

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

**Thème**

**Simulation et analyse des perturbations électromagnétiques  
conduites dans un système photovoltaïque intégré au réseau  
électrique.**

Devant le jury composé de :

Président	GUERFI Youcef	MAA
Examineur	LARGOT Soulef	MAA
Encadreur	BEGGAT Feteh	MAB

Présenté par :

- Kaddour Abdelfatah  
- Touati Oussama  
- Dogga Abde Rrazzak

2019-2020

# ***Remerciements***

*Nous remercions tout d'abord Allah tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur Beggat Feteh pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.*

*Nous remercions les membres de jury d'examen pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nous remercions aussi à tous les enseignants du département genie mecanique qui a contribué à notre formation.*

*Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien tout moral et matériel...*

# *Dédicaces*

*Nous dédions ce travail à nos chers parents, qui ont été pour nous une force, À nos mères qui sont restées éveillées pour nous, Et nos père qui nous ont aidés à atteindre ce stade À tous nos frères, sœurs et amis qui ont été pour nous un soutien et une source de joie et de bonheur et à tous ceux qui nous ont accompagnés dans notre vie académique.*

*A tous nos professeurs , en particulier notre encadreure, M. Baggat Fateh, qui nous suivait à chaque mouments.*

# **Table des matières**

## Table des matières

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I: État de l'art sur les systèmes PV et la compatibilité électromagnétique (CEM).</b>	
I-1-Introduction.....	3
I-2-Généralité des systèmes photovoltaïque.....	3
I-2-1 Système photovoltaïque autonome.....	3
I-2-2 Système photovoltaïque hybride autonome.....	4
I-2-3 Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	4
I-3 Description d'un système PV connectée au réseau.....	5
I-3-1 L'effet photovoltaïque.....	5
I-3-2 Description de la cellule.....	5
I-3-3 Type de cellules.....	5
I-3-3-1 Les cellules mono-cristallines.....	5
I-3-3-2 Les cellules poly-cristallines.....	6
I-3-3-3 Les cellules amorphes.....	6
I-3-3-4 Les cellules nanocristallines.....	6
I-3-4 Jonction PN.....	6
I-3-5 Structures d'un système PV connectées au réseau électrique.....	7
I-3-5-1 Structure PV connectée directement au réseau.....	7
I-3-5-2 Structure PV a bus continu en intermédiaire.....	8
I-4 Notion de Compatibilité Electromagnétique (CEM).....	10
I-4-1 Décomposition d'un problème de CEM.....	11
I-4-2 Perturbations électromagnétiques.....	11
I-4-3 Le couplage électromagnétique.....	12
I-4-3-1 Le couplage par conduction.....	12
I-4-3-2 Le couplage par rayonnement (par champ) .....	13
I-5 Etat de l'art de CEM dans systèmes PV.....	13
I-6 Conclusion.....	14

## **Chapitre II: Perturbations électromagnétiques (PEM) générées par les systèmes PV.**

II-1 Introduction : .....	15
II-2 PEM dans les systèmes PV .....	15
II-3 Propagation du PEM .....	17
II-4 Normes de PEM dans le système PV .....	18
II-5 Mesure de PEM par le Réseau Stabilisé d'Impédance de ligne normatif (RSIL) .....	20
II-5-1 Fonctionnement du RSIL .....	21
II-5-2 Analyse du RSIL vis-à-vis de la mesure .....	23
II-5-2-1 Le courant de mode commun .....	24
II-5-2-2 Le courant de mode différentiel .....	25
II-6 Conclusion .....	25

## **Chapitre III: Etude et Modélisation CEM des systèmes PV.**

III-1 Introduction: .....	26
III-2 Objectifs de la modélisation CEM .....	26
III-3 Etat de l'art de modélisation CEM .....	26
III-4 Modélisation des sources de PEM .....	27
III-4-1 Modélisation basée sur les dispositifs .....	27
III-4-2 Modélisation basée sur la mesure .....	29
III-5 Modélisation du chemin de propagation du PEM .....	31
III-5-1 Modèles théoriques .....	31
III-5-2 Modèles expérimentaux .....	32
III-6 Modélisation des chemins de propagation du système PV .....	33
III-6-1 Modélisation du panneau PV .....	33
III-6-2 Modélisation du câble DC .....	35
III-6-3 Modélisation des composants passifs .....	36
III-6-4 Modélisation des sources de perturbation du système PV .....	36
III-7 Conclusion .....	37

## **Chapitre IV: Simulation, Résultat et discussions.**

IV-1 Introduction.....	38
IV-2 Simulation dans domaine fréquentiel du panneau solaire.....	38
IV-3 Simulation dans le domaine fréquentiel de câble (DC).....	41
IV-4 Simulation dans le domaine fréquentiel de RSIL CISPR 22.....	42
IV-5 Simulation dans le domaine fréquentiel de hacheur.....	43
IV-6 Simulation dans le domaine fréquentiel d'onduleur.....	45
IV-7 Reproduction du spectre (source de perturbations) aux bornes du hacheur.....	46
IV-8 Reproduction du spectre (source de perturbations) aux bornes de l'onduleur.....	52
IV-9 Reproduction du spectre « perturbateur » aux bornes du Rsil d'association du panneau solaire hacheur - onduleur et du réseau.....	57
IV-9-1 Influence des stratégies de la commande sur les PEM.....	63
IV-10 Conclusion.....	73

### **Conclusion générale**

Conclusion générale.....	74
--------------------------	----

### **Annexes**

Annexes... ..	76
---------------	----

### **Bibliographiques**

Bibliographiques.....	77
-----------------------	----

### **Résumé**

Résumé.....	82
-------------	----

# Liste des figures

<b>Liste des figures</b>	<b>N<sup>0</sup></b>
<b>Chapitre I : État de l'art sur les systèmes PV et la compatibilité électromagnétique(CEM).</b>	
<b>Figure (I.1):</b> Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome.	<b>03</b>
<b>Figure (I.2) :</b> Schéma synoptique d'un système photovoltaïque hybride.	<b>04</b>
<b>Figure (I.3):</b> Schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau.	<b>04</b>
<b>Figure (I.4):</b> Cellule au Silicium Monocristallin.	<b>05</b>
<b>Figure (I.5):</b> Cellule au Silicium Poly-cristallin.	<b>06</b>
<b>Figure (I.6):</b> Cellule au Silicium amorphe (couche mince).	<b>06</b>
<b>Figure (I.7):</b> Cellule au Silicium nanocristallin.	<b>06</b>
<b>Figure (I.8):</b> Coupe transversale d'une cellule PV typique.	<b>07</b>
<b>Figure (I.9):</b> Schéma synoptique de la structure à convertisseur unique.	<b>08</b>
<b>Figure (I.10):</b> Schéma de la structure avec hacheur et onduleur.	<b>08</b>
<b>Figure (I.11):</b> Schéma de la structure avec un convertisseur de type fly-back.	<b>09</b>
<b>Figure (I.12):</b> Schéma de la structure avec convertisseur forward.	<b>10</b>
<b>Figure (I.13):</b> Environnement Electromagnétique.	<b>10</b>
<b>Figure (I.14):</b> Décomposition d'un problème de CEM.	<b>11</b>
<b>Figure (I.15):</b> Les modes de couplage entre la source de perturbation et la victime.	<b>12</b>
<b>Figure (I.16):</b> Le mode commun entre deux systèmes.	<b>12</b>
<b>Figure (I.17):</b> Le mode différentiel entre deux systèmes.	<b>13</b>
<b>Chapitre II: Perturbations électromagnétiques (PEM) génères par les systèmes PV.</b>	
<b>Figure (II.1):</b> Schéma simplifiée des PEM du côté entrée d'un système PV.	<b>16</b>
<b>Figure (II.2):</b> Forme d'onde trapézoïdale dissymétrique.	<b>16</b>
<b>Figure (II.3):</b> Contenu spectral des formes d'ondes en électronique de puissance.	<b>17</b>
<b>Figure (II.4):</b> Système de mesure PEM	<b>19</b>

<b>Figure (II.5):</b> Limites admissibles d'émissions conduites selon CISPR 22.	<b>20</b>
<b>Figure (II.6):</b> Topologie générale d'un RSIL.	<b>21</b>
<b>Figure (II.7):</b> Schéma simple du RSIL en BF.	<b>22</b>
<b>Figure (II.8):</b> Schéma du RSIL en HF.	<b>22</b>
<b>Figure (II.9):</b> RSIL CISPR22 vis à vis des perturbations MD et MC.	<b>23</b>
<b>Figure (II.10):</b> RSIL vis à vis du mode commun.	<b>24</b>
<b>Figure (II.11):</b> RSIL vis à vis de mode différentiel.	<b>25</b>
<b>Chapitre III: Etude et Modélisation CEM des systèmes PV.</b>	
<b>Figure (III.1) :</b> Modèles basés sur la mesure (a) MC et (b) MD.	<b>30</b>
<b>Figure (III.2) :</b> Modèle dynamique équivalent PV.	<b>33</b>
<b>Figure (III.3) :</b> Module PV - modèle de circuit équivalent.	<b>35</b>
<b>Figure (III.4) :</b> Cellule élémentaire d'un modèle ligne de transmission.	<b>36</b>
<b>Chapitre IV: Simulation, Résultat et discussions</b>	
<b>Figure (IV.1):</b> Schéma bloc simulé d'un panneau solaire dans l'environnement LTspice.	<b>38</b>
<b>Figure (IV.2) :</b> Résultats de simulation des caractéristiques I-V selon l'éclairement.	<b>39</b>
<b>Figure (IV.3) :</b> Résultats de simulation des caractéristiques P-V selon l'éclairement.	<b>39</b>
<b>Figure (IV.4) :</b> Résultats de simulation des caractéristiques I-V selon un intensité rayonnante de 1000W/m <sup>2</sup> et une température 25°C.	<b>40</b>
<b>Figure (IV.5) :</b> Résultats de simulation des caractéristiques P-V selon un intensité rayonnante de 1000W/m <sup>2</sup> et une température 25°C.	<b>41</b>
<b>Figure(IV.6):</b> Schéma de circuit équivalent simulé de câble (DC) dans l'environnement LTspice.	<b>41</b>
<b>Figure(IV.7) :</b> Impédances simulés du câble DC.	<b>42</b>

<b>Figure(IV.8):</b> Schéma de circuit équivalent simulé de RSIL CISPR 22 dans l'environnement LTspice.	<b>42</b>
<b>Figure(IV.9) :</b> Impédance de mode commun du CISPR 22 monophasé.	<b>43</b>
<b>Figure(IV.10) :</b> Schéma de circuit équivalent simulé du hacheur dans l'environnement LTspice.	<b>43</b>
<b>Figure (IV.11) :</b> Résultats de simulation de courant sortant hacheur.	<b>44</b>
<b>Figure (IV.12) :</b> Représentation spectrale des perturbations de courant sortant de hacheur.	<b>44</b>
<b>Figure(IV.13) :</b> Schéma de circuit équivalent simulé d'onduleur dans l'environnement LTspice.	<b>45</b>
<b>Figure (IV.14) :</b> Résultats de simulation de tension sortant d'onduleur.	<b>45</b>
<b>Figure (IV.15) :</b> Résultats de simulation de courant sortant d'onduleur.	<b>46</b>
<b>Figure (IV.16) :</b> Schéma électrique simulé d'un hacheur série alimenté par une source continue à travers un RSIL.	<b>46</b>
<b>Figure (IV.17):</b> Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>47</b>
<b>Figure (IV.18):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un hacheur.	<b>47</b>
<b>Figure (IV.19):</b> Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>48</b>
<b>Figure (IV.20):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un hacheur.	<b>48</b>
<b>Figure (IV.21):</b> Résultats de simulation de tension MC sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL	<b>49</b>
<b>Figure (IV.22):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un hacheur.	<b>50</b>
<b>Figure (IV.23):</b> Résultats de simulation de tension MD sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>50</b>
<b>Figure (IV.24):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un hacheur.	<b>51</b>

<b>Figure (IV.25):</b> Schéma électrique simulé d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>52</b>
<b>Figure (IV.26):</b> Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>52</b>
<b>Figure (IV.27):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'onduleur.	<b>53</b>
<b>Figure (IV.28):</b> Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>53</b>
<b>Figure (IV.29):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'onduleur.	<b>54</b>
<b>Figure (IV.30):</b> Résultats de simulation de tension MC sortant d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.	<b>55</b>
<b>Figure (IV.31):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un onduleur.	<b>55</b>
<b>Figure (IV.32):</b> Résultats de simulation de tension MD sortant d'un onduleur alimenté par une source continue à travers un RSIL.	<b>56</b>
<b>Figure (IV.33):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un onduleur.	<b>56</b>
<b>Figure (IV.34):</b> Schéma électrique simulé d'association du panneau solaire – RSIL hacheur – onduleur et du réseau.	<b>57</b>
<b>Figure (IV.35):</b> Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire.	<b>58</b>
<b>Figure (IV.36):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire.	<b>58</b>
<b>Figure (IV.37):</b> Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire.	<b>59</b>
<b>Figure (IV.38):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire.	<b>59</b>
<b>Figure (IV.39):</b> Résultats de simulation de tension MC sortant d'un panneau solaire.	<b>60</b>
<b>Figure (IV.40):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant	<b>61</b>

d'un panneau solaire.	
<b>Figure (IV.41):</b> Résultats de simulation de tension MD sortant d'un panneau solaire.	<b>61</b>
<b>Figure (IV.42):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un panneau solaire.	<b>62</b>
<b>Figure (IV.43):</b> Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 2T.	<b>63</b>
<b>Figure (IV.44):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 2T.	<b>63</b>
<b>Figure (IV.45):</b> Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 2T.	<b>64</b>
<b>Figure (IV.46):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 2T.	<b>64</b>
<b>Figure (IV.47):</b> Résultats de simulation de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.	<b>65</b>
<b>Figure (IV.48):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.	<b>66</b>
<b>Figure (IV.49):</b> Résultats de simulation de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.	<b>66</b>
<b>Figure (IV.50):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.	<b>67</b>
<b>Figure (IV.51):</b> Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.	<b>68</b>
<b>Figure (IV.52):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.	<b>68</b>
<b>Figure (IV.53):</b> Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.	<b>69</b>
<b>Figure (IV.54):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.	<b>69</b>
<b>Figure (IV.55):</b> Résultats de simulation de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.	<b>70</b>

<b>Figure (IV.56):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.	<b>71</b>
<b>Figure (IV.57):</b> Résultats de simulation de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.	<b>71</b>
<b>Figure (IV.58):</b> Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.	<b>72</b>

# **Liste des nomenclatures**

## LISTE DES NOMENCLATURES

CEM : la compatibilité électromagnétique.

PV : photovoltaïque.

DC: Le courant continu.

AC :Le courant alternatif.

(AsGa) : Arséniure de Gallium.

(CdTe) : Tellure de Cadmium.

(Si) : silicium cristallin.

( $I_{MC}$ ) : courant mode commun.

( $V_{MC}$ ) : tension mode commun.

( $I_{MD}$ ) : courant mode différentiel.

( $V_{MD}$ ) : tension mode différentiel.

( $I_{cell}$ ) : courant de cellule.

( $V_{cell}$ ) : tension de cellule.

(CISPR) : Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.

(PEM) : les perturbations électromagnétiques.

(MOSFET) : Le transistor à effet de champ métal-oxyde-semi-conducteur.

(IGBT) : Insulated Gate Bipolar Transistor.

( $dV/dt$  ,  $dI/dt$ ) : la variation très rapides des tensions et courants au sein des composants en commutation.

(FCC) : Federal Communications Commission.

(BS) : British Standards.

(VDE) : Verband Deutscher Elektrotechniker.

(VCCI) : Voluntary Control Council pour les interférences.

(RSIL) : Réseau Stabilisé d'Impédance de ligne normatif.

(EST) : l'équipement sous test.

(BNC) : Le connecteur (Bayonet Neill–Concelman connector).

( $f_{\text{reseau}}$ ) : La fréquence du réseau.

( $f_{\text{perturbation}}$ ) : La fréquence de la perturbation.

(BF) : Basse fréquence

(HF) : Haute fréquence

( $I_p$ ) : les courants de phase.

( $I_N$ ) : les courants de neutre.

( $V_p$ ) : la tension entre phase et la terre.

( $V_N$ ) : la tension entre neutre et la terre.

(VCE) : La tension Collecteur(C),Emetteur(E).

(R) : Résistance.

(L) : inductance.

(C) : capacité.

(G) : conductance.

(dx) : la variation de longueur de câble.

( $C_{pf}$  ;  $C_{mf}$ ) : deux capacités parasites entre bus DC positif et négatif et châssis mis à la terre.

( $C_{pm}$  ;  $R_{pm}$ ) : d'une capacité parasite, résistance de fuite entre bornes de bus positives et négatives.

( $R_{s1}$  ;  $R_{s2}$ ) : deux résistances d'alimentation de panneau de bus DC positives.

( $I_{ph}$ ) : photocourant.

$(D_f)$  : d'une diode de conduction de polarisation directe.

$(D_r)$  : d'une diode de conduction de polarisation inverse.

$(C_p)$  : d'une capacité parallèle variable.

$(V_{bd})$  : tension de claquage (valeur négative).

$(R_{sh})$  : résistance de shunt.

$(R_s)$  : résistance série.

$(L_s)$  : inductance série.

$(I_{scn})$  : le courant nominal de court-circuit.

$(K_i)$  : le coefficient de température actuel.

$(T_n)$  : la température nominale

$(G_n)$  : l'irradiance nominale.

$(I_{df})$  : Le courant de la diode directe.

$(V_d)$  : tension de diode.

$(V_t)$  : la tension thermique.

$(V_{ocn})$  : la tension nominale en circuit ouvert.

$(K_v)$  : le coefficient de température.

$(k)$  : est la constante de Boltzmann.

$(q)$  : est la charge électronique.

$(N_s)$  : le nombre de cellules en série.

$(V_{pv})$  : la tension de panneau.

$(I_{pv})$  : le courant de panneau.

$(Z)$  : L'impédance du panneau.

$(R_p)$  : Résistance parallèle.

$(j)$  : Un nombre imaginaire.

