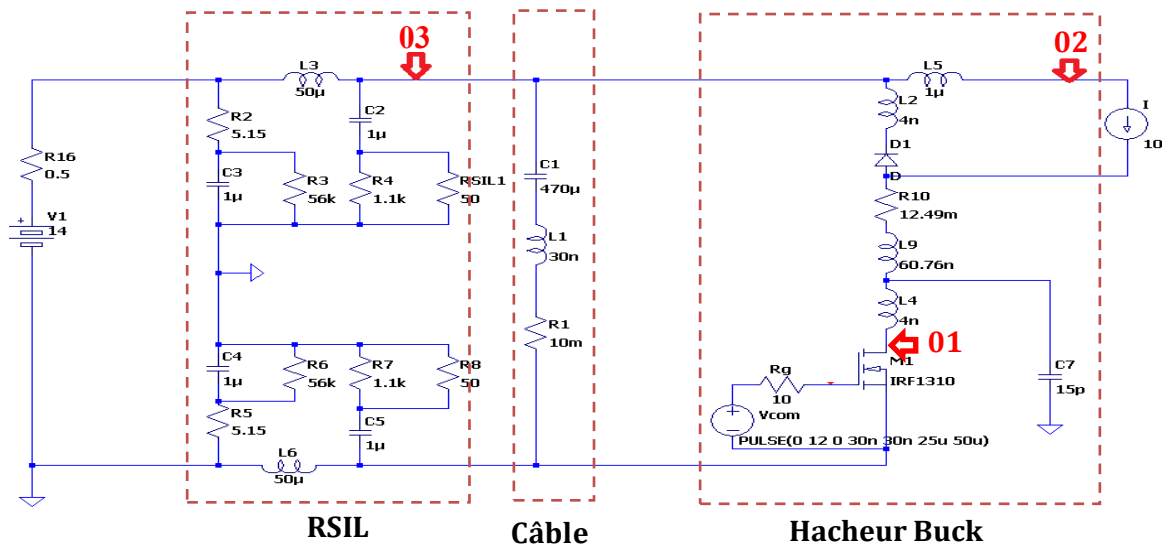
### **Analyse par TF et TFCT d'un Hacheur Buck**

### III.1 INTRODUCTION

Le rendement des systèmes de conversion d'énergie a été amélioré par l'augmentation des performances des composants en commutation, tant en régime statique que dynamique, ce qui a permis de réaliser des convertisseurs compacts, capables de piloter des puissances élevées. L'émergence de composants à grille isolée MOSFET et IGBT, permet de travailler à des fréquences de découpage de plus en plus élevées, de l'ordre de plusieurs Mégahertz, avec des contraintes statiques de l'ordre de 100 V et 10 A pour les MOSFET et 10 kHz- 1200V- 200A pour les IGBT. Ces performances augmentent la pollution électromagnétique de ce type de système [23].

Dans ce chapitre nous allons étudier l'effet de l'ouverture et de la fermeture de l'interrupteur (MOSFET) aux différents points test d'un hacheur abaisseur (BUCK) en utilisant le logiciel LTSPICE et le logiciel Matlab. Ainsi, une étude temporelle, fréquentielle et spectro-temporelle sera effectuée.

### III-2. Montage à base de Hacheur Buck



Soit la figure III.1 composée :

Figure III-1 : un hacheur série connecté à un RSIL [22].

- ✓ D'un hacheur buck composé d'un interrupteur de type MOSFET IRF1310 et d'une diode D1N914, de résistances parasites, d'un condensateur de découplage  $C_p$  et de divers éléments parasites dues aux diverses connections au sein du convertisseur.
- ✓ Le hacheur est relié au Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne (RSIL).constitué de composants passifs (résistances, condensateurs et inductances)[22].
- ✓ D'une charge
- ✓ D'un câble

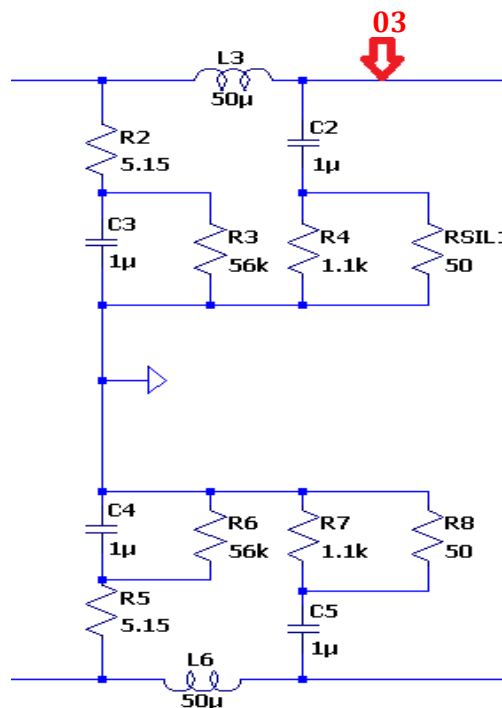
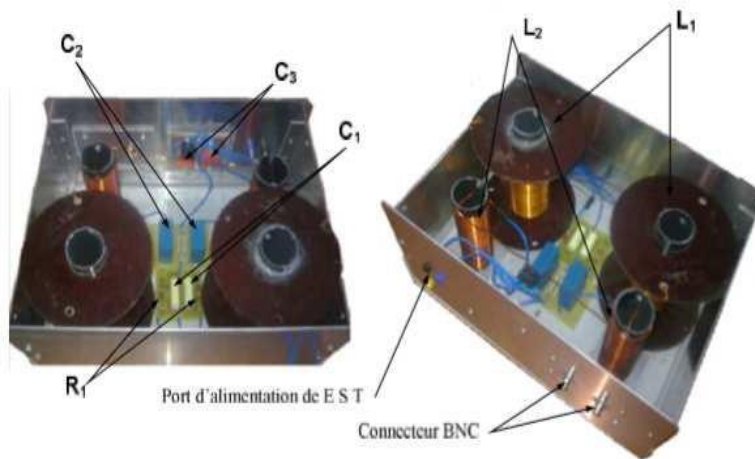


Figure III-2 : Composants d'un RSIL [22]



**Figure III-3** : RSIL [22]

Le RSIL est alimenté par une source de tension continue  $V_1$  et la charge est représentée par une source de courant continu  $I$ . Il apparaît également sur ce schéma une association d'éléments résistifs, inductifs et capacitifs censée rendre compte des effets dus aux couplages parasites haute fréquence de la structure.

Sur la figure III.1, il apparaît clairement qu'un seul câble modélisé par les composants  $C_1, L_1$  et  $R_1$  est utilisé pour relier le RSIL au hacheur Buck.

Les flèches en rouge représentent les points tests utilisés pour le visionnement des tensions et des courants sous l'environnement LTSPICE.

Dans ce qui suit, les résultats de simulations en termes d'analyse spectrale par la transformée de Fourier (TF) et d'analyse spectro-temporelle par la Transformée de Fourier à Court Terme (STCT) aux différents points tests seront présentés.

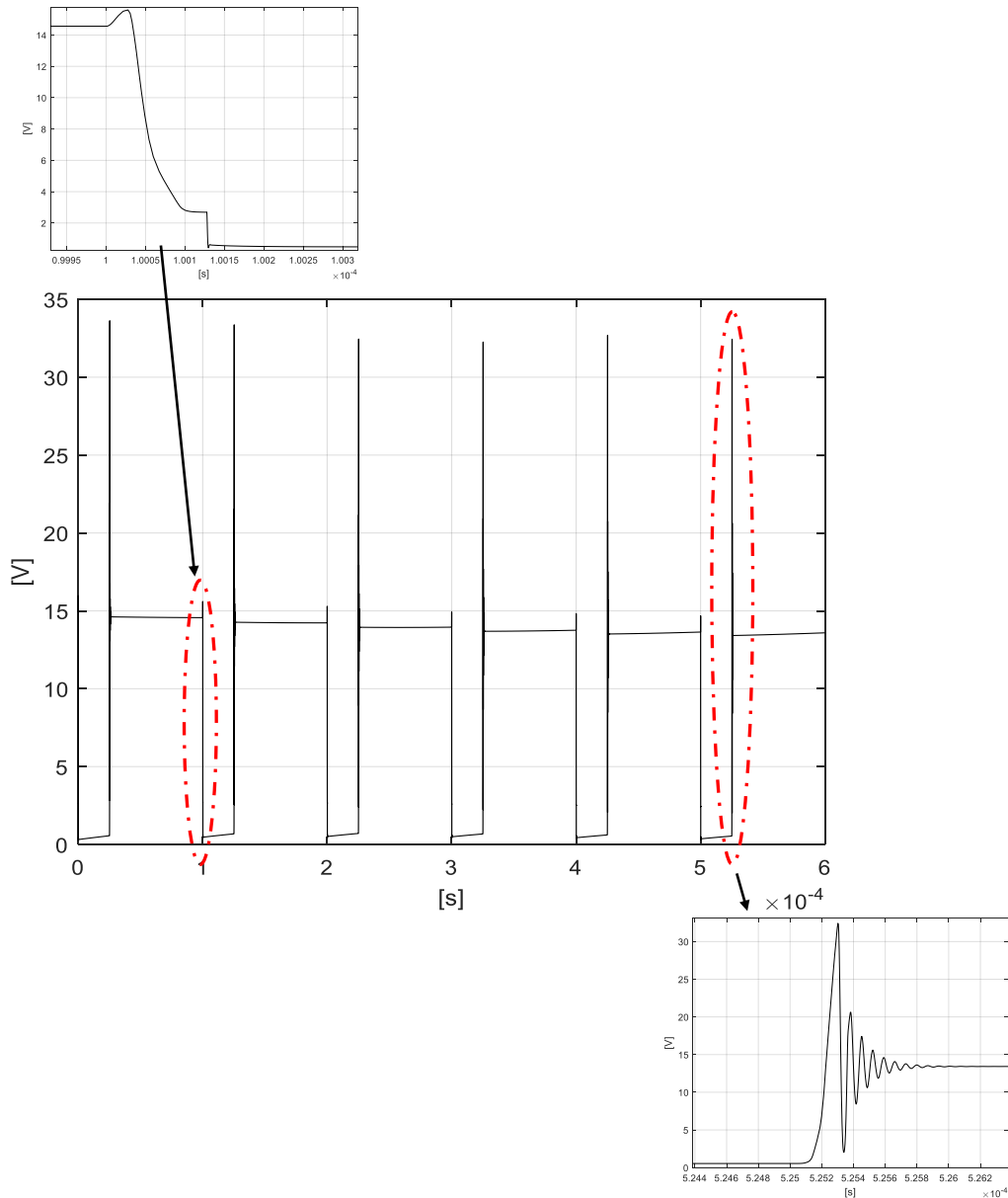
### **III-2.1 Analyse de la tension au niveau du MOSFET**

Les figures III.4 représente l'allure de la tension à la sortie du MOSFET (interrupteur) point test 01.

Le signal obtenu est un signal carré de fréquence égale à 10 KHz et de 15  $V_{cc}$ . Cependant l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur commandé par la source de tension  $V_{com}$  engendre des perturbations de hautes fréquences au niveau des fronts montant et descendant du signal



carré obtenu comme illustré dans les zoom effectués sur la figure III.4. Pour le front descendant, le temps de descente apparaît clairement ceci est dû principalement au temps de réponse de l'interrupteur. Pour le front montant, des oscillations apparaissent plus nettement, avec un  $dV/dt$  de plus de 33 volts.



**Figure III-4** : Tension à la sortie du MOSFET

La figure III.5 illustre la représentation spectrale par la TF du signal carré issu de la sortie de l'interrupteur. La fréquence du fondamental de 10KHz à la plus grande puissance et cela est

nettement visible. Les différentes harmoniques du signal se manifestent avec des puissances moins importantes.

L'allure du spectre décroît jusqu'à la fréquence de 13 KHz nous remarquons une augmentation de puissance (-20dB) qui est sûrement due aux perturbations hautes fréquences générer au niveau des fronts montant et descendant du signal carré. Ces augmentations de la puissance du spectre, même si elles sont très faibles, sont nettement visibles sur la figure III.5. Pour les très hautes fréquences, au-delà de 100 MHz même si il existe des perturbations, elles seront négligeables vu leurs puissances qui est de l'ordre de -80 dBm et moins.