$(\alpha)$  : Angle d'amorçage.

$(\omega)$  : Amplitude.

(TDR) : Réflectométrie dans le Domaine Temporel.

(DUT) : dispositif sous test.

(PEEC) : Partial Element Equivalent Circuit.

(FEM) : la méthode des éléments finis.

$(V_{X,MC} , V_{X,MD})$  : les tensions de PEM en MC et MD respectives au niveau des appareils.

$(Z_{x,MC} , Z_{x,MD})$  : les impédances MC et MD d'appareils.

$(V_{mesng})$  : tension entre neutre et la masse de terre.

$(V_{mespg})$  : tension entre phase et la masse de terre.

# **Introduction général**

## Introduction générale

L'énergie solaire photovoltaïque se développe très rapidement. Il est durable, propre et exempt de pollution environnementale. Il est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, l'automatisation et d'autres domaines.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue à travers une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour fabriquer la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série / parallèle aboutit à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. [54].

d'énergie alternative ces dernières années et devraient continuer à augmenter à l'avenir . Compte tenu des besoins énergétiques croissants et des préoccupations environnementales, le PV a été considéré comme une importante source d'énergie verte. Cependant, en termes de qualité de l'énergie, les systèmes photovoltaïques doivent résoudre certains problèmes techniques, tels que l'intermittence de l'alimentation, le faible rendement de conversion et la compatibilité électromagnétique (CEM). L'objectif de ce travail de recherche est la CEM, qui devient de plus en plus préoccupante ces dernières années depuis les interférences électromagnétiques des systèmes PV deviennent de plus en plus évidentes ... Les interférences électromagnétiques (PEM) deviennent un défi technique majeur dans les systèmes photovoltaïques (PV). Le (PEM) sont des perturbations électromagnétiques qui entravent le fonctionnement normal et dégradent les performances des équipements électroniques ou électriques .

Les interférences électromagnétiques peuvent induire une tension et un courant indésirables dans des appareils non prévus et provoquer des effets néfastes allant de la simple perturbation à la catastrophe. Alors que les problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM), les émissions et la sensibilité sont pertinents dans les systèmes PV, le premier est plus

préoccupant en raison de la capacité inhérente de ces systèmes à générer du bruit et à le transmettre à d'autres appareils. Comme l'utilisation des systèmes photovoltaïques augmente rapidement, les (PEM) de ces systèmes doivent être correctement traitées . [15]

Ce mémoire est partagé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous allons présenter en premier lieu, définir l'effet photovoltaïque puis une description de la cellule ensuite nous présenterons les différents types des cellules par rapport à leur structure physique suivie d'une explication du phénomène qui se passe dans la jonction PN. En second lieu, nous allons évoquer les problèmes de la compatibilité électromagnétique(CEM) et son analyse et le type de couplage électromagnétique.

Dans le deuxième chapitre, nous allons introduire les perturbations électromagnétiques (PEM) deviennent un défi technique majeur systèmes photovoltaïques (PV). PEM qui entrave le normal fonctionnement et dégrade les performances des équipements électroniques ou électriques. où l'on étudie la méthode de propagation des perturbations électromagnétiques en mentionnant les critères de ces dernières et comment mesurer ces perturbations.

Dans le troisième chapitre nous allons, la modélisation CEM de l'ensemble d'un système PV connecté en réseau. La première partie est dédiée à l'état de l'art de méthodes de modélisation CEM des sources de PEM et méthodes de la modélisation du chemin de propagation du PEM.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présentons la modélisation des chemins de propagation PEM du système PV, il se compose de panneaux solaires, de câble DC et d'éléments semi-conducteurs et des composants passifs.

Dans le quatrième chapitre, nous allons simuler un système PV connecté au réseau sous certaines conditions. Cette simulation est basée sur un logiciel d'analyse des circuits électrique (Ltpice). Cette simulation nous a permis de mesurer la valeur des perturbations électromagnétiques (PEM, MD,MC) et l'étendue de leur propagation dans le système, et cela a

## Introduction générale

---

été fait à l'aide d'un Appareil de mesure du perturbation (Rsil) .Grâce à cette simulation, les sources de perturbations électromagnétiques sont connues.

**Chapitre I : État de l'art sur les  
systèmes PV et la compatibilité  
électromagnétique(CEM).**

## I-1-Introduction

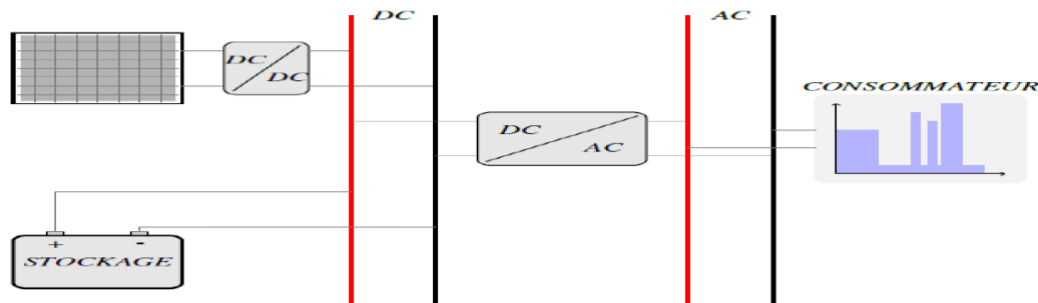
Dans ce chapitre, nous allons introduire, en premier lieu, définir l'effet photovoltaïque puis une description de la cellule ensuite nous présenterons les différents types des cellules par rapport à leur structure physique suivie d'une explication du phénomène qui se passe dans la jonction PN. En second lieu, nous allons évoquer les problèmes de la compatibilité électromagnétique (CEM). En fin de chapitre, nous présentons l'état de l'art de CEM dans les systèmes photovoltaïques.

## I-2-Généralité des systèmes photovoltaïques

En générale, un système photovoltaïque comporte un ensemble de sous-systèmes distincts en relation entre eux, représentant un processus énergétique complexe. A savoir la structure porteuse rigide des composants du champ PV, qui est fixe ou mobile, le câblage, boîte de jonction, les éléments de protection, la batterie en cas nécessitant un stockage d'énergie et son régulateur, des convertisseurs DC/DC (hacheurs) et des convertisseurs DC/AC (l'onduleur). Il existe plusieurs types de systèmes photovoltaïques.

### I-2-1-Système photovoltaïque autonome

Ce système fournit de l'électricité pour des régions non reliés au réseau. Il possède plusieurs domaines d'applications telles-que le pompage d'eau, les stations industrielles pour alimenter le système de protection, de surveillance et de comptage. Il est très utilisé dans les stations spatiales et les relais de communications. Ce système, produit l'énergie électrique qui est utilisée directement ou stockée dans des batteries [1], comme est indiqué sur la figure I.1.



**Figure (I.1) :** Schéma synoptique d'un système photovoltaïque autonome.

### I-2-2 Système photovoltaïque hybride autonome

Les systèmes hybrides sont composés d'un générateur photovoltaïque combiné à une ou plusieurs sources d'énergies renouvelables ou à un groupe électrogène, ou aux deux à la fois. Ces systèmes peuvent posséder des batteries qui peuvent aussi être rechargées par l'autre source en cas de décharge comme le montre la figure I.2. [2]

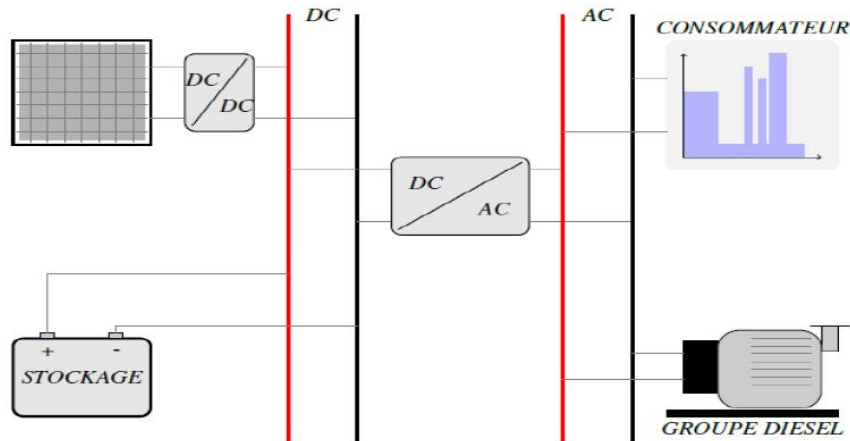


Figure (I.2) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque hybride.

### I-2-3 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Dans ce système l'ensemble de l'installation est connectée au réseau de distribution après une adaptation des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'utilisateur et le surplus est injecté sur le réseau, où bien injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite. Ces dernières centrales peuvent être conçues avec ou sans stockage. [3] comme est indiqué sur la figure I.3.

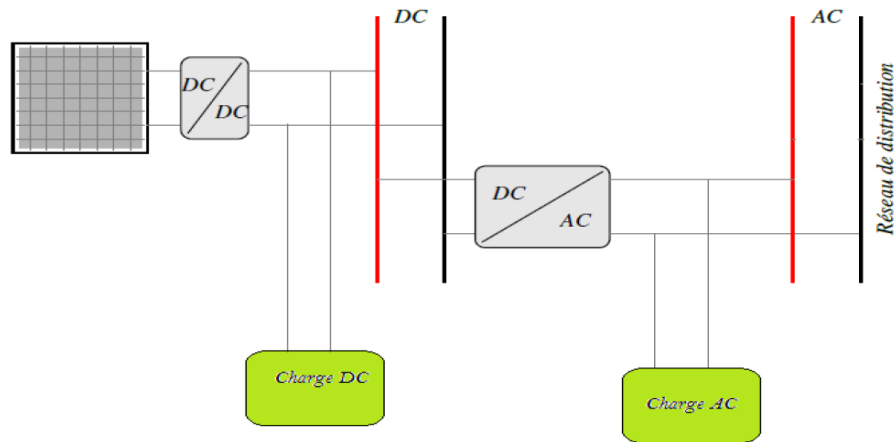


Figure (I.3) : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque relié au réseau.

### **I-3-Description d'un système PV connectée au réseau**

#### **I-3-1 L'effet photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques). Cet effet photovoltaïque a été découvert pour la première fois en 1839 par le physicien Alexandre Edmond Becquerel. Lorsque les "grains de lumière" (les photons) heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique qui est recueilli par des fils métalliques très fins. Ce courant peut être ajouté à celui provenant d'autres dispositifs semblables de façon à atteindre la puissance désirée pour un usage donné. [3]

#### **I-3-2 Description de la cellule**

C'est l'élément de base qui grâce à lui la conservation est faite par l'assemblage de plusieurs cellules, on peut atteindre la puissance que l'on veut.

Les photopiles ou cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs ayant des propriétés intermédiaires entre conducteurs et isolants.

Le matériau de base est dans la plupart des cas le silicium. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe). [4]

#### **I-3-3 Type de cellules**

Il existe différents types de cellules en fonction de la nature et des caractéristiques des matériaux utilisés. Le type le plus commun est la cellule de silicium cristallin (Si). Ce matériau est coupé en tranches minces en forme de disque, monocristallin, poly-cristallin, amorphe ou nanocristallin en fonction du procédé de fabrication de la barre de silicium. [5]

##### **I-3-3-1 Les cellules mono-cristallines**

-La première génération de photopiles.

-Un taux de rendement excellent (12-16%) (23% en Laboratoire).



**Figure (I.4) : Cellule au Silicium Monocristallin**

-Une méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.

-Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.



**Figure (I.5) :**

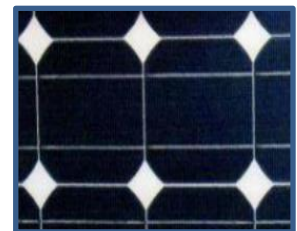
Cellule au Silicium  
Poly-cristallin

### I-3-3-2 Les cellules poly-cristallines

- Coût de production moins élevé.
- Procédé nécessitant moins d'énergie.
- Rendement 11-13% (18% en Labo).

### I-3-3-3 Les cellules amorphes

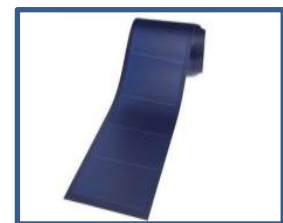
- ❖ Coût de production bien plus bas.
- ❖ Rendement plus bas : 8-10% (13% en labo).
- ❖ Durée de vie plus faible.



**Figure (I.6) :** Cellule au  
Silicium amorphe (couche  
mince)

### I-3-3-4 Les cellules nanocristallines

- ❖ Une des dernières générations de photopiles.
- ❖ Fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques.
- ❖ Rendement global de 10,4 %, confirmé par des mesures au laboratoire.
- ❖ Procédé et coût de production bas. [5]



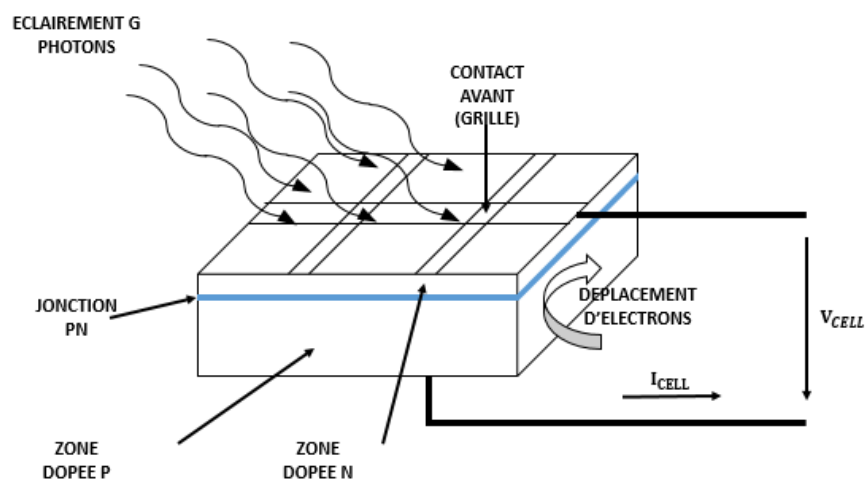
**Figure (I.7):** Cellule au  
Silicium nanocristallin

### I-3-4 Jonction PN

En polarisant électriquement une jonction PN et en la soumettant à un éclairage solaire, on obtient les caractéristiques semblables à celles d'une diode. Sans éclairage, le comportement d'une cellule photovoltaïque est semblable à celui d'une mauvaise diode. Ainsi, sous polarisation directe, la barrière de potentiel est abaissée et le courant de porteurs peut se développer. Sous polarisation inverse, seul un courant de porteurs minoritaires (courant de saturation) circule. Ce dernier varie peu avec la tension appliquée tant que cette tension est inférieure à la tension de claquage. Ces courants, directs ou inverses, comme pour des jonctions classiques, sont sensibles

à la température de jonction. Si cette jonction PN est soumise au rayonnement solaire, alors des paires électrons-trous supplémentaires sont créées dans le matériau en fonction du flux lumineux.

[5]



**Figure (I.8) :** Coupe transversale d'une cellule PV typique.

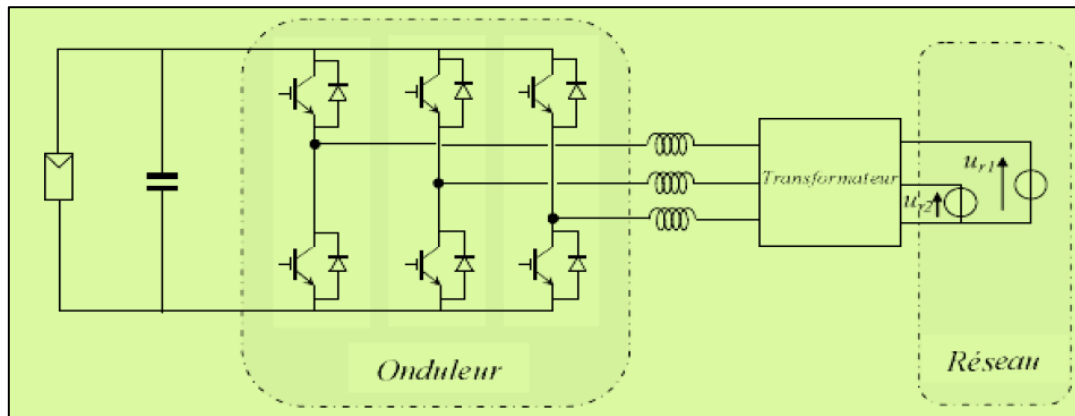
### **I-3-5 Structures d'un système PV connectées au réseau électrique:**

Il existe deux types de structures photovoltaïques connectées au réseau électrique.

#### **I-3-5-1 Structure PV connectée directement au réseau**

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. La figure I.9 montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connectée aux modules photovoltaïques. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré.

[6]



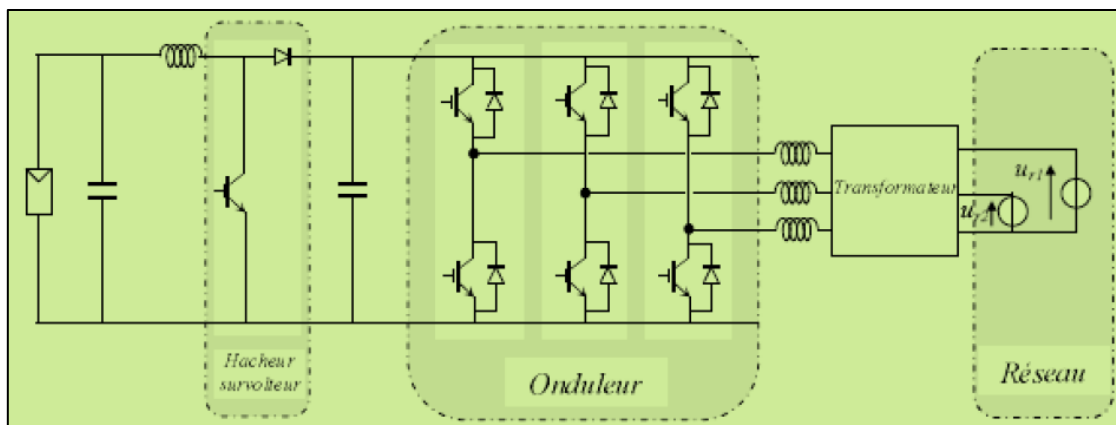
**Figure (I.9)** : Schéma synoptique de la structure à convertisseur unique.