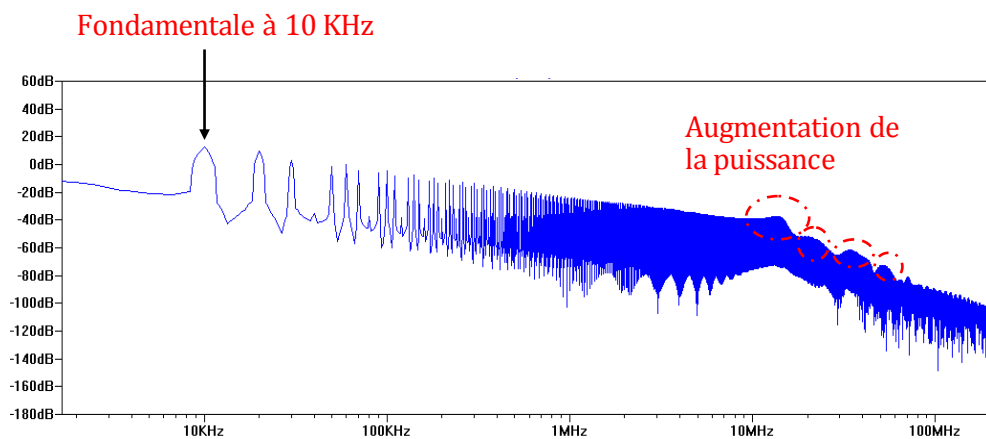
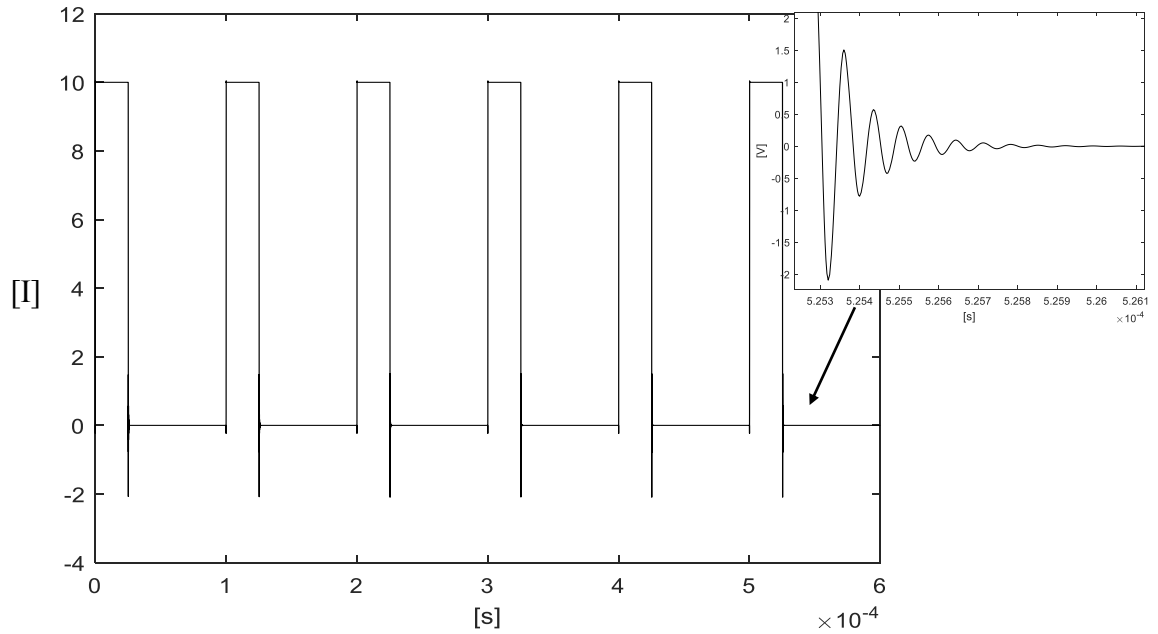


Figure III-5 : TF de la tension à la sortie du MOSFET

### III.2.2 Analyse du courant au niveau du MOSFET

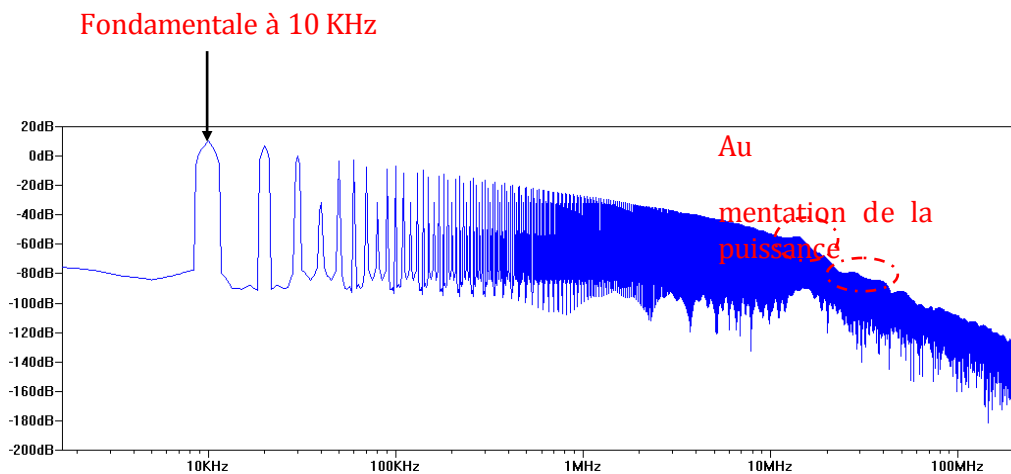
La figure III.6 représente l'allure du courant à la sortie du MOSFET (interrupteur) point test 01. Comme pour la tension des perturbations de hautes fréquences apparaissent nettement au niveau des fronts descendants du signal de sortie du MOSFET.



**Figure III-6** : Courant à la sortie du MOSFET

La figure III.7 illustre la représentation spectrale par l'analyse de Fourier du courant issu de la sortie de l'interrupteur. La fréquence du fondamental de 10KHz à la plus grande puissance et cela est nettement visible. Les différentes harmoniques du signal se manifestent avec des puissances moins importantes.

Les mêmes remarques que pour la tension peuvent être soulevées.



**Figure III-7** : TF du courant à la sortie du MOSFET

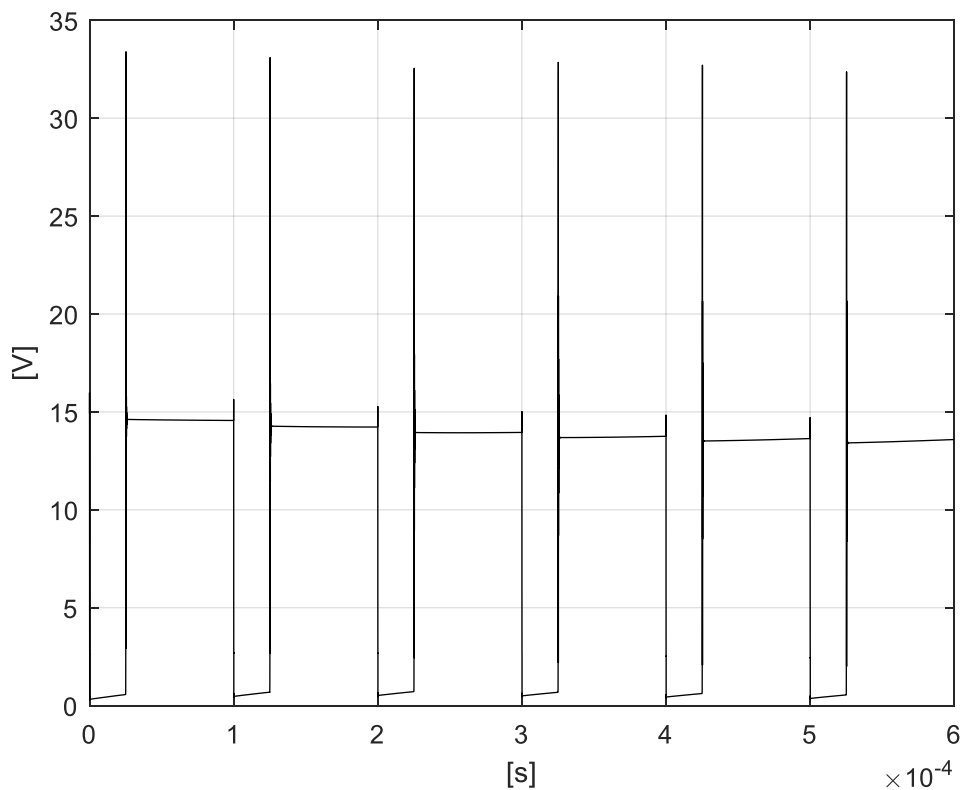
Cependant, pour une TF qui nous informe sur le contenu spectral du signal, il est impossible de connaître le temps d'apparition de chaque fréquence. Pour pallier ce problème, nous

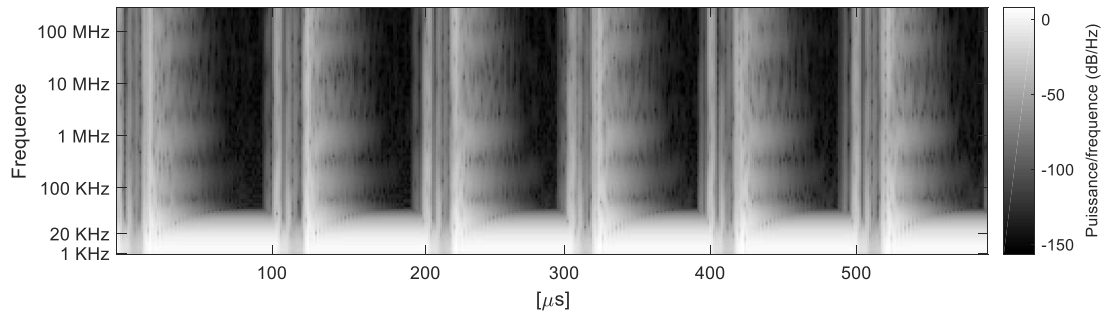
introduisons la TFCT.

### III.2.3 Analyse par la TFCT de la tension et du courant au niveau du MOSFET

La figure III.8 illustre la TFCT de la tension à la sortie du MOSFET.

Dans cette figure, on remarque que pour les fréquences de la fondamentale (10 KHz) et des harmoniques du signal carré à la sortie du MOSFET les puissances sont élevées (dB/Hz) pendant toute la durée du signal. Au niveau des fronts montant et des fronts descendant du signal, les puissances augmentent même pour des fréquences hautes, cela est visible par des raies verticales de couleur qui tendent vers des nuances de gris très claires. Cela implique que l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur engendrent des perturbations de hautes fréquences.