### I-3-5-2 Structure PV a bus continu en intermédiaire

Ils existent plusieurs architectures de ce type :

#### ❖ Structure avec hacheur et onduleur

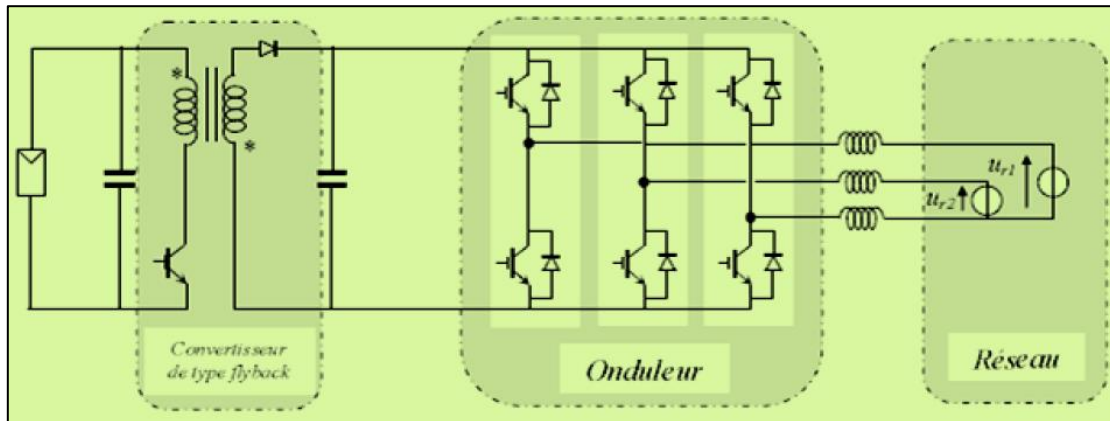
La figure I.10 représente un hacheur qui élève la tension en sortie de module PV et un onduleur pour la conversion de la tension direct en tension alternatif et un transformateur pour élever la tension à la tension désirée (tension du réseau) et pour s'assurer l'isolation entre la partie « production » et la partie « utilisation ». L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. [1]



**Figure (I.10)** : Schéma de la structure avec hacheur et onduleur.

❖ **Structure avec un convertisseur de type fly-back**

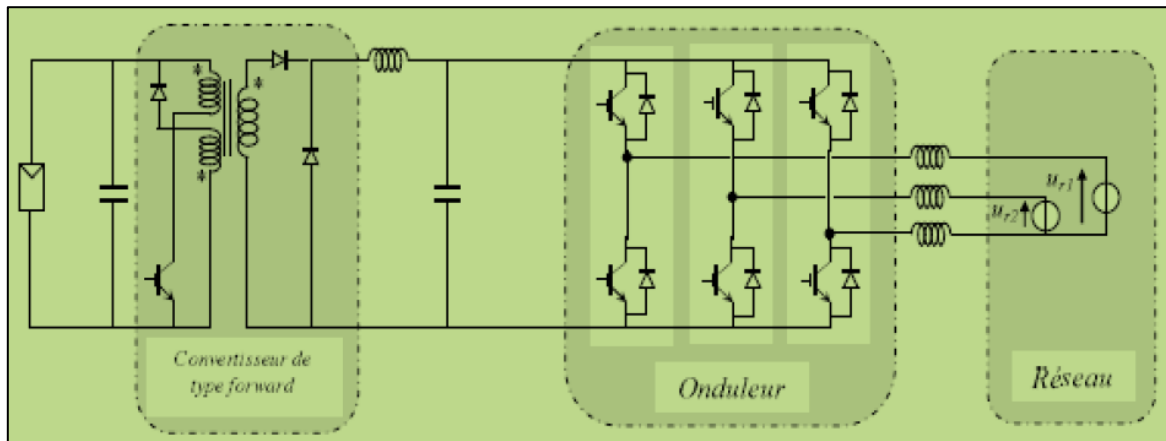
La figure I.11 en montre l'utilisation d'un convertisseur fly-back, qui sert à élever la tension DC au niveau désiré. La caractéristique principale du fly-back est le transformateur qui assure deux rôles : transformateur et inductance de couplage au réseau. L'inconvénient du transformateur est qu'il génère des pertes et qu'il augmente le coût de l'installation.[1]



**Figure (I.11) :** Schéma de la structure avec un convertisseur de type fly-back.

❖ **Structure avec un convertisseur forward**

La figure I.12 présente un convertisseur forward qui est capable d'élever la tension cela simplifier la conversion DC\AC. L'utilisation d'un transformateur pour la connexion n'est plus nécessaire, la conversion continu-alternatif se fait de façon relativement simple, grâce a un onduleur centralise. La tension élevée qui traverse le bus est réduite la sécurité des personnels d'entretien, la capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module.[1]

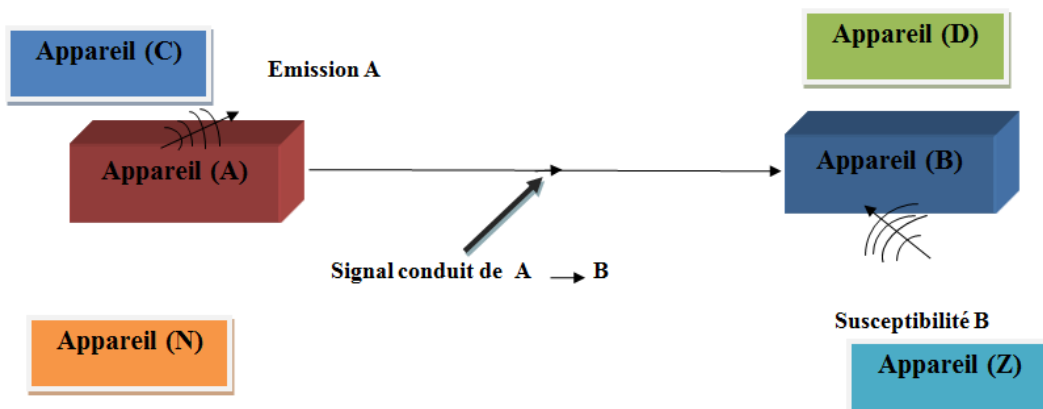


**Figure (I.12) :** Schéma de la structure avec convertisseur forward.

#### I-4-Notion de Compatibilité Electromagnétique (CEM)

Le but de la CEM est d'étudier les perturbations transmises par les appareils pendant leur fonctionnement. Cette étude assure à l'équipement constitué de plusieurs appareils, la capacité de fonctionner d'une manière satisfaisante dans son environnement électromagnétique, sans introduire de perturbation intolérable pour les appareils trouvant dans cet environnement, c'est-à-dire :

- ✓ En premier lieu, s'il y a des perturbations électromagnétiques émises par un certain appareil, elles ne seront pas trop importantes.
- ✓ En second lieu, appareils voisins doivent fonctionner de façon acceptable en présence de ces perturbations. Ces deux cas sont représentés sur la figure I.13. [7]



**Figure (I.13) :** Environnement Electromagnétique

#### I-4-1 Décomposition d'un problème de CEM

Toute situation d'interférences électromagnétiques fait intervenir trois différents éléments: une source d'émission de perturbation, un récepteur de perturbation (victime), et un mécanisme de couplage par lequel la perturbation réagit sur le fonctionnement du récepteur.



Fig (I.14) : Décomposition d'un problème de CEM

#### I-4-2 Perturbations électromagnétiques

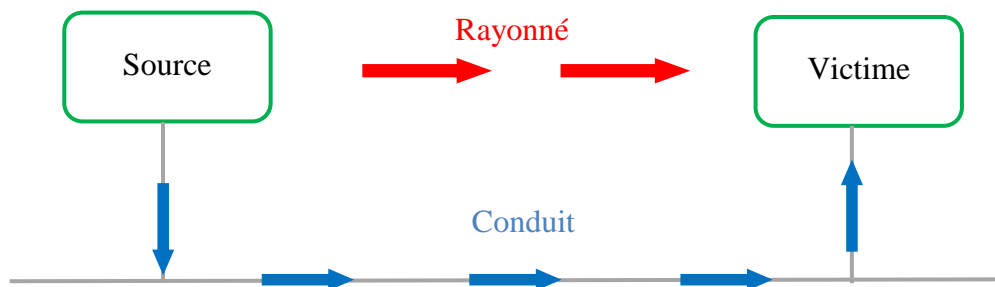
Les ondes électromagnétiques sont capables de troubler le fonctionnement d'un dispositif électrique ou d'endommager les éléments indispensables d'un appareil électrique.

La perturbation électromagnétique peut être un bruit, un signal non désiré ou une modification du milieu de propagation lui-même. Il existe deux sources de perturbations : d'origine naturelle et d'autres qui tiennent à l'activité humaine.[8]

❖ Perturbations électromagnétiques  $\begin{cases} f < 5\text{MHz} : \text{Basse fréquence.} \\ f > 30\text{MHz} : \text{Haute fréquence.} \end{cases}$

### I-4-3 Le couplage électromagnétique

Un couplage est le phénomène de propagation des perturbations qui se produit entre la source et la victime. Les modes de couplage peuvent être classifiés selon le type de perturbation et selon le support de propagation, par conduction (caractérisé par les courants et différences de potentiel), ou par rayonnement (caractérisé par les champs électriques, et magnétiques).[9]

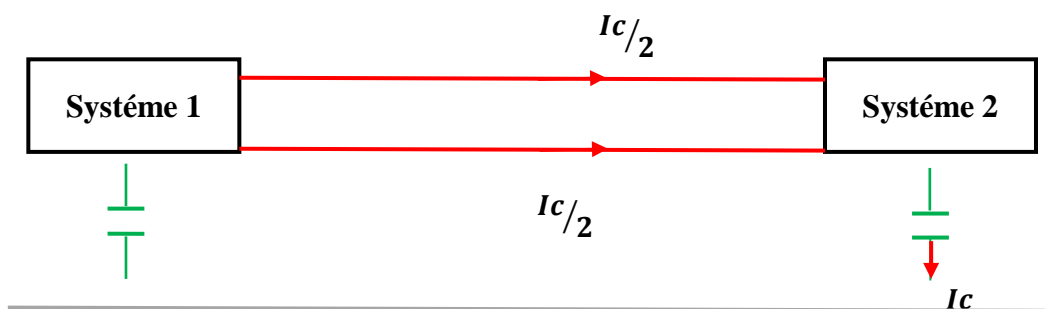


**Fig (I.15) :** Les modes de couplage entre la source de perturbation et la victime.

#### I-4-3-1 Le couplage par conduction

Le couplage par conduction se produit lorsque la source de perturbation et la victime sont reliées entre elles par un conducteur. Il se fait en deux modes :

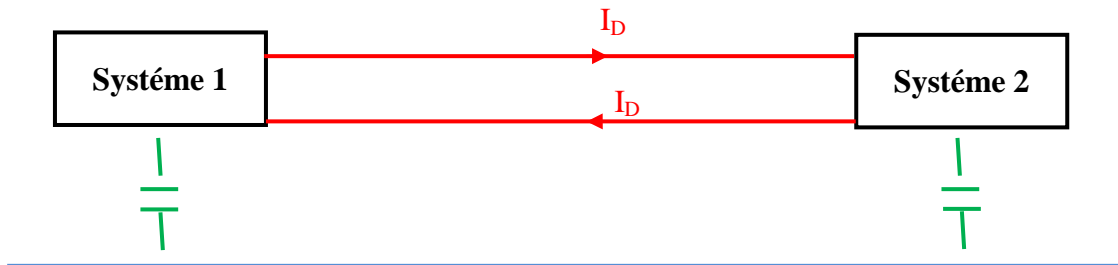
- ❖ le mode commun : En mode commun, les signaux se propagent dans le même sens sur tous les conducteurs. Les courants de mode commun reviennent par la masse. Ce mode représente 10 % des cas. Il est aussi appelé mode "parallèle", "longitudinal", ou mode "asymétrique".



**Fig (I.16):** Le mode commun entre deux systèmes

- ❖ Le mode différentiel : le mode différentiel est le mode idéal de la transmission des signaux qui représente 90 % des cas. Dans ce mode, tout le courant qui entre dans le récepteur

revient vers la source par un fil de retour. Il est appelé aussi mode "série", "normal", ou mode "symétrique". [9]



**Fig (I.17):** Le mode différentiel entre deux systèmes

#### **I-4-3-2 Le couplage par rayonnement (par champ)**

Nous disons un couplage par rayonnement (champ), si le support de propagation d'une perturbation transmise de la source vers le récepteur est l'espace.

Nous savons que le champ électromagnétique rayonné par une source de radiation varie de la distance qui sépare la source de radiation et le lieu où le champ est observé.

#### **I-5-Etat de l'art de CEM dans systèmes PV**

Dans un souci de fiabilité, l'étude de la compatibilité électromagnétique dans systèmes PV a fait l'objet de nombreux travaux de recherche.

Jukkrit Jiraprasertwong [10] concentre sur la compatibilité électromagnétique généré dans un système photovoltaïque. Les perturbations électromagnétiques (PEM) générées par l'onduleur peuvent être réparties sur plusieurs chemins de couplage dans le système photovoltaïque. Le PEM interfère appareils électroménagers à la fois directement et indirectement. L'émission rayonnée peut être réduit en utilisant un blindage et des émissions conduites peuvent être réduit en utilisant une technique de filtrage.

Yasutoshi Yoshioka [11] rend compte des activités et normalisation CISPR introduit de nouvelles limites et méthode de mesure des perturbations conduites aux ports DC connectés au système solaire photovoltaïque de production d'électricité.

Manish Prajapati [12] a proposé une méthode de modélisation HF de source de perturbation basé sur une approche de mesure d'impédance en circuit, nous démontrent que les modèles de source en MC et MD d'un système PV peut être extrait avec précision. Les modèles de sources de perturbation nous permettent d'évaluer efficacement l'impact PEM du système PV sans avoir besoin de connaître tous les détails du circuit interne.

Wenjie Chen [13] s'est intéressé à l'analyse détaillée du champ rayonnement en proche des panneaux PV. Une nouvelle modèle d'antenne est proposée pour étudier ce phénomène.

M. Rucinski [14] présente l'analyse des chemins de propagation cote DC d'onduleur des perturbations électromagnétiques dans systèmes PV connectée directement au réseau. Les impédances en MC et MD été calculées avec simulation et mesures. La simulation d'un modèle PEM du système PV réel a été développée à l'aide de mesures d'analyseur d'impédance des panneaux solaires et du courant continu câble réseau. Une étude de simulation a été réalisée dans environnement logiciel LTspice.

Les objectifs principaux de notre travail porte sur l'analyse et simulation de PEM conduit de cote DC d'onduleur sur environnement logiciel LTspice de système PV a bus continu en intermédiaire.

## **I-6-Conclusion**

Ce chapitre regroupe un ensemble d'information nous permettant d'élargir nos connaissances sur les systèmes PV connecte au réseau et la notion de la compatibilité électromagnétique (CEM), puis les techniques de couplage électromagnétique. Le chapitre est terminé par une présentation des nombreux travaux de recherche concentrent sur la compatibilité électromagnétique générée dans un système photovoltaïque.

**Chapitre II :Perturbations**  
électromagnétiques (PEM) génères par  
les systèmes PV.

## II-1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons introduire les perturbations électromagnétiques (PEM) qui deviennent un défi technique majeur pour les systèmes photovoltaïques (PV). La PEM qui entrave le normal fonctionnement et dégrade les performances des équipements électroniques ou électriques. Alors que les deux problèmes de compatibilité électromagnétique (CEM), les émissions et la susceptibilité sont pertinents dans les systèmes PV, le premier est plus préoccupant en raison de la capacité inhérente de ces systèmes pour générer du bruit et le transmettre à d'autres appareils. Comme l'utilisation de PV augmente rapidement, les PEM de ces systèmes doivent être correctement traitées.

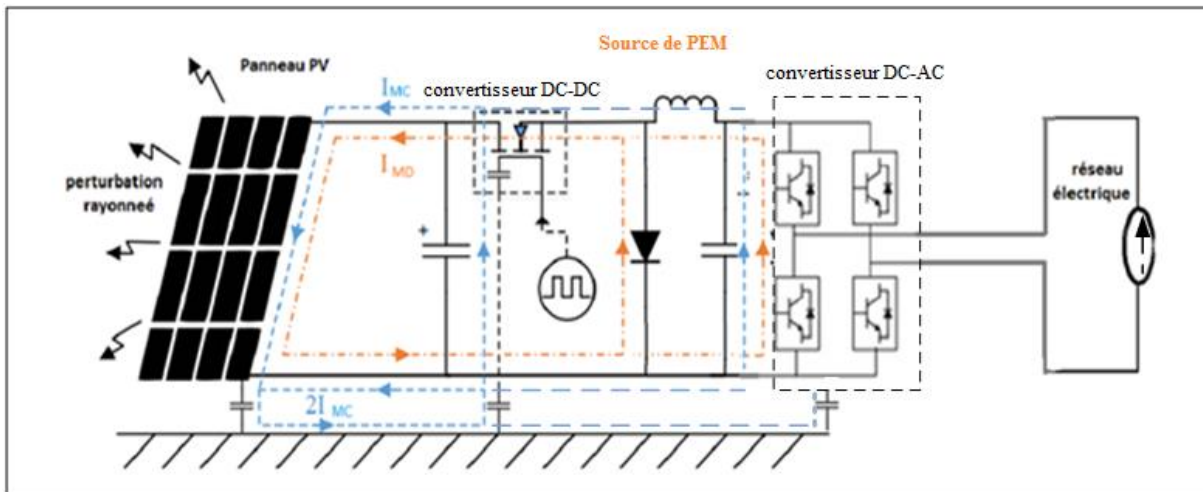
Les sections suivantes présentent les concepts de base des systèmes PV et PEM dans ces systèmes.

## II-2 PEM dans les systèmes PV

Les convertisseurs de puissance du système photovoltaïques, le convertisseur DC-DC et les onduleurs DC-AC sont cause de plus d'importance des PEM. Il existe plusieurs types et topologies de convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Malgré les différents types, les convertisseurs ont des commutateurs à semi-conducteurs de puissance, tels que MOSFET ou IGBT, qui fonctionnent à haute fréquence, de dizaines à quelques centaines de kHz.

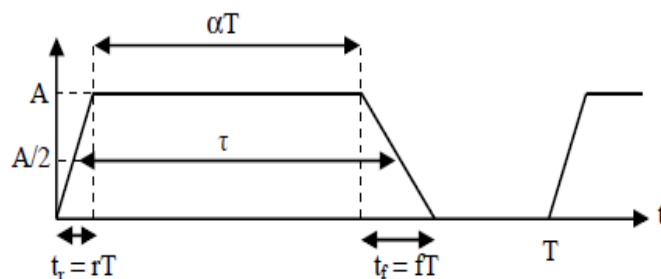
Bien que la commutation plus rapide présente plusieurs avantages tels qu'un rendement élevé et en réduisant la taille du convertisseur, ils deviennent la source de PEM. Ainsi, en raison de la variation très rapide des tensions et courants au sein des composants en commutation ( $dV/dt$ ,  $dI/dt$ ), des perturbations électromagnétiques conduites et rayonnées apparaissent en haute voire très haute fréquence dans le système photovoltaïque.

De plus, plusieurs éléments parasites dans les convertisseurs, tels que la capacité entre les interrupteurs, les dissipateurs de chaleur et la terre, construisent des voies non intentionnelles de circulation de la perturbation dans le système PV. Les PEM de ces convertisseurs sont principalement des émissions conduites qui s'écoulent du convertisseur vers les composants externes via les câbles d'alimentation.[15]



**Figure (II.1) :** Schéma simplifiée des PEM du côté entrée d'un système PV

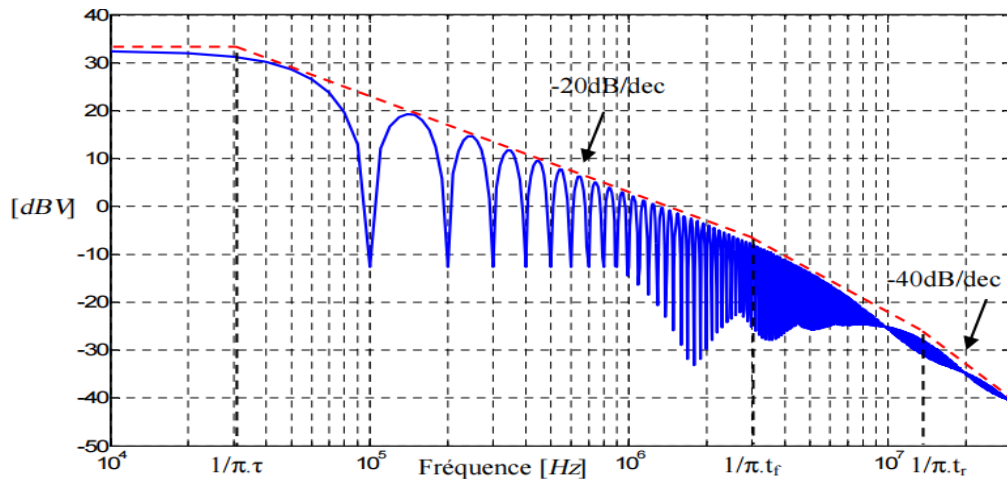
La génération de PEM peut être comprise en considérant le spectre d'une commutation de la forme d'onde due à l'appareil. La tension de la forme d'onde actuelle dans le domaine temporel dû au commutateur peut être approchée par une forme d'onde trapézoïdale comme illustré à la Figure II.2. [16]



**Figure (II.2) :** Forme d'onde trapézoïdale dissymétrique

L'expression du module de la Transformée de Fourier du signal trapézoïdal est donnée par la relation (1) en posant  $t_r = rT$  et  $t_f = fT$ . Son évolution en fonction de la fréquence est donnée à la Figure II.3

$$C(n, rms) = A\sqrt{2}\left(a + \frac{r+f}{2}\right) \frac{\sin(\pi nr)}{\pi nr} \frac{\sin[\pi n(a+r)]}{\pi n(a+r)} \frac{\sin[\pi n(f-r)]}{\pi n(f-r)} \quad (II.1)$$



**Figure (II.3) :** Contenu spectral des formes d'ondes en électronique de puissance

Le spectre d'amplitude de la forme d'onde trapézoïdale est représenté sur la Figure II.2. Comme montré, l'asymptote du spectre a trois pentes. La première fréquence de coin à  $\frac{1}{\pi\tau}$ , indique que plus le temps de marche ou le cycle de service de la forme d'onde, abaisse la coupure la fréquence. La pente de -20 dB / déc est représenté la réponse harmonique de la largeur d'impulsion. De même, la pente -40 dB / déc est représenté la réponse harmonique de le temps de montée / descente.

La deuxième fréquence de coin à  $\frac{1}{\pi t_r}$  les temps fournissent une réduction supplémentaire des harmoniques d'ordre supérieur. Cependant, montée / descente plus rapide le temps est préféré dans les convertisseurs de puissance pour éviter les pertes, ce qui augmente le PEM spectre., indique qu'une montée / descente plus lente.

Le PEM circuler dans le système selon deux modes: mode commun (MC) et mode différentiel (MD), comme illustré à la Figure II.2. Les émissions de PEM en MD circulent entre les lignes et neutre du système. En raison de la tension de PEM existant entre la ligne / neutre et sol, le PEM en MC circule entre eux via des chemins parasites tels que la capacité entre le boîtier de composant et le sol.

### II-3 Propagation du PEM

Du point de vue des convertisseurs de puissance, les émissions des systèmes PV peuvent être vu de deux côtés: l'entrée et la sortie des convertisseurs. Comme le montre la Figure II.1, il peut y avoir des perturbations électromagnétiques sur le côté d'entrée DC des convertisseurs de puissance où les panneaux PV est connecté. Les PEM conduit de la même manière du côté

sortie où le réseau. Côté courant alternatif, les émissions conduites pourraient gêner les charges connectées et si l'émission est supérieure aux limites existantes, elles ne peuvent pas être connectées au réseau AC.

- Par conséquent, de nombreuses études ont été menées sur émissions conduites côté courant alternatif des systèmes PV. Avec atténuation des émissions conduites côté courant alternatif mais ne concerne pas les émissions côté DC des systèmes PV.[17]

Cependant, plusieurs travaux ont montré émission conduite excessive du côté de l'entrée et a signalé qu'elle était la cause de l'émission rayonnée des systèmes PV [18]. Les panneaux photovoltaïques en raison de leur la taille est principalement capacitive et le long câble DC utilisé pour connecter les convertisseurs et les panneaux PV peuvent avoir une capacité et une inductance réparties. Ensemble, ils forment un circuit résonnant pour plusieurs fréquences et des champs électromagnétiques rayonnés peuvent se produire entre 150 kHz et 30 MHz.

Plusieurs résultats d'études et de mesures sur les émissions du côté entrée et sortie des systèmes PV sont rapportés dans [19]. L'étude montre les résultats de mesure pour rayonné émissions entre 150 kHz et 30 MHz dues aux courants MC et MD dans le PV systèmes séparément. Cela indique que les deux composantes du bruit doivent être enquêtées. L'étude a examiné plusieurs onduleurs et contrôleurs de charge haut de gamme et ont indiqué que la plupart respectaient les normes existantes en termes de émission sur les côtés AC.

### II-4 Normes de PEM dans le système PV

La prise de conscience CEM se développe à l'échelle mondiale, en raison de l'augmentation rapide de la pollution électromagnétique. L'Europe a pris la tête de la normalisation des phénomènes PEM, ce qui a abouti à l'introduction obligatoire de normes CEM à partir de 1996. [20]

Fondamentalement, les normes sont regroupées comme suit:

- 1) Émissions (conduites et rayonnées)
- 2) Immunité (conduite et rayonnée).

La CEI classe en outre les normes en trois catégories:

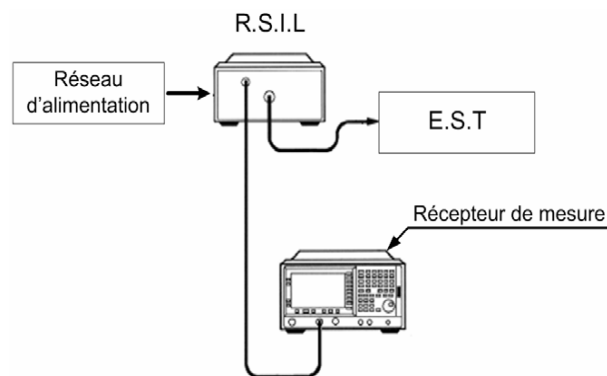
- a) Normes de base (défini les exigences de base pour les tests orientés source d'interférence),

b) Normes génériques (spécifie un ensemble d'exigences minimales et de tests pour tous les appareils et équipements utilisés dans un environnement donné, par exemple, domestique, industriel, etc.)

c) Normes de produits et de familles de produits (établies par chaque comité responsable de certaines catégories de produits).

Pour l'électronique de puissance, certaines normes PEM commerciales sont disponibles et spécifient le niveau acceptable de perturbation de ligne net. Les normes commerciales les plus largement acceptées sont dues au Comité International Spécial des Perturbations and Radioélectrique ou au International Special Committee on Radio Interference (CISPR), à la Federal Communications Commission (FCC), aux British Standards (BS), au Verband Deutscher Elektrotechniker (VDE) et au Voluntary Control Council pour les interférences (VCCI).[21]

La figure II.5 montre les limites d'émission conduites selon le CISPR 22 largement utilisé. Dans CISPR 22, la classe A définie pour les appareils utilisés dans les domaines commerciaux, industriels ou commerciaux et la classe B définie pour les environnements résidentiels.[22]



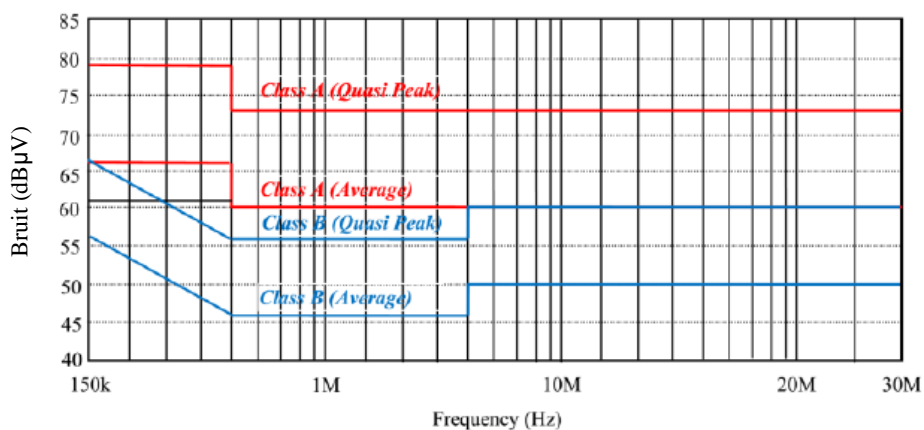
**Figure (II.4) :** Système de mesure PEM

Puisqu'il n'y a pas de catégorie spécifique pour les appareils PV, il n'y a pas de normes CEM particulières disponibles pour les systèmes photovoltaïques pour le moment. Même s'il n'y a pas d'idée claire dans quelles conditions le système PV peut être catégorisé, c'est-à-dire en tant qu'entité unique en laboratoire ou à l'installation avec l'environnement réel, un certain nombre de tentatives aboutissent aux normes d'alimentation disponibles.

Selon la directive 2004/108 / CE du Parlement européen et du Conseil, «appareil» est défini comme l'unité fonctionnelle unique disponible dans le commerce destinée à l'utilisateur final et susceptible de générer des perturbations électromagnétiques ou susceptible d'être affectée par de telles perturbations. Elle définit également l'«installation fixe» comme une combinaison particulière de nombreux types d'appareils et, le cas échéant, d'autres dispositifs, assemblés, installés et destinés à être utilisés en permanence à un emplacement souhaité [23]. Par conséquent, les systèmes PV connectés au réseau sont considérés comme l'installation fixe lorsqu'ils sont fixés pour alimenter le réseau électrique public.

Conformément à la directive ci-dessus, les normes applicables pour les installations fixes telles que les systèmes PV interfacés au réseau sont normalement des normes génériques. Par conséquent, EN61000-6-2 est pour l'immunité et EN61000-6-4 pour les émissions [24]. Ces normes décrivent la méthode d'essai réelle à effectuer. Dans une application autonome, le système PV est considéré comme un appareil et l'ensemble du système doit être conforme à la CEM.

Les réglementations sur les émissions sont principalement basées sur les normes CISPR relatives aux interférences de contrôle et de mesure dans la gamme de fréquences de 9 kHz à 18 GHz.



**Figure (II.5) :** Limites admissibles d'émissions conduites selon CISPR 22.[22]

### II-5 Mesure de PEM par le Réseau Stabilisé d'Impédance de ligne normatif (RSIL)

Le système de mesure PEM typique nécessite un réseau de stabilisation d'impédance de ligne (RSIL), un séparateur de bruit, un analyseur de spectre et un ordinateur pour interfacer l'analyseur de spectre pour le traitement des données.

Le (RSIL) est équivalent à un filtre inséré entre le réseau d'alimentation et l'étirée de l'équipement sous test(EST). Son rôle est multiple, il permet d'isoler l'EST du réseau d'énergie, de fixer l'impédance prescrite aux points de mesure et de canaliser les perturbations conduites vers le récepteur de mesure. Par ces différentes tâches, le RSIL assure ainsi la reproductibilité des mesures. [25]

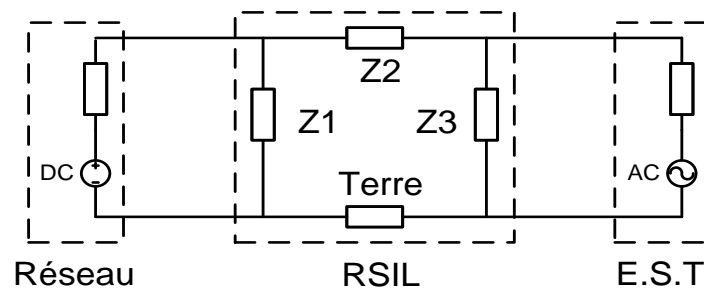
Il existe plusieurs structures de RSIL, chacune est fixée par la norme relative au domaine d'application. Le point commun à tous les structures est l'impédance caractéristique équivalente ( $50\Omega$ ), constante sur toute la bande de fréquence.

A l'origine, les perturbations conduites sont des courants réinjectés dans le réseau d'alimentation à travers les fils conducteurs ou la terre, qui provoquent des chutes de tension aux bornes des impédances internes du réseau. On substitue à ces impédances parasites variables une impédance caractéristique figée qui permet de réaliser les mesures et de les rendre reproductibles. Lors de la mesure, cette impédance masque les variations du réseau réel et simule un réseau dont l'impédance est fixées une fois pour toute par la norme, d'où l'appellation « Réseau Stabilisateur d'Impédance de Ligne, réaux fictif ou réseau artificiel ». [26]

### II-5-1 Fonctionnement du RSIL

Le RSIL n'est rien d'autre qu'un dispositif quadripolaire équivalent à un filtre passif comprenant des inductances, des capacités et des résistances dont le nombre, le placement topologique et surtout les valeurs sont fonction de la norme appliquée au cas traité. Ce réseau est également doté d'une sortie BNC par phase permettant de visualiser la chute de tension aux bornes d'une impédance fixe, qui est l'image de la perturbation. [26]

La topologie générale d'un RSIL est illustrée sur la Figure II.6

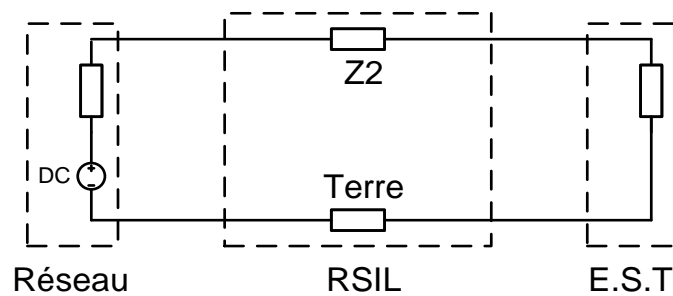


**Figure (II.6):** Topologie générale d'un RSIL.

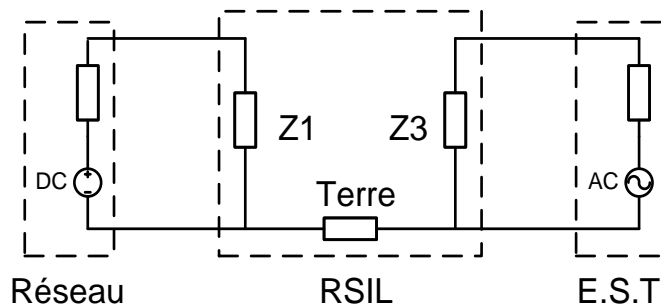
L'efficacité du RSIL doit être assurée sur une plage de fréquence très large car il intervient selon deux gammes de fréquence

- La fréquence du réseau  $f_{réseau}$
- La fréquence de la perturbation  $f_{perturbation}$

Pour ces deux plages de fréquences, le RSIL recouvre les deux structures simplifiées, présentées dans les Figure II.7 et Figure (II.8)



**Figure (II.7):** Schéma simple du RSIL en BF.



**Figure (II.8):** Schéma du RSIL en HF.

Ainsi le RSIL doit remplir quatre tâches simultanément :

- Assurer l'alimentation de l'appareil en test à basse fréquence sans atténuation (une chute de tension sortie/entrée inférieure à 5 % de la tension nominale) .Donc présenter une très faible impédance  $Z_2$  par rapport à la charge et très fortes impédances  $Z_1$  et  $Z_3$  par rapport à la terre.
- Du point de vue du réseau d'alimentation .Il doit bloquer d'une part (forte impédance  $Z_2$ ) et court-circuiter d'autre part (faible impédance  $Z_1$ ) toute perturbation haute fréquence en

provenance du réseau ou d'autres utilisateurs branchés en parallèle afin qu'elles ne viennent pas entacher et fausser la mesure dans  $Z_3$ .