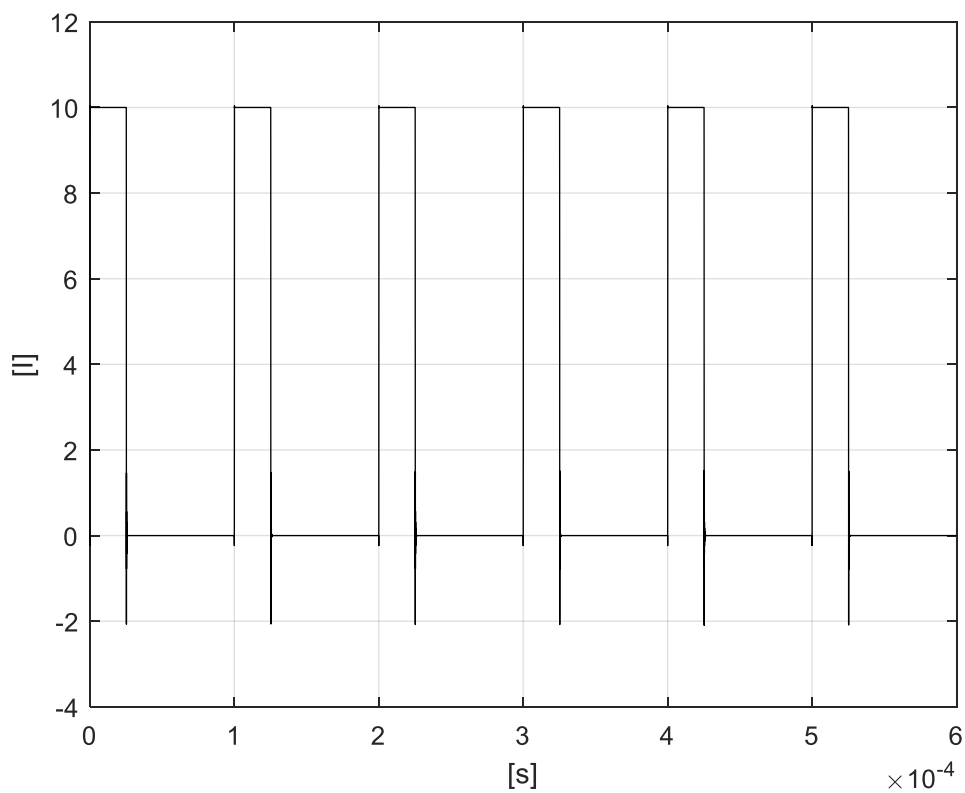


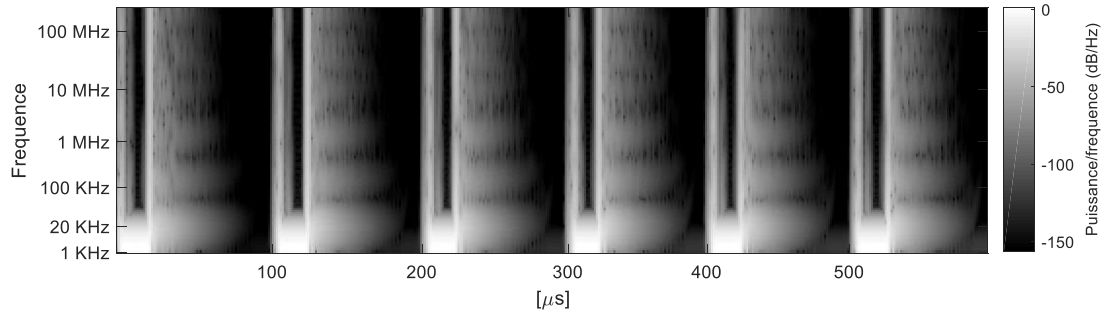


**Figure III-8** : TFCT de la tension à la sortie du MOSFET

La figure III.9 illustre la TFCT du courant à la sortie du MOSFET.

Les mêmes remarques que pour la tension peuvent être reprises pour l'analyse du courant. Ainsi l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur engendrent des perturbations hautes fréquences.





**Figure III-9** : TFCT du courant à la sortie du MOSFET

### **III.2.4 Analyse de la tension par TF et TFCT au niveau de la charge**

La figure III.10 représente l'allure de la tension au niveau de la charge (point test 02).

Le signal obtenu devrait être de tension continue égale à 15. Cependant l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur commandé par la source de tension  $V_{com}$  engendre des perturbations de hautes fréquences au niveau de ce signal comme illustré par les zooms. Ces oscillations amènent une différence de potentiel  $dV/dt$  de plus de 5 volts. Ainsi les perturbations dues à l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur se propagent au niveau de la charge. Cela peut être remarqué sur les figures III.11 et III.12, où les perturbations hautes fréquences apparaissent lors des variations rapides au niveau du signal temporel.

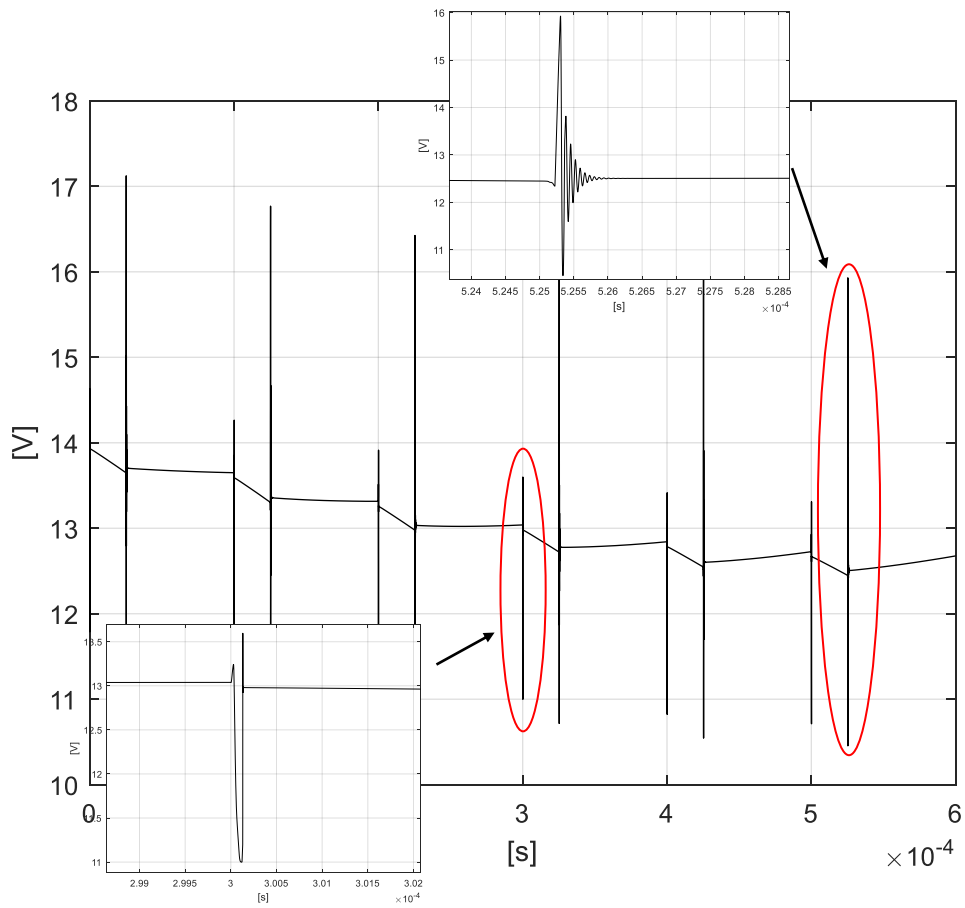


Figure III-10: Tension au niveau de la charge

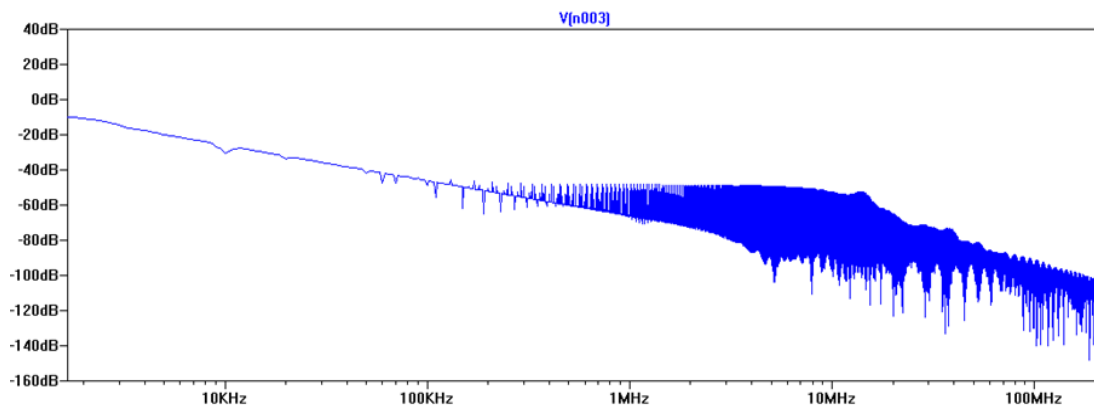
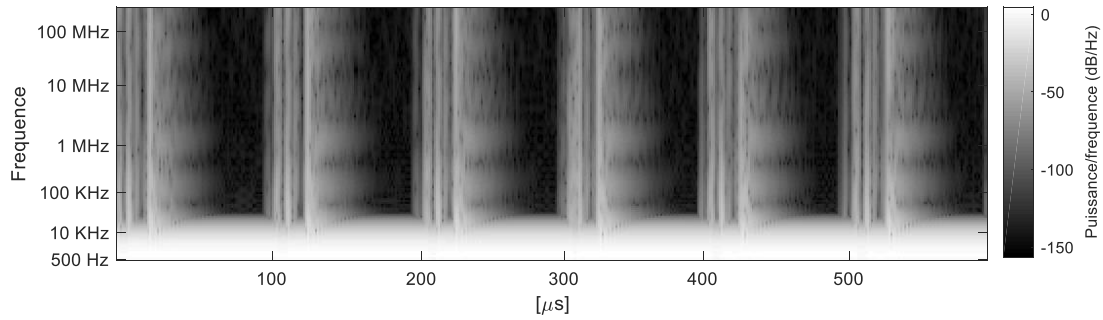


Figure III-11 : TF au niveau de la charge



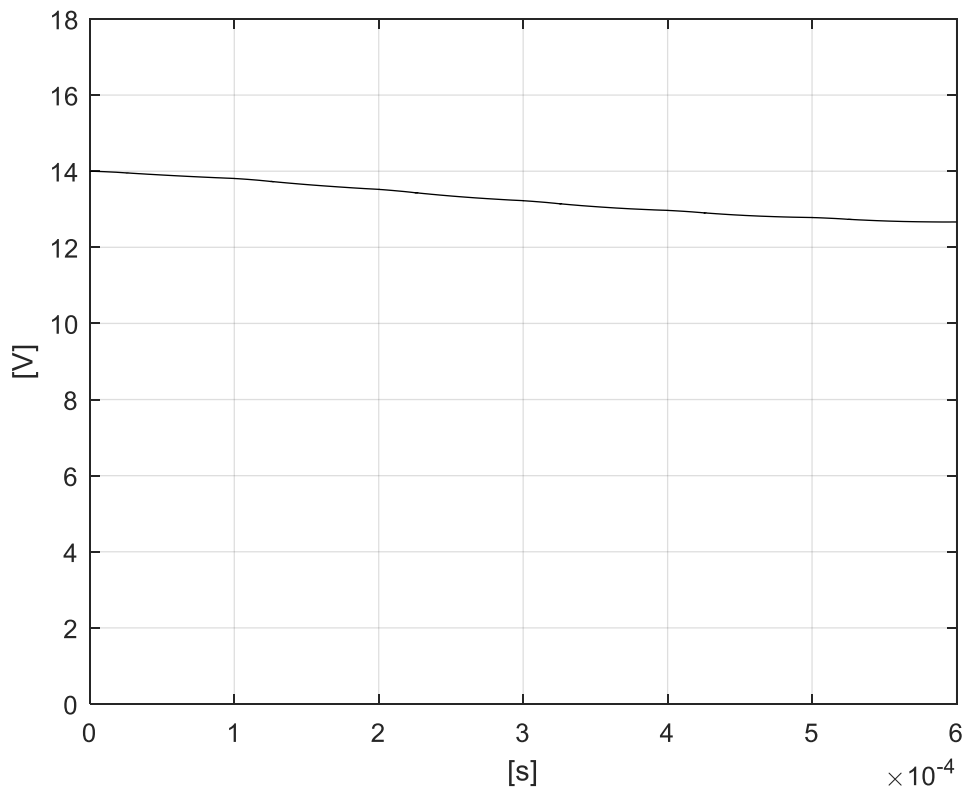
**Figure III-12** : TFCT au niveau de la charge

### III.2.5 Analyse de la tension par TF et TFCT au niveau du RSIL

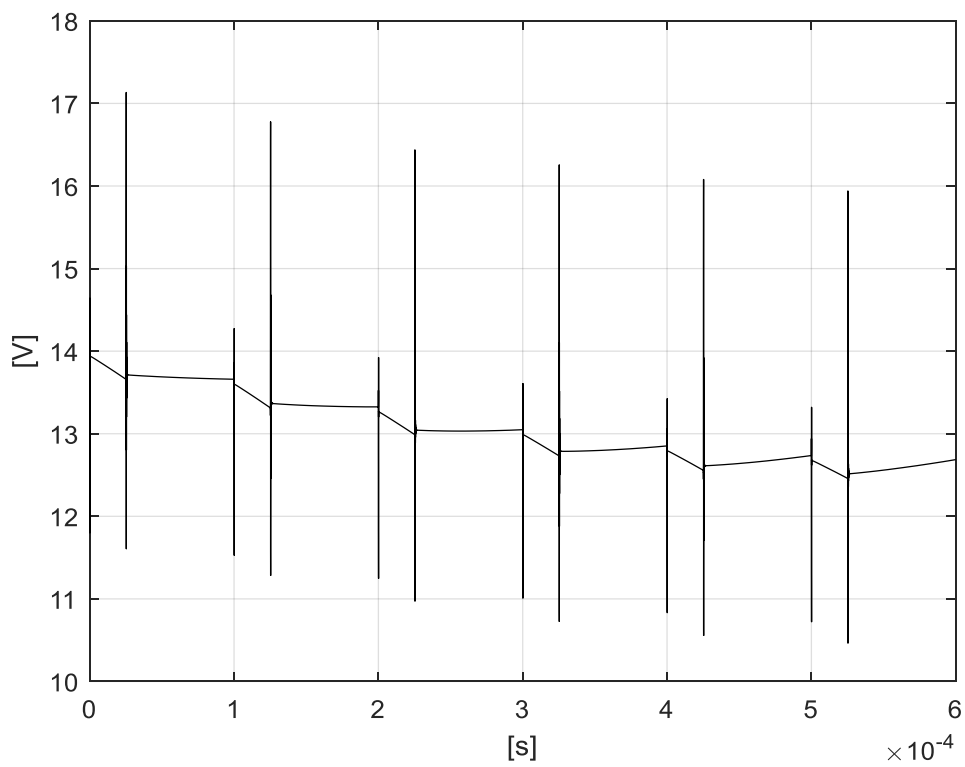
La figure III.13 et III.14 représentent respectivement les tensions à l'entrée et à la sortie du RSIL (point test 03).