- Du point de vue de l'appareil en test (générateur de perturbation) le RSIL doit isoler les perturbations engendrées par rapport au secteur en les aiguillant dans l'impédance de mesure  $Z_3$  qui constitue à la fois la charge du générateur de perturbation et l'impédance figée du réseau d'alimentation.
- Garder une impédance figée ( $50\Omega$ ) entre phase et la terre ainsi qu'entre neutre terre vis-à-vis des perturbations à haute fréquence émises par l'équipement sous test. [26]

### II-5-2 Analyse du RSIL vis-à-vis de la mesure

Les perturbations conduites peuvent circuler entre deux systèmes en deux modes : mode différentiel (MD) et mode commun (MC). Les perturbations en mode différentiel peuvent être représentées par la chute de tension  $V_{P/N}$  aux bornes de l'impédance caractéristique ( $50\Omega$ ), provoquée par le courant  $I_{MD}$  parcourant un circuit fermé entre phase et neutre sans toutefois solliciter les éléments parasites entre le montage et la terre. Même chose pour les perturbations du mode commun sauf que le courant en mode commun parcourt un circuit fermé entre phase, neutre et la terre.

Pour éviter la confusion de la circulation des perturbations du mode commun, nous devrions noter que le courant de mode commun qui traverse la terre s'appelle  $I_{MC}$  c.à.d.  $I_{MC}/2$  dans chaque ligne. [27]

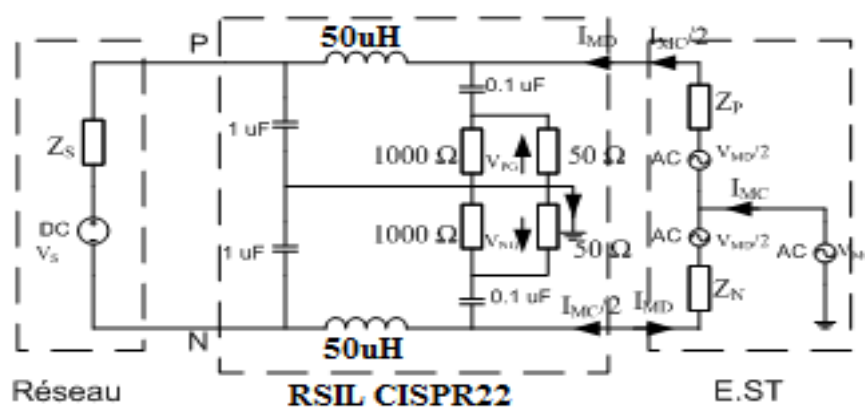


Figure (II.9): RSIL CISPR22 vis à vis des perturbations MD et MC.

D'après la Figure II.9, les courants de phase  $I_P$  et de neutre  $I_N$  sont donnés par les équations :  
[27]

$$I_P = \frac{I_{MC}}{2} + I_{MD} \quad (II.2)$$

$$I_N = \frac{I_{MC}}{2} - I_{MD} \quad (II.3)$$

Donc les chutes de tensions à travers les impédances ( $50\Omega$ ) sont données par les équations  
[27]

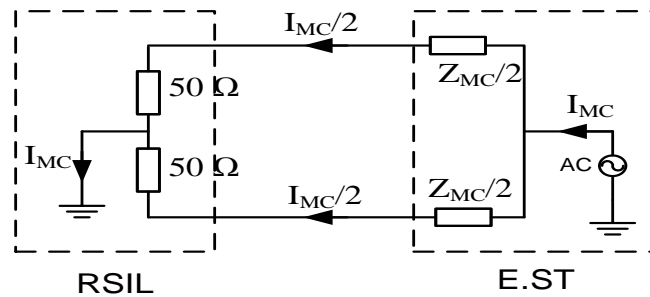
$$V_P = 25 \cdot I_{MC} + 50 \cdot I_{MD} \quad (II.4)$$

$$V_N = 25 \cdot I_{MC} - 50 \cdot I_{MD} \quad (II.5)$$

$V_P$  : la tension entre phase et la terre.

$V_N$  : la tension entre neutre et la terre.

### II-5-2-1 Le courant de mode commun



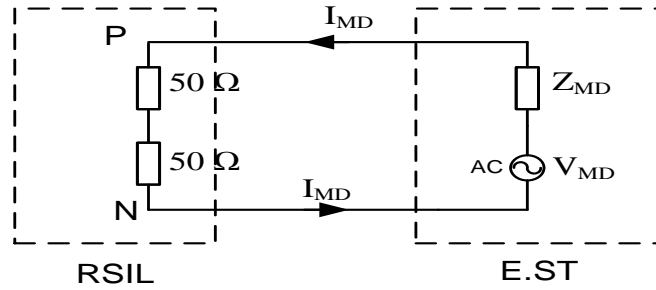
**Figure (II.10):** RSIL vis à vis du mode commun.

Le courant de mode commun est défini par :

$$I_{MC} = I_P + I_N = \frac{V_P + V_N}{50} \quad (II.6)$$

$$V_{MC} = \frac{V_P + V_N}{2} \quad (II.7)$$

**II-5-2-2 Le courant de mode différentiel**



**Figure (II.11):** RSIL vis à vis de mode différentiel.

Le courant de mode différentiel est défini par :

$$I_{MD} = I_P - I_N = \frac{V_P - V_N}{50} \quad (II.8)$$

$$V_{MD} = V_p - V_N \quad (II.9)$$

**II-6 Conclusion :**

Comme discuté dans ce chapitre, les PEM sont une préoccupation croissante dans les systèmes photovoltaïques. Les perturbations générées par les convertisseurs de puissance PV sont conduits aux côtés d'entrée et de sortie des convertisseurs. Du côté d'entrée DC, les émissions sonores sont conduites vers les panneaux PV à travers les longs câbles DC et sont potentiellement rayonnés par ces composants.

# **Chapitre III : Etude et Modélisation**

## **CEM des systèmes PV**

### **III-1 Introduction:**

On s'intéresse dans ce troisième chapitre à la modélisation CEM de l'ensemble d'un système PV connecté en réseau. La première partie est dédiée à l'état de l'art de méthodes de modélisation CEM des sources de PEM et méthodes de la modélisation du chemin de propagation du PEM.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présentons précédents travaux menés au laboratoire et portant sur la modélisation HF des du panneau PV puis la modélisation des câbles DC et composants passif .En fin par la modélisation des composants semi-conducteurs de puissance.

### **III-2 Objectifs de la modélisation CEM**

Les objectifs de la modélisation consistent à définir une source équivalente de perturbation de MC et MD (ici le variateur électronique) : la tension de MC ( $V_{MC}$ ) et la tension de MD ( $V_{MD}$ ), puis les impédances équivalentes de MC et MD des différents chemins de propagation : générateur photovoltaïque, câbles DC, éléments internes du hacheur et de l'onduleur. L'élaboration d'un modèle du système complet est nécessaire pour pouvoir prédire ou estimer les niveaux de perturbations aux différents endroits du système. [7]

### **III-3 Etat de l'art de modélisation CEM**

Les études relatives à la modélisation PEM dans les systèmes PV sont similaires aux modélisations techniques dans d'autres systèmes de conversion de puissance. De plus, un nombre important de la littérature est disponible sur la modélisation PEM pour d'autres systèmes par rapport à celle du PV systèmes. Il est donc pertinent et nécessaire de revoir les concepts de modélisation utilisés dans autres systèmes d'alimentation en plus des systèmes PV pour une meilleure compréhension du problème.

Une méthode de modélisation appropriée peut alors être suggérée, adaptée aux problèmes présentés par les systèmes PV. [15]

### **III-4 Modélisation des sources de PEM**

Les dispositifs de commutation à semi-conducteurs utilisés dans les convertisseurs sont la principale source de perturbations existant dans le système PV. Modélisation de la source de PEM est l'un des principaux défis de l'analyse PEM.

La méthode de modélisation doit être précise et efficace de sorte qu'elle soit facile à développer et efficace en termes de calcul. La méthode doit également être applicable à différents configurations et topologies. Les méthodes de modélisation de source de PEM disponibles peuvent être classées en deux catégories: modèles basés sur des dispositifs et basés sur des mesures modèles équivalents.[15]

#### **III-4-1 Modélisation basée sur les dispositifs**

Cette approche est basée sur la modélisation des dispositifs de commutation à semi-conducteurs en considérant leurs concepts physiques. Les dispositifs sont modélisés comme des composants individuels qui représentent la source des émissions sonores. Outre la modélisation de la source de bruit, les autres composants du circuit et les composants parasites présents dans le convertisseur de puissance doivent être modélisés séparément et inclus dans le modèle global du convertisseur.

Les composants semi-conducteurs peuvent être représentés comme des modèles des dispositifs de trois manières différentes: modèle basé sur la physique, modèle de dispositif tel que fourni par le fabricant et commutateur idéal avec approximation d'impédance.

Les modèles basés sur la physique sont développés en considérant les équations physiques qui régissent les caractéristiques du dispositif de commutation.

Cette approche est appliquée dans les modèles PEM dans [28] sur la base du modèle IGBT de Hefner [29]. Les modèles basés sur la physique considèrent tous physique majeure impliquée dans l'appareil et peut être très perspicace. Alors que ces modèles peut être très précis si des paramètres de modèle suffisants sont obtenus. Cependant, le les extractions de paramètres nécessitent des ensembles d'expériences qui peuvent être compliquées et souvent les paramètres doivent être ajustés par un processus d'erreur d'essai pour atteindre la précision acceptée

niveau

Les modèles d'appareils fournis par le fabricant sont souvent utilisés [30]. Celles-ci les modèles sont également des modèles basés sur la physique, mais avec des paramètres dérivés à certaines conditions et fournies par le fabricant aux utilisateurs. Ce type de source de perturbation modèle est principalement utilisé dans l'étude des PEM des convertisseurs et des systèmes PV [17,31].

Alors que les modèles peuvent ne pas être précis dans les conditions de fonctionnement réelles pour PEM une analyse. Des mesures supplémentaires doivent être prises pour vérifier que les paramètres disponibles sont valides dans les conditions expérimentales réelles [30].

Certaines études ont appliqué la simplification de la source de perturbation en les représentant comme commutateurs idéaux avec une certaine impédance approximative comme avec les parasites RLC [32,33] ou comme résistance variant dans le temps pendant les transitions de commutation [34].

L'approche de modélisation basée sur les dispositifs est surtout utile pour les simulations électroniques de puissance pour analyser les stratégies de contrôle, la stabilité, etc. Les principaux avantages de cette méthode sont l'adaptabilité et l'évolutivité. Chaque composant tel que le contrôle, les filtres, etc.

Pour les convertisseurs simples, cette approche peut également être utile pour les prédictions PEM. Cependant, avec un un nombre croissant de composants dans le système et pour l'analyse haute fréquence, la modélisation des paramètres localisés peut devenir très complexe. Certaines études ont également représenté les sources de bruit en mesurant directement la tension aux bornes des interrupteurs [35].

Bien que cette approche simplifie la modélisation de un dispositif à semi-conducteur et a montré une meilleure précision, il nécessite toujours l'extraction du modèle de circuit lumped complet du convertisseur. Le temps de développement du modèle basé sur l'appareil est long et dans certains cas, les modèles des dispositifs peuvent ne pas être disponibles.

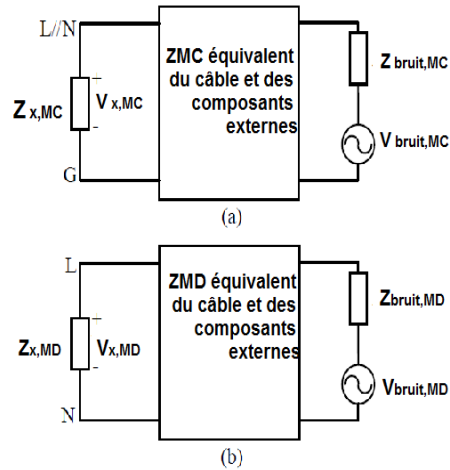
### III-4-2 Modélisation basée sur la mesure

La modélisation basée sur les appareils présente des limites et ne convient pas aux simulations PEM au niveau du système. Les circuits avec un grand nombre de composants nécessitent de grandes ressources de calcul et du temps. Cela peut également poser un problème pour la convergence des simulations lorsqu'il y a beaucoup de composants [36].

De plus, pour un système complet intégré, il peut ne pas être possible d'obtenir requis modèles d'appareils du fabricant ou il peut être difficile d'extraire les paramètres sans désintégrer le produit. Dans un tel cas, la modélisation de circuits localisés ne être possible. Une approche plus pratique de la modélisation des convertisseurs de puissance pour PEM l'analyse serait l'approche de modélisation équivalente basée sur la mesure.

Cette approche est une technique de modélisation en boîte noire où les convertisseurs sont représentés en utilisant un réseau à un ou deux ports avec des sources indépendantes [37]. Cela implique de représenter le circuit en utilisant l'équivalent Thevenin (ou Norton) dans le domaine fréquentiel.

Avec cette approche, les circuits équivalents MC et MD peuvent être représenté séparément comme indiqué sur la Figure III.1 .  $Z_{x,MC}$  et  $Z_{x,MD}$  peuvent être les impédances MC et MD d'appareils externes tels que RSIL, secteur, panneaux photovoltaïques, etc.  $V_{x,MC}$  et  $V_{x,MD}$  sont les tensions de PEM en MC et MD respectives au niveau de ces appareils. Pour développer le modèle, il est donc nécessaire d'obtenir la source de perturbation et les impédances de perturbation. Equivalent ZMD of cable and external components



**Figure (III.1) :** Modèles basés sur la mesure (a) MC et (b) MD.

La plupart des développements de cette approche sont appliqués dans d'autres systèmes de conversion [36,38]. Cependant, ces premiers développements ne sont pas précis, principalement en raison d'une approche de mesure incorrecte et une simplification excessive du modèle d'entraînement motorisé. D'autres études ont mis en œuvre cette technique en calculant indirectement la source de PEM et les impédances à l'aide de deux ou plusieurs conditions, puis résoudre simultanément les équations du réseau [38, 39].

Cependant, pour estimer l'impédance de la source de bruit ou les conditions de génération, ces études utilisent soit une méthode de résonance, soit une méthode d'insertion qui est sujette à des erreurs. Dans le cas de la méthode de résonance, le processus de choix des bonnes valeurs des composants réactifs, puis de réglage de la résonance peut être difficile et prendre du temps.

Surtout à des fréquences plus élevées, l'impédance d'entrée peut avoir plusieurs résonances dans une petite plage de fréquences, ce qui rend difficile la précision. En cas de méthode de perte d'insertion, les impédances des composants insérés doivent être beaucoup plus grandes ou plus petites que les impédances de la source de bruit [40].

Afin d'améliorer la mesure de l'impédance de la source de PEM dans le procédé de couplage inductif a été proposée [41]. En utilisant une sonde de courant comme sonde d'injection et une autre comme sonde de réception, le procédé est capable de mesurer les impédances MC et MD en utilisant différentes configurations de mesure. De plus, l'amplitude et la phase des impédances peuvent être obtenues. Avec un étalonnage approprié de la configuration de mesure, une bonne précision a été démontrée par cette méthode. Le chapitre suivant explique en détail la méthode du couplage inductif à deux sondes.

Étant donné que le système PV comprend plusieurs composants, la modélisation détaillée de circuits localisés ne convient pas pour étudier l'PEM du système. Par conséquent, une approche de modélisation PEM comportementale basée sur la mesure est proposée pour les systèmes PV dans ce rapport. Aucune étude antérieure n'a proposé cette approche pour la modélisation des PEM à partir de systèmes PV. De plus, la méthode de couplage inductif sera utilisée pour extraire l'impédance de la source de perturbation requise pour la modélisation. En utilisant cette approche, il sera possible d'estimer des modèles équivalents MC et MD séparés pour le système et de les analyser séparément.

### **III-5 Modélisation du chemin de propagation du PEM**

Le perturbation générée dans les convertisseurs de puissance est conduit vers les panneaux photovoltaïques via les câbles DC dans les systèmes PV. Les paramètres des dispositifs sont également pris en compte dans le chemin de propagation. Le trajet du perturbation peut être compliqué, une identification et une modélisation appropriées du trajet de propagation sont donc nécessaires pour modéliser le système avec précision. Il existe plusieurs méthodes de modélisation du chemin de propagation disponibles dans la littérature qui peuvent être classées en deux catégories: les modèles théoriques et les modèles expérimentaux.

#### **III-5-1 Modèles théoriques**

Les modèles théoriques sont basés sur la résolution des équations de Maxwell pour une structure physique et une propriété de matériau données. La méthode des éléments finis (FEM) et le circuit équivalent aux éléments partiels (PEEC) ont été utilisés dans de telles études

[42,30]. Des logiciels commerciaux sont également disponibles pour extraire les parasites de circuits tels que Ansoft Maxwell Q3D, Maxwell 2D etc. [43, 30].

Dans les systèmes PV, des modèles théoriques ont été appliqués obtenir une capacité parasite et un courant de fuite dans les modules PV [44, 45].

La méthode théorique peut fournir des paramètres de chemin avant la fabrication réelle du dispositif; cependant, ils peuvent être très complexes selon le type et le nombre de composants.

### **III-5-2 Modèles expérimentaux**

Les chemins de propagation de perturbation peuvent également être représentés par des méthodes expérimentales qui impliquent la mesure du dispositif sous test (DUT) pour obtenir des paramètres de trajet. Les modèles peuvent être obtenus en mesurant des composants individuels ou en mesurant les caractéristiques du réseau de chemin. La méthode des composants individuels est généralement effectuée en utilisant un analyseur d'impédance [46, 47] ou en utilisant la méthode de réflectométrie dans le domaine temporel (TDR) [48]. Des méthodes de couplage inductif ont également été développées pour extraire l'impédance des circuits [34]. Un modèle expérimental du trajet de propagation du bruit dans les systèmes PV est considéré dans certaines études [17].

Une autre méthode expérimentale est basée sur la représentation des chemins sous la forme d'un réseau multi-port [49]. Cette méthode peut représenter avec précision de petits parasites mais elle peut ne pas donner un aperçu clair des caractéristiques du système.

Pour les systèmes PV, les panneaux PV et les câbles DC doivent être pris en compte dans les modèles de chemin de propagation. Les caractéristiques des panneaux photovoltaïques peuvent varier en fonction des conditions de fonctionnement. Il est donc important d'extraire le modèle dans les conditions de fonctionnement réelles du panneau PV.

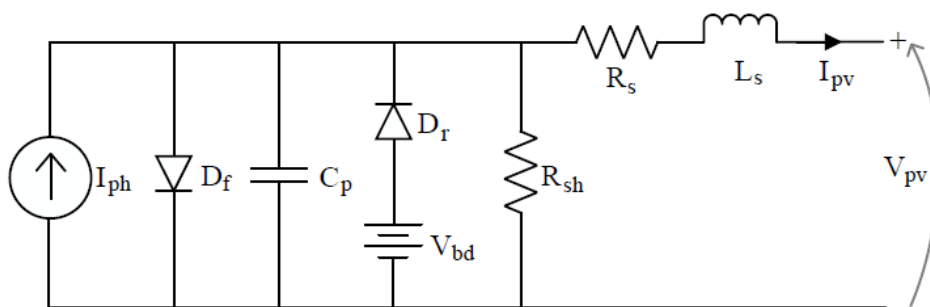
Les câbles DC des panneaux PV peuvent mesurer plusieurs mètres de long. Un modèle de ligne de transmission sera utilisé pour représenter les câbles à courant continu dans cette mémoire.

### III-6 Modélisation des chemins de propagation du système PV

#### III-6-1 Modélisation du panneau PV

Les caractéristiques du panneau PV dépendent de l'état de fonctionnement du panneau. En tant que tel, cela est également important en termes de considération CEM, car cela affecte la propagation des perturbations dans le système. Puisque le PV est essentiellement une jonction p-n, il peut être modélisé à l'aide de diodes avec une résistance parasite supplémentaire, capacité et inductance. Il existe deux méthodes de modélisation du panneau PV disponibles dans la littérature: le modèle photovoltaïque dynamique et le modèle photovoltaïque de circuit électrique équivalent.

Le modèle photovoltaïque dynamique ont été utilisés dans [50] se compose d'une source de photocourant  $I_{ph}$ , d'une diode de conduction de polarisation directe  $D_f$ , d'une capacité parallèle variable  $C_p$ , d'une diode conductrice de polarisation inverse  $D_r$  avec une offset de tension de claquage ( $V_{bd}$ ) (valeur négative), résistance de shunt ( $R_{sh}$ ), résistance série ( $R_s$ ) et inductance série ( $L_s$ ).  $D_f$  domine lorsque la cellule PV est polarisée sous-avant et  $D_r$  domine lorsqu'elle est polarisée en inverse au-delà de la tension de claquage  $V_{bd}$ . comme indiqué sur la Figure III.2 .



**Figure (III.2) :** Modèle dynamique équivalent PV

La production d'énergie photovoltaïque est principalement affectée par l'éclairage  $G$  et la température  $T$ . Le photo-courant  $I_{ph}$  est donné par l'expression suivante :

$$I_{ph} = [I_{scn} \left( \frac{R_s + R_{sh}}{R_{sh}} + K_i(T - T_n) \right)] \frac{G}{G_n} \quad (\text{III.1})$$

Où  $I_{scn}$  est le courant nominal de court-circuit,  $K_i$  est le coefficient de température actuel,  $T_n$  est la température nominale et  $G_n$  est l'irradiance nominale. Le courant de la diode directe  $I_{df}$  peut être exprimé comme suit:

$$I_{df} = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_d}{aV_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{III.2})$$

Où est le courant de saturation de la diode est donné comme suit:

$$I_s = \frac{I_{scn} + K_i(T - T_n)}{\exp\left(\frac{V_{ocn} + K_v(T - T_n)}{aV_t}\right) - 1} \quad (\text{III.3})$$

Où  $V_{ocn}$  est la tension nominale en circuit ouvert,  $K_v$  est le coefficient de température de tension, et  $V_t$  est la tension thermique donnée par:

$$V_t = \frac{kT}{q} N_s \quad (\text{III.4})$$

Où  $k$  est la constante de Boltzmann,  $q$  est la charge électronique et  $N_s$  est le nombre de cellules en série.

Le courant continu ( $I_{pv}$ ) et la tension ( $V_{pv}$ ) de sortie PV peuvent être exprimés comme suit:

$$I_{pv} = I_{ph} = I_s \exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{aV_t}\right) - \frac{V_{pv} + I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{III.5})$$

L'impédance du panneau PV est donnée par:

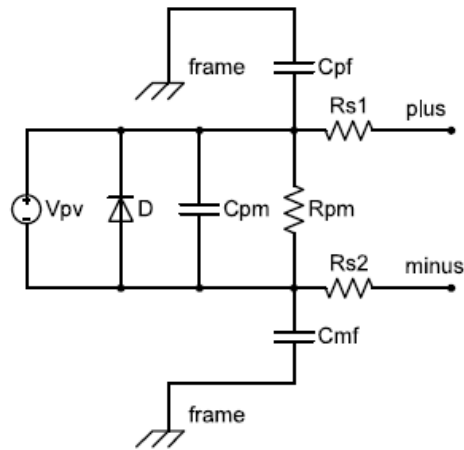
$$Z = \left[ R_s + \frac{R_p}{a+1} \right] + j \left[ L_s \omega \frac{\omega R_p^2 C_p}{a+1} \right] \quad (\text{III.6})$$

Où  $\omega = 2\pi f$  est la fréquence radian, et  $\alpha = \omega^2 R^2 C_p^2$

Le modèle PV dynamique complet est implémenté dans Blocs Simulink MATLAB; un bloc de contraintes algébriques est utilisé pour résoudre.

Le modèle photovoltaïque de circuit électrique équivalent ont été utilisés dans [14] se compose d'une tension nominale du panneau ( $V_{pv}$ ), d'une diode de conduction de polarisation

directe (D), deux capacités parasites entre bus DC positif et négatif et châssis mis à la terre ( $C_{pf}$ ,  $C_{mf}$ ), deux résistances d'alimentation de panneau de bus DC positives, négatives ( $R_{s1}$ ,  $R_{s2}$ ), d'une capacité parasite, résistance de fuite entre bornes de bus positives et négatives ( $C_{pm}$ ,  $R_{pm}$ ), comme indiqué sur la Figure III.3.



**Figure (III.3) :** Module PV - modèle de circuit équivalent.

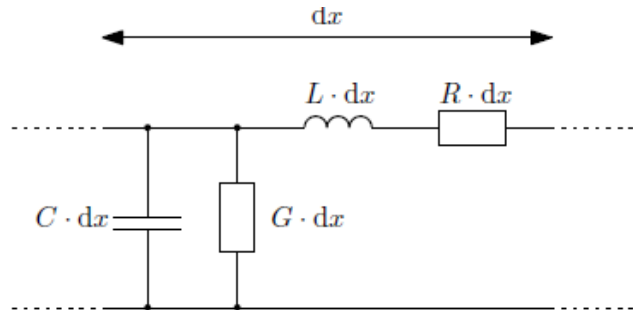
Identification des paramètres de l'ensemble le modèle de circuit a été réalisé avec analyseur d'impédance.

La méthode de modélisation du panneau photovoltaïque de circuit électrique [14] en utilisant logiciel de simulation de circuit LTspice.

### III-6-2 Modélisation du câble DC

Dans cette section, le câble DC sont considérées en utilisant la modèle transmission de ligne des câbles ont été développés dans le cadre de la transmission filaire de données (télégraphe) [51]. Ces modèles sont basés sur les équations des télégraphistes. La ligne bifilaire est caractérisée par quatre paramètres : sa résistance (R), son inductance (L), sa capacité (C) et sa conductance (G) linéiques et peut être représentée par une infinité de cellules élémentaires, comme indiqué sur la figure III.4 . Ces paramètres dépendent de la géométrie de la ligne ainsi que des propriétés des matériaux utilisés. Dans le cas de géométries simples (câble coaxial, lignes parallèles, etc.), il est possible de déterminer analytiquement ces paramètres. Le modèle des lignes de transmission étant adapté à la transmission de signaux, il est souvent possible de considérer la résistance linéique du câble comme constante avec la fréquence, par construction du câble. De plus, les niveaux de

puissance transmis étant faibles, les pertes, surtout diélectriques sont généralement négligées. Ces modèles sont adaptés à une résolution mathématique.



**Figure (III.4)** : Cellule élémentaire d'un modèle ligne de transmission.

### III-6-3 Modélisation des composants passifs

Pour obtenir une bonne précision du modèle, il est nécessaire de modéliser finement les autres composants du système. Ces éléments, tels que les moteurs, sont très complexes, souvent difficiles à modéliser de manière analytique, c'est pourquoi, l'objectif est plutôt de proposer un schéma électrique équivalent à partir de mesures, La problématique réside dans l'obtention du schéma électrique à partir de la mesure. Il est possible de proposer un schéma basé sur la représentation de phénomènes physiques HF, ou sur la structure du système étudié [52].

### III-6-4 Modélisation des sources de perturbation du système PV

Le modèle du transistor IGBT qui sera paramétré doit permettre d'obtenir une bonne représentation des formes d'ondes des commutations et des impédances à l'état passant et bloqué. Pour cela, nous allons utiliser des informations présentes dans la datasheet ou mesurables. De manière évidente, lorsque le transistor est bloqué, son impédance est équivalente à sa capacité de sortie sous tension d'alimentation. De même, lorsque le transistor est passant, son impédance peut être obtenue en première approximation à partir du réseau de caractéristiques statiques. [53]

De plus, ces deux critères influent sur le processus de commutation. Ils seront donc utilisés comme données d'entrée de notre processus d'optimisation. Nous proposons également d'utiliser la caractéristique de transfert qui nous permet de compléter le réseau de caractéristiques statiques à forte tension de polarisation directe VCE. Dans les prochains

paragraphe nous détaillons le choix de ces critères ainsi que notre méthode de calcul de la fonction objectif pour l'identification des paramètres d'un modèle d'IGBT.[53]

### **III-7 Conclusion**

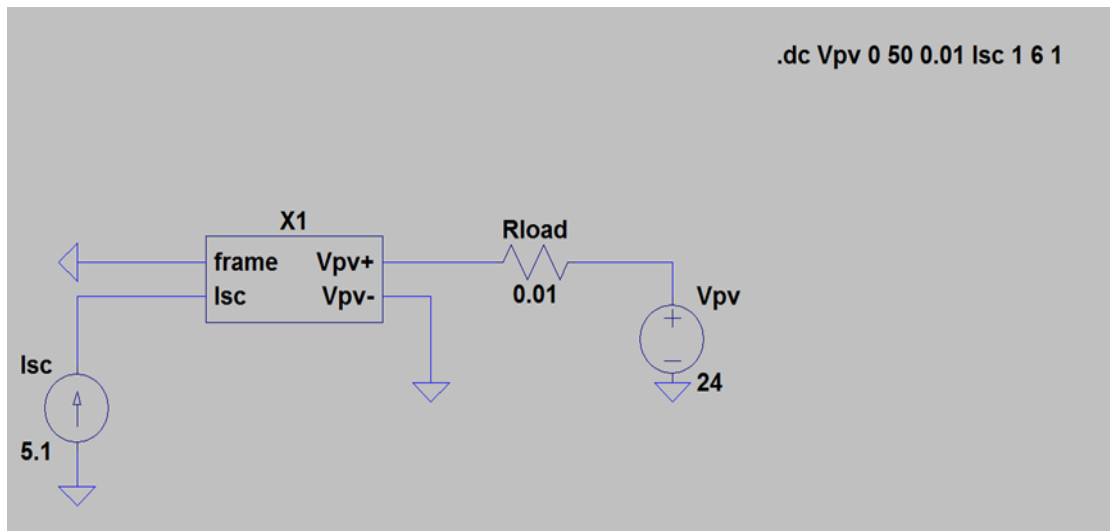
Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de modélisation d'un système PV connectée au réseau pour la prédiction des perturbations conduites. Le panneau PV peut être modélisé à l'aide de diodes avec une résistance parasite supplémentaire, capacité et inductance, le câble DC a été modélisé par méthode de transmission de ligne sur une large bande de fréquence, nous avons modélisé le hacheur et l'onduleur de tension par des générateurs équivalents et des capacités parasites dans le but de réduire le temps de calcul pour la simulation temporelle.

# **Chapitre IV : Simulation, Résultat et discussions.**

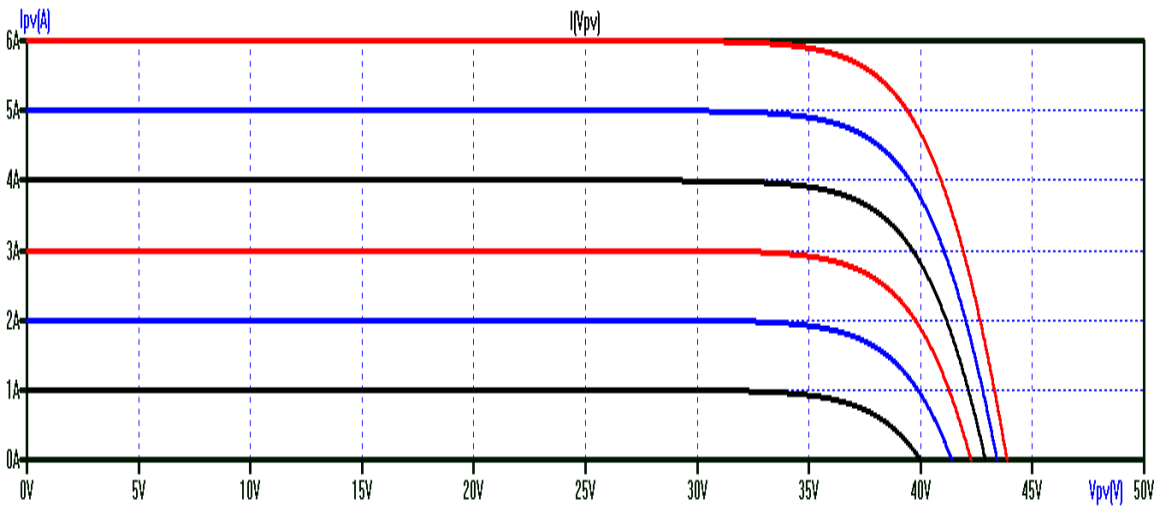
### IV-1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons simuler un système PV connecté au réseau sous certaines conditions. cette simulation est basée sur un logiciel d'analyse des circuits électrique (Ltspace). cette simulation nous a permis de mesurer la valeur des perturbations électromagnétiques (PEM,MD,MC) et l'étendue de leur propagation dans le système, et cela a été fait à l'aide d'un Appareil de mesure du perturbation (Rsil) .Grâce à cette simulation, les sources de perturbations électromagnétiques sont connues.

### IV-2 Simulation dans le domaine fréquentiel du panneau solaire:



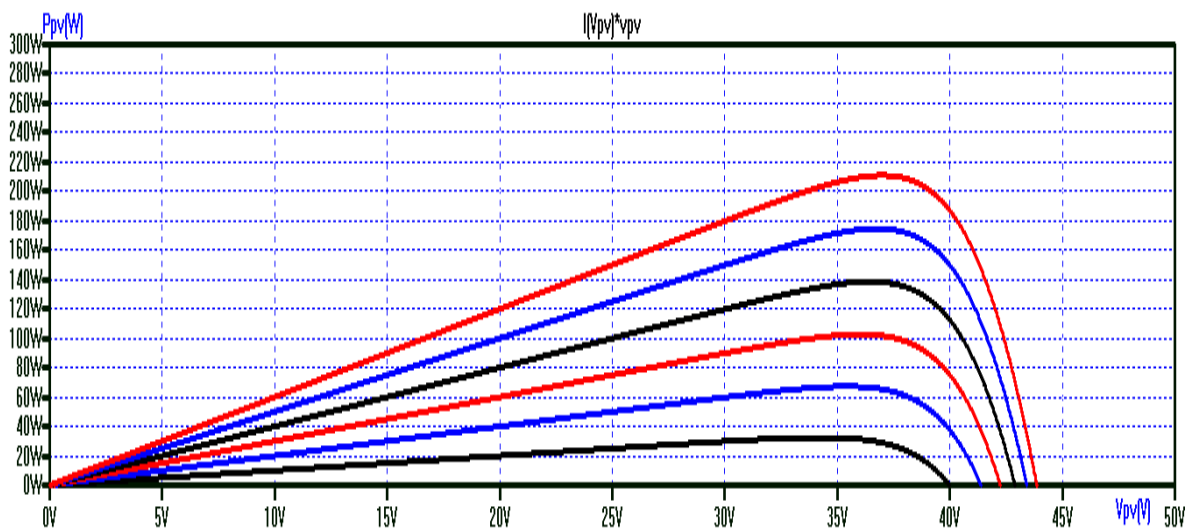
**Figure (IV.1):** Schéma bloc simulé d'un panneau solaire dans l'environnement LTspice.