A l'entrée du RSIL la tension est stable avec une faible chute de tension. Par contre à la sortie du RSIL l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur commandé par la source de tension  $V_{com}$  engendre des perturbations de hautes fréquences au niveau de ce signal comme illustré par les zooms. Ces oscillations amènent une différence de potentiel  $dV/dt$  de plus de 5 volts. Ainsi les perturbations dues à l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur se propagent à travers la ligne de transmission et sont stoppées par le RSIL ce qui permet de protéger la source  $V_1$  de ces perturbations.





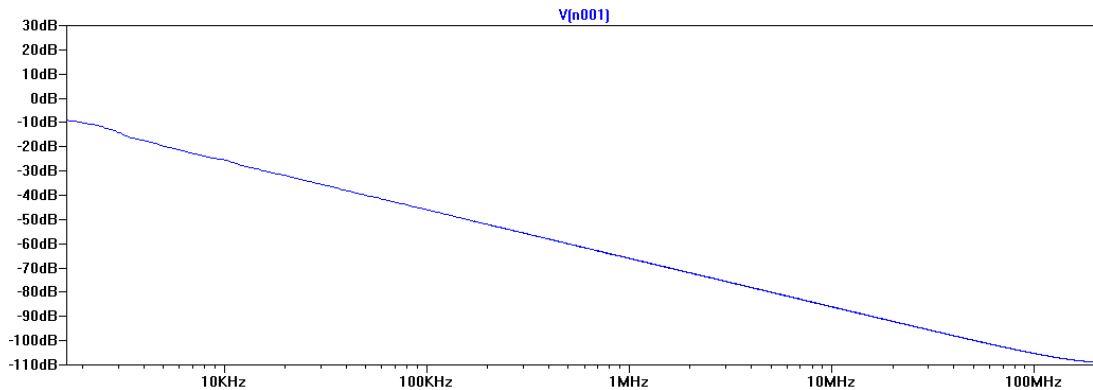
**Figure III-13** : Tension à l'entrée du RSIL



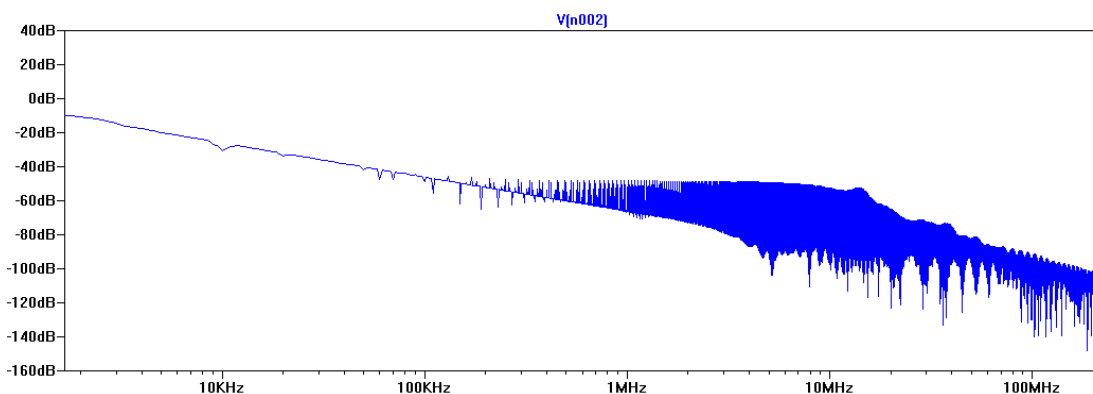
**Figure III-14** : Tension à la sortie du RSIL

La figure III.16 et III.16 représentent respectivement la TF à l'entrée et à la sortie du RSIL.

A l'entrée du RSIL comme la tension est stable avec une faible chute de tension et que la source de tension  $V_1$  est protégée, la TF décroît de 20 dB/décade. A la sortie du RSIL les perturbations hautes fréquences à partir de 200 KHz, dues à l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur sont nettement visibles.



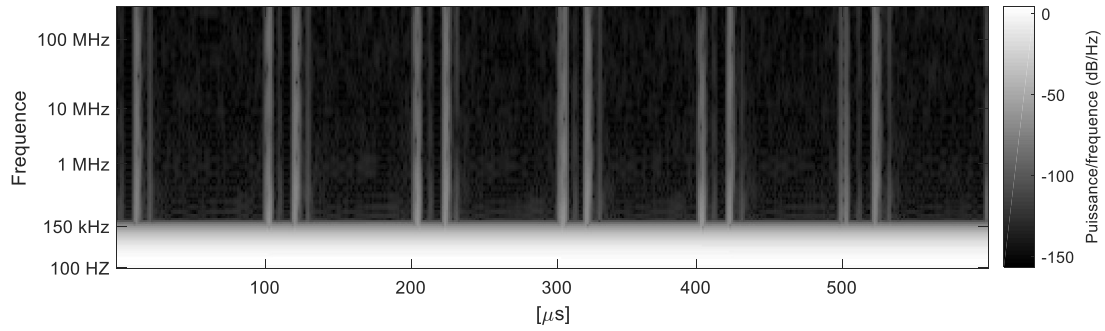
**Figure III-15** : TF à l'entrée du RSIL



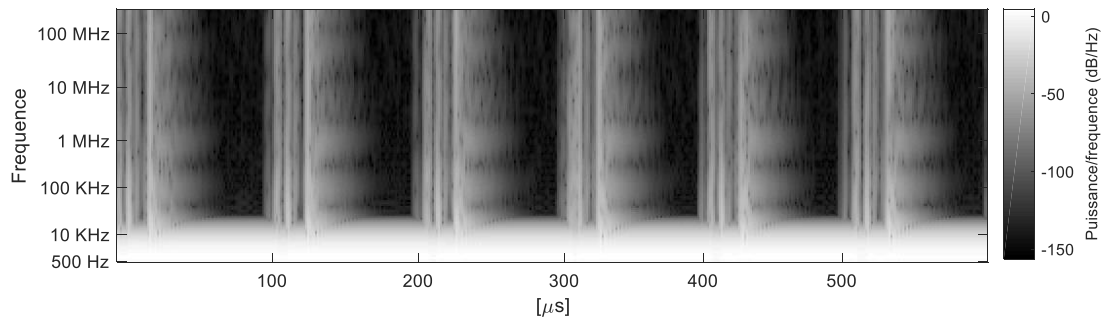
**Figure III-16** : TF à la sortie du RSIL

La figure III.17 et III.18 représentent respectivement la TFCT à l'entrée et à la sortie du RSIL.