**Figure (IV.2):** Résultats de simulation des caractéristiques I-V selon l'éclairement.

\*On remarque que la valeur du courant de court-circuit ( $I_{cc}=6A$ ) est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

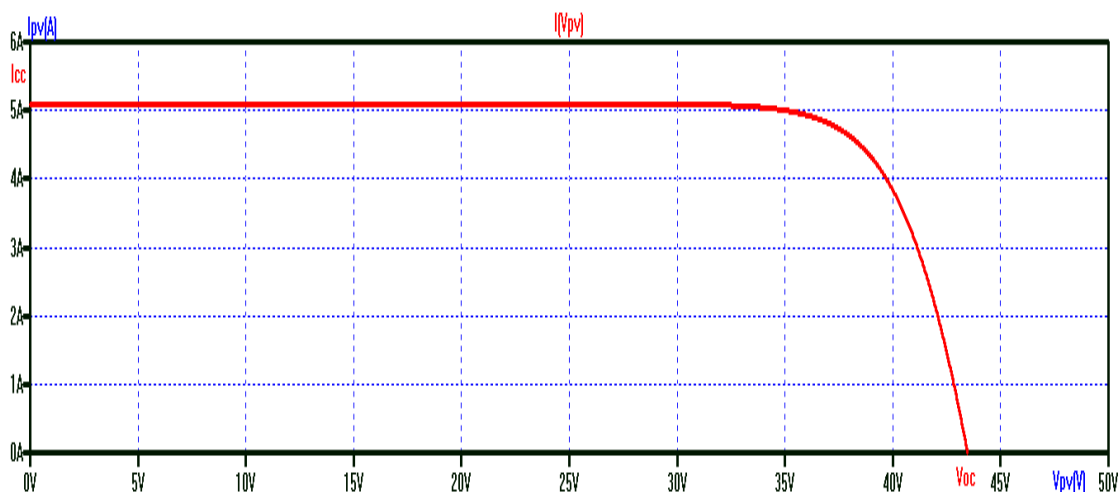
Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.



**Figure (IV.3) :** Résultats de simulation des caractéristiques P-V selon l'éclairement.

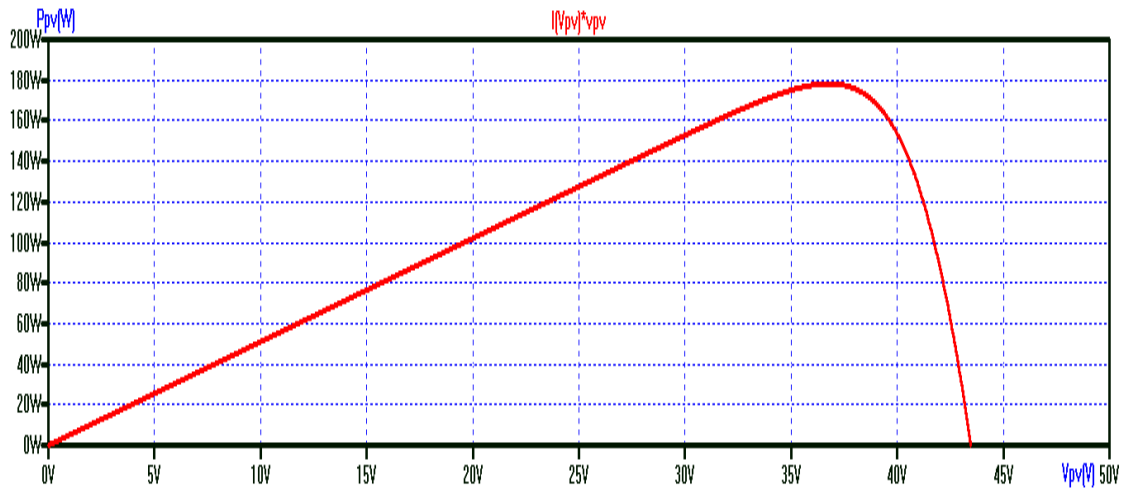
la figure (IV.3) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P=F(V)$ .

\* Lorsque l'éclairement augmente la tension et le courant augmente donc la puissance augmente.



**Figure (IV.4) :** Résultats de simulation des caractéristiques I-V selon un intensité rayonnante de 1000W/m<sup>2</sup> et une température 25°C

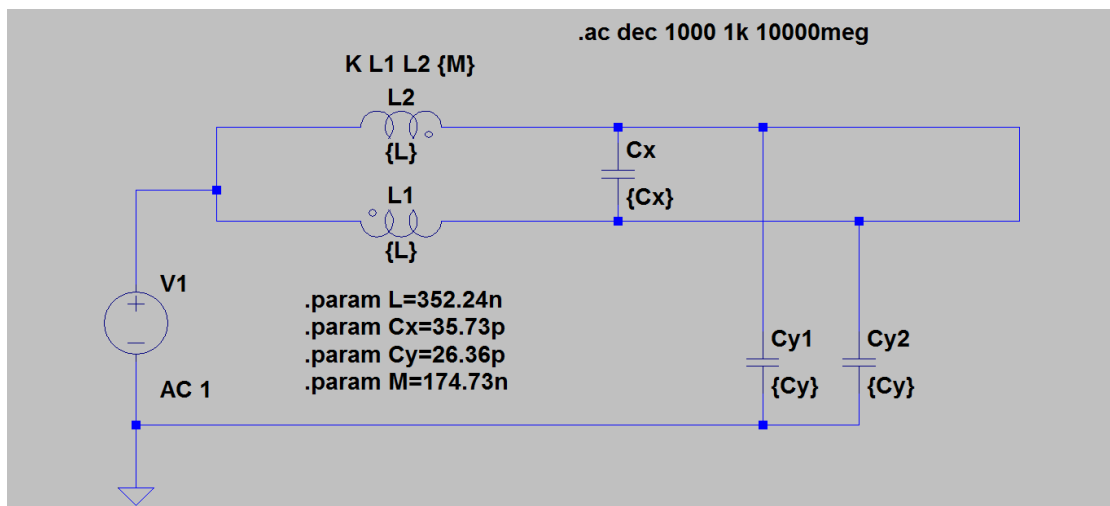
\* La figure (IV.4) présente la variation du courant du module en fonction de la tension à un éclairement fixe, On note que le courant reste constant jusqu'à V=26V puis il diminue jusqu'à son annulation.



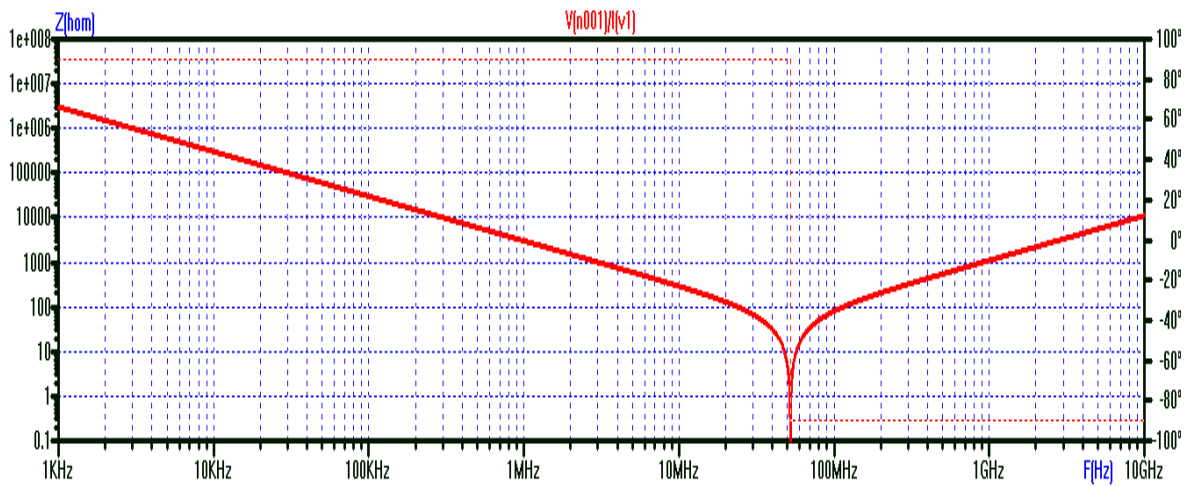
**Figure (IV.5) :** Résultats de simulation des caractéristiques P-V selon un intensité rayonnante de  $1000\text{W/m}^2$  et une température  $25^\circ\text{C}$ .

\* La figure (IV.5) présente l'évolution de la puissance du module en fonction de la tension à éclairage fixe, on note que la puissance augmente jusqu'à  $P=178.26(\text{W})$  puis elle diminue.

### IV-3 Simulation dans le domaine fréquentiel de câble (DC):

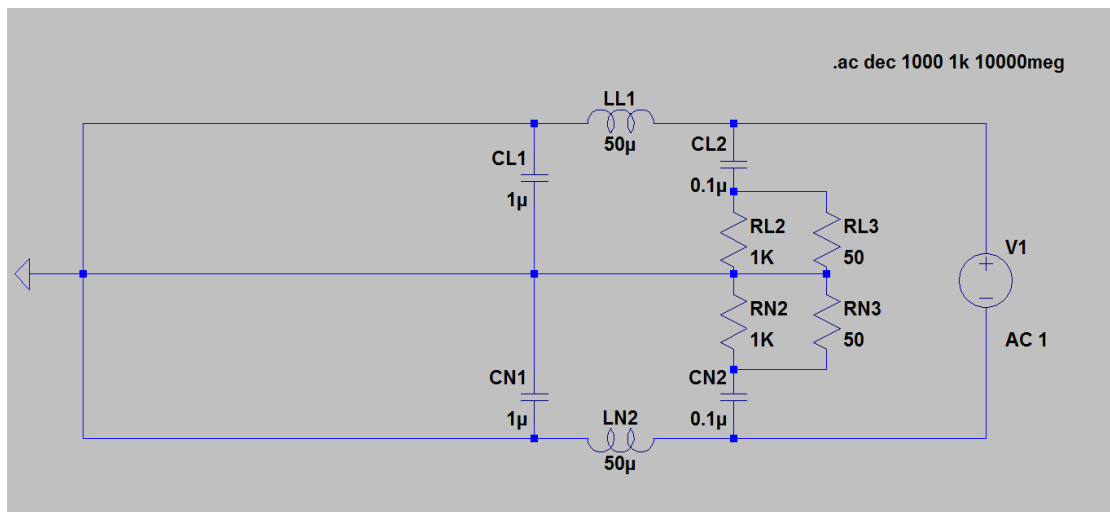


**Figure(IV.6):** Schéma de circuit équivalent simulé de câble (DC) dans l'environnement LTspice.

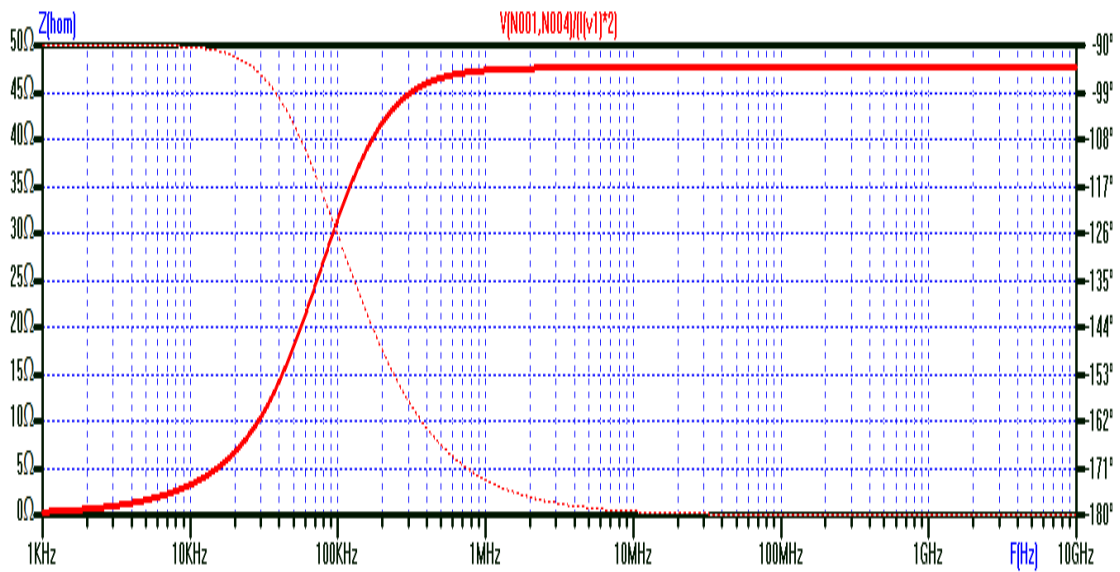


Figure(IV.7) : Impédances simulés du câble DC.

IV-4 Simulation dans le domaine fréquentiel de RSIL CISPR 22:

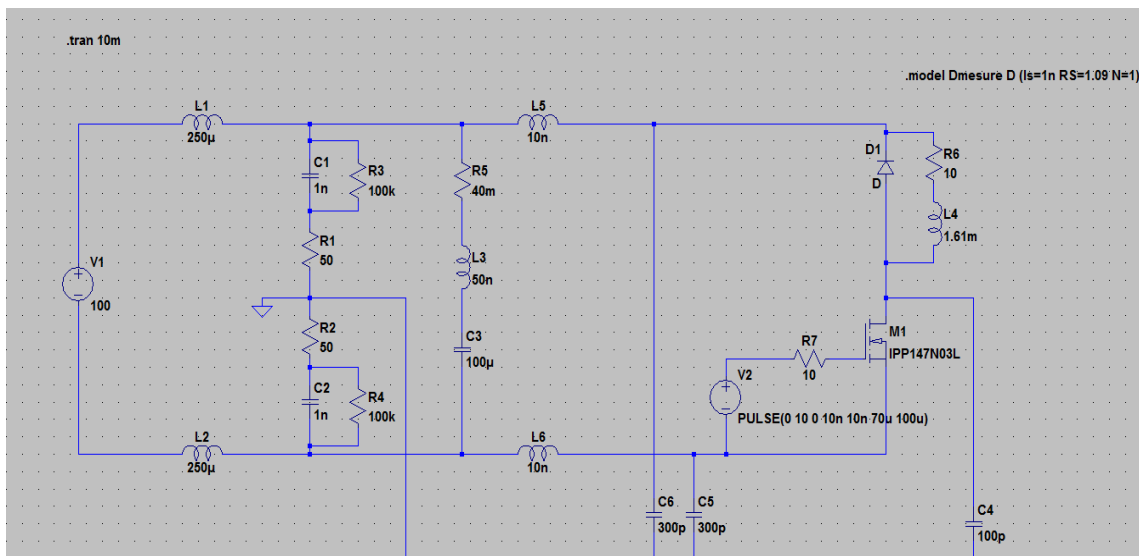


Figure(IV.8): Schéma de circuit équivalent simulé de RSIL CISPR 22 dans l'environnement LTspice.



Figure(IV.9) : Impédance de mode commun du CISPR 22 monophasé.

IV-5 Simulation dans le domaine fréquentiel de hacheur :



Figure(IV.10) : Schéma de circuit équivalent simulé du hacheur dans l'environnement LTspice.

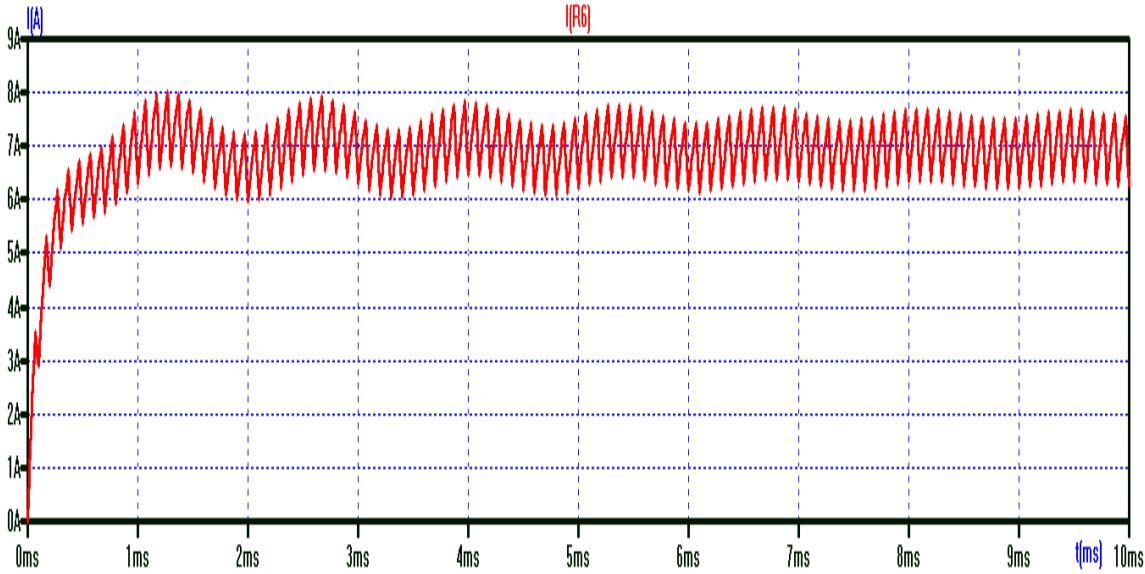


Figure (IV.11) : Résultats de simulation de courant sortant hacheur.

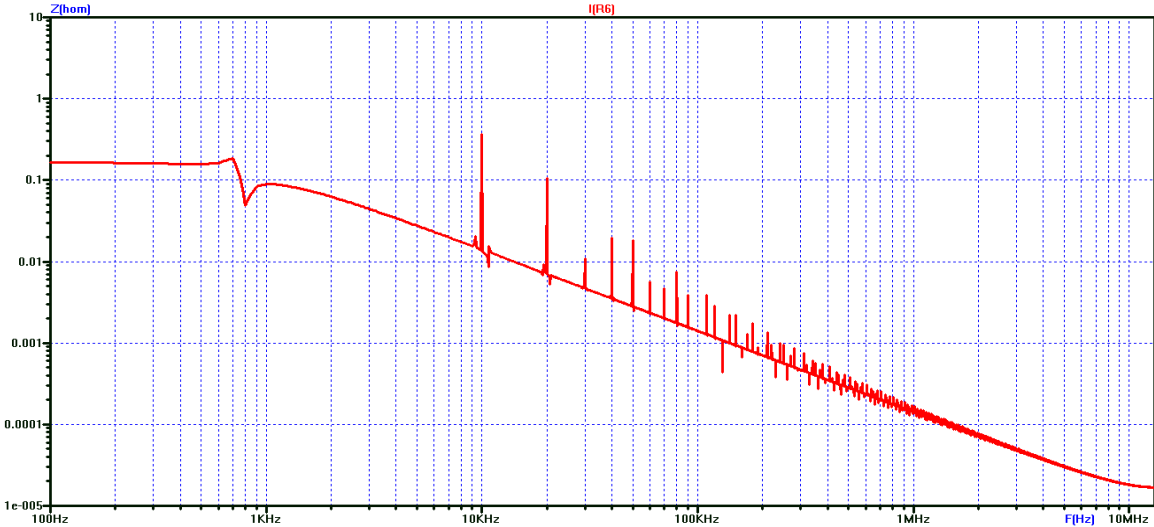
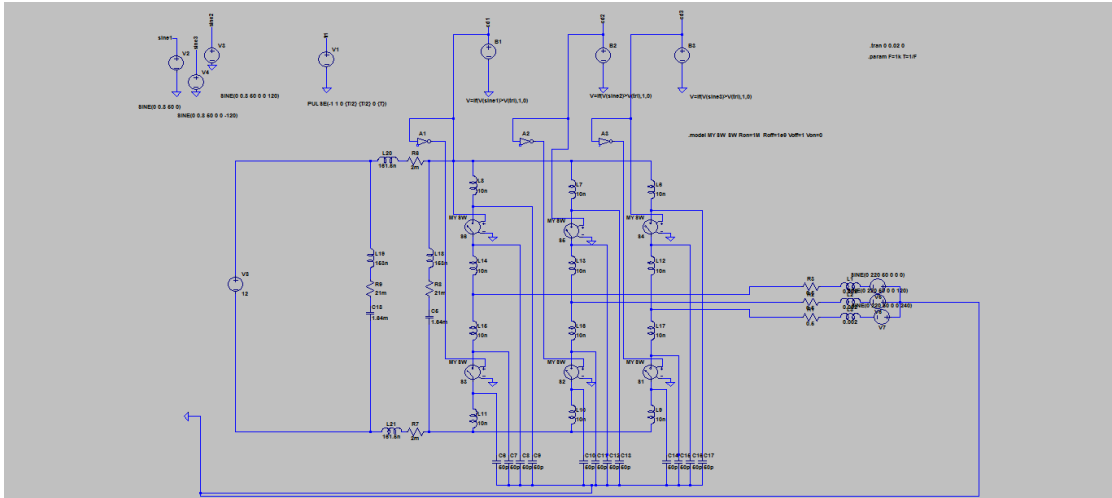


Figure (IV.12) : Représentation spectrale des perturbations de courant sortant de hacheur.

IV-6 Simulation dans le domaine fréquentiel d'onduleur:



Figure(IV.13) : Schéma de circuit équivalent simulé d'onduleur dans l'environnement LTspic

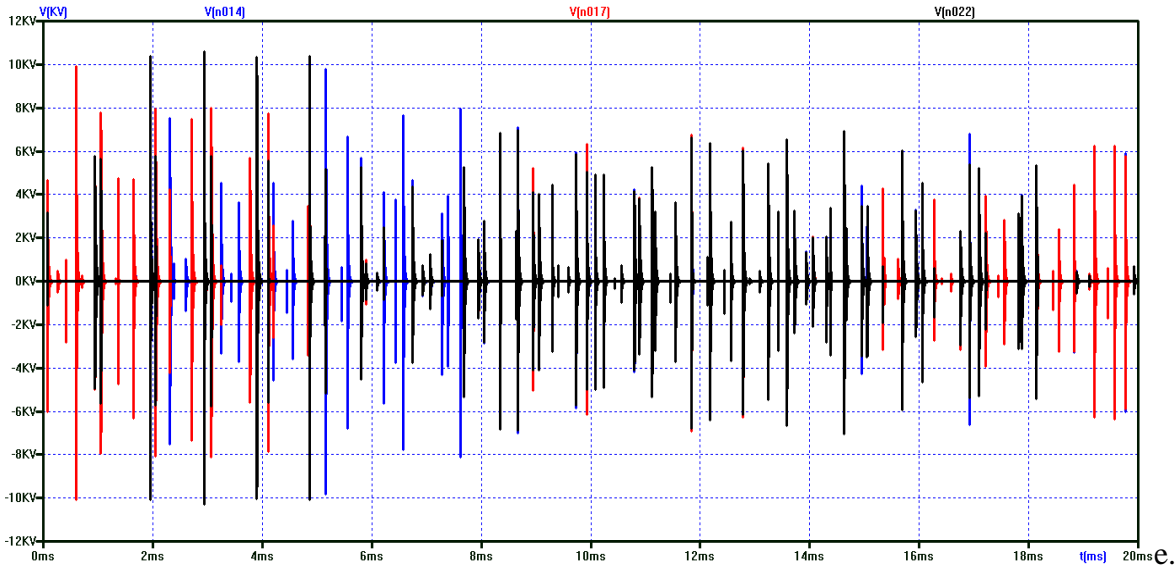


Figure (IV.14) : Résultats de simulation de tension sortant d'onduleur.

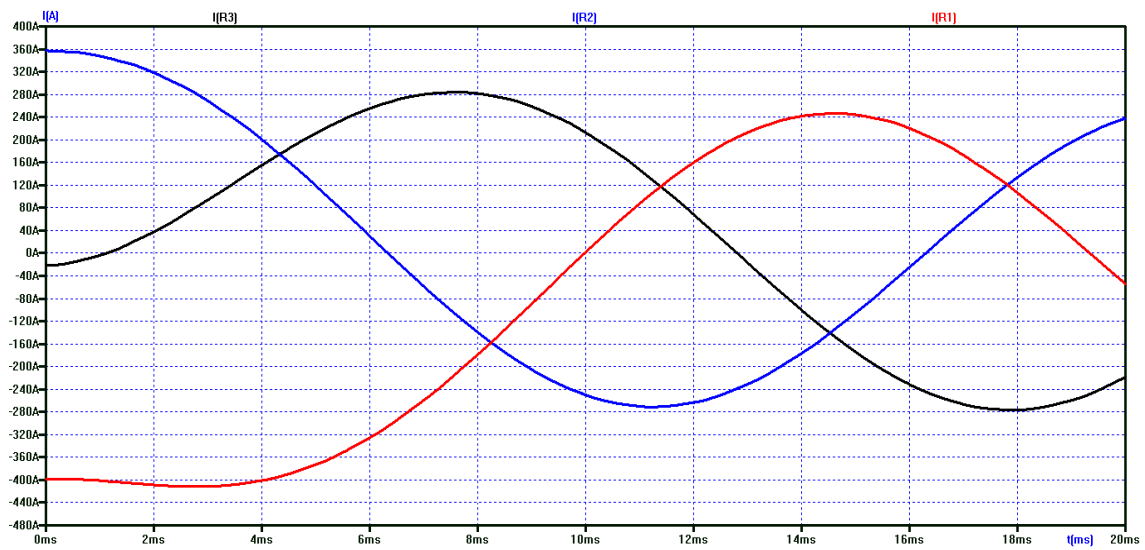


Figure (IV.15) : Résultats de simulation de courant sortant d'onduleur.

**IV-7 Reproduction du spectre (source de perturbations) aux bornes du hacheur:**

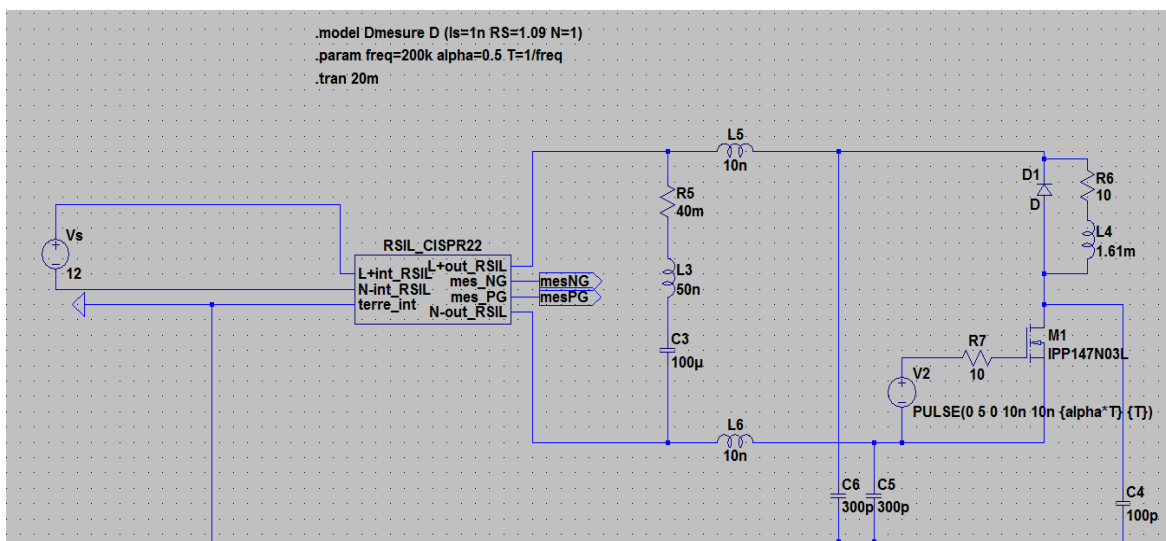
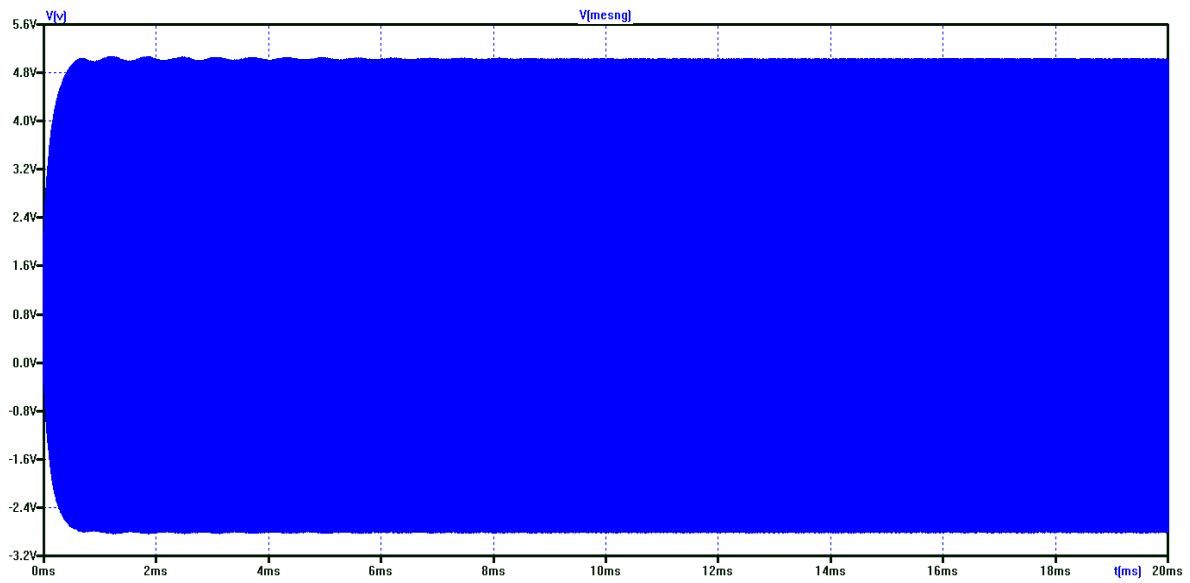
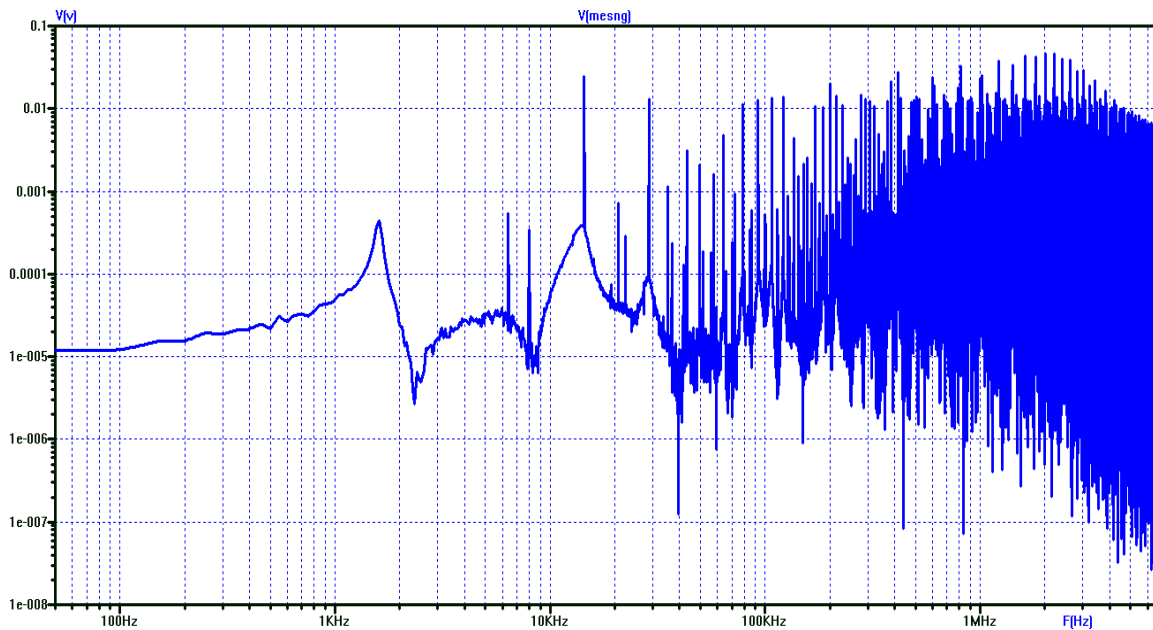


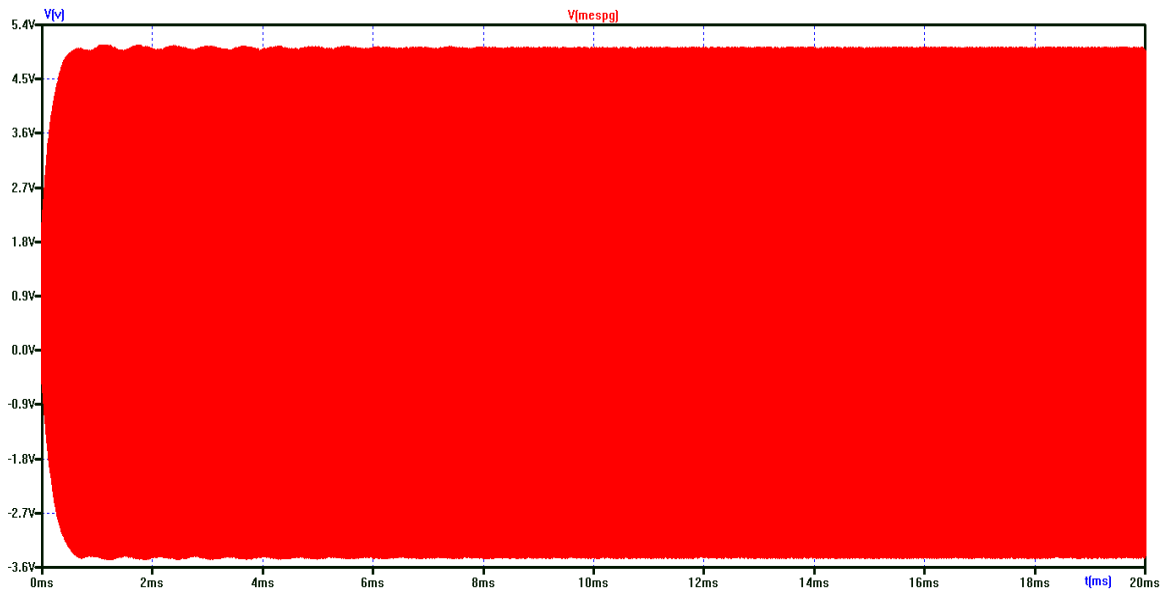
Figure (IV.16) : Schéma électrique simulé d'un hacheur série alimenté par une source continue à travers un RSIL.



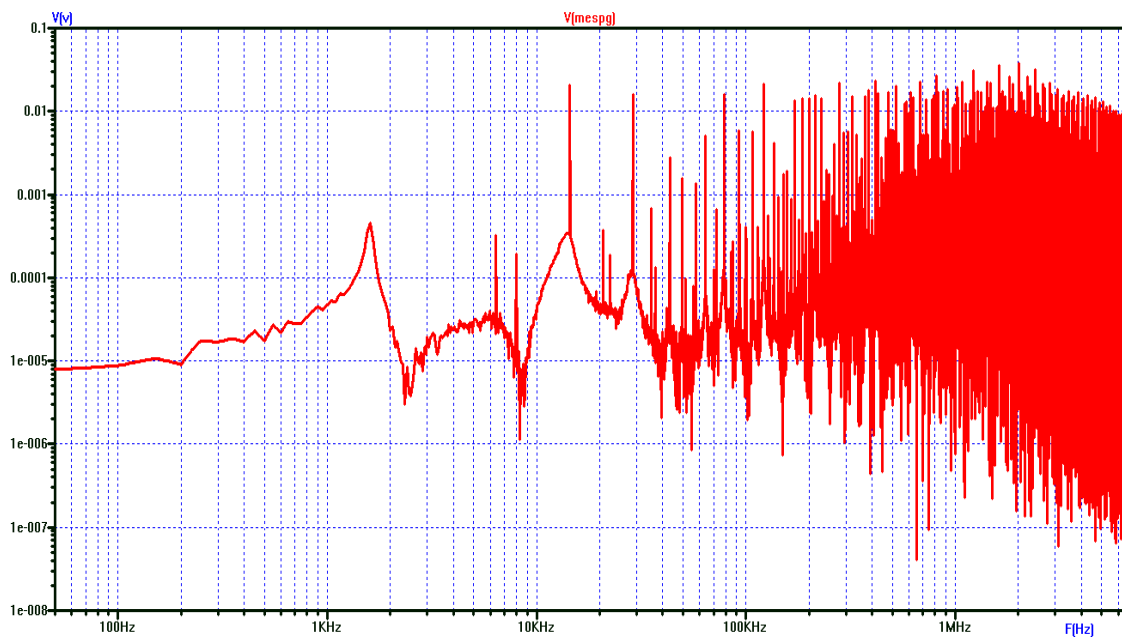