A l'entrée du RSIL comme la tension est stable avec une faible chute de tension et que la source de tension  $V_1$  est protégée, les très fréquences de basses tensions ont des puissances très élevées pendant toute la durée du signal. Au niveau des temps d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur il apparaît des raies mais de très faibles puissances suite à la protection fournie par le RSIL. Or, à la sortie du RSIL c'est raies apparaissent avec une puissance bien plus élevées suite aux perturbations engendrées par l'interrupteur.



**Figure III-17** : TFCT à la sortie du RSIL



**Figure III-18** : TFCT à la sortie du RSIL

## II.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons analysé la tension et le courant à différents points tests d'un convertisseur statique de type hacheur Buck. Les limites de TF pour l'analyse spectrale d'un signal ont été partiellement comblées par l'utilisation de la TFCT. Ainsi les moments d'apparition des perturbations dues à l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur ont été détectés. L'utilité du RSIL a été mise en évidence en fin de chapitre.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce mémoire de fin d'études, nous nous sommes focalisé sur l'étude temporelle, spectrale par l'analyse de Fourier et spectro-temporelle par la transformée de fourier à court termes d'un convertisseur statique Dc/DC de type hacheur abaisseur (Buck).

L'étude a été réalisé sur un hacheur relia à une source de tension via un Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne et une ligne de transmission le tout connecté à une charge.

Nous avons ainsi analysé la tension et le courant à différents points tests du convertisseur statique de. Les limites de TF pour l'analyse spectrale d'un signal ont été partiellement comblées par l'utilisation de la TFCT. Ainsi les moments d'apparition des perturbations dues à l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur ont été détectés.

Nous avons illustré l'utilité du Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne à protéger la source de tension du circuit des perturbations électromagnétiques engendrées par l'ouverture et la fermeture de l'interrupteur à base de MOSFET employé au niveau du hacheur série.

Ce circuit électronique a été modélisée sous le logiciel LTSPICE et l'analyse spectro-temporelle a été réalisée sous l'environnement Matlab.

## Bibliographie et Webographie

- [1] H.W. Ott, 'Electromagnetic Compatibility Engineering', Wiley, 2009.
- [2] F. Vaillant et J. Delaballe, 'La CEM: la Compatibilité Electromagnétique', Cahier Technique N°149, Groupe Schneider, 1998.
- [3] Samuel AKUE BOULINGUI, 'Etude du couplage électromagnétique entre circuits intégrés par émulation du perturbateur - Application en téléphonie 3G', thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2009.
- [4] Mohamed Melit, 'Etude des perturbations dans les convertisseurs de l'électronique de puissance', thèse de doctorat, Université de Jijel, 2008.
- [5] Stéphane Bréhaut. 'Modélisation et optimisation des performances CEM d'un convertisseur AC/DC d'une puissance de 600 W. Energie électrique'. Université François Rabelais, 2005.
- [6] Abdallah Darkawi. 'Cours d'initiation à la Compatibilité Électromagnétique (CEM)'. École d'ingénieur.de l'université de Nantes, 2018.
- [7] Zbigniew Hanzelka and Andrzej Bien, « Guide Power Quality, Section 3: Harmoniques », AGH University of Science and Technology. Leonardo Energy, Edition Août 2007.
- [8] Guide technique, «Les Perturbations Electromagnétiques basse et haute fréquence», Intersections, le magazine Schneider Electric de l'enseignement technologique et professionnel, Juin 2000.
- [9] Alain Charoy « Compatibilité Électromagnétique » 2ieme édition DUNOD, paris, 2005.
- [10] L. Jean Luc, « Cours de CEM : Les couplages électromagnétiques ». mai-2012.
- [11] NF EN 61000-4-2 - Compatibilité électromagnétique. Partie 4 : techniques d'essais et de mesure. Section 2 : essais d'immunité aux décharges électrostatiques. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1995, pp. 1-35.
- [12] NF EN 50082-1 - Compatibilité électromagnétique. Norme générique immunité Partie 1 : Environnement résidentiel, commercial et industrie légère. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1995, pp. 1-16

- [13] NF EN 50082-2 - Compatibilité électromagnétique. Norme générique immunité. Partie 2 : Environnement industriel. Paris - La Défense, AFNOR, juin 1995, pp. 1-16.
- [14] NF EN 55104. Compatibilité électromagnétique - exigences d'immunité pour les appareils électrodomestiques, outils électriques et appareils analogues - Norme de famille de produits. Paris-La Défense, AFNOR, sept. 95, pp. 1-18
- [15] Zemouri Azeddine, ' Etude expérimentale d'un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande robuste', thèse de doctorat, Université de Batna, 2014.
- [16] OMBAUT, Christian, Guy SEGUIER et Robert BAUSIERE. 'Electronique de puissance structure, fonctions de base, principales applications', Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Paris, Dunod, 2004, 409
- [17] Michel Garnero, 'La Conversion DC/DC : Les Hacheurs'.
- [18] AGATI, Pierre, et autre. Aide-mémoire électricité, électronique de commande et de puissance, électrotechnique'. Paris, Dunod, 2006, 448p.
- [19] Florent HOLST, 'CH10 : Les hacheurs', BTS électrotechnique 2ème année - Sciences physiques appliquées, Lycée Edmond Labbé de Douai.
- [20] Ourabi.Lassaad, 'Les convertisseurs continu/continu : les hacheurs', support de cours en électronique de puissance, I.S.E.T de Bizerte, 2017.
- [21] A. Rufér, P. Barrade, 'Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC', Ecole fédérale de Lausanne, octobre 2001,
- [22] M. MOULFI et O. BEKADA BEN CHAIB « Impact CEM des liaisons d'interconnexions dans un système électrique de 100W à base d'une RSIL et un convertisseur dc/dc de type BUCK » ,2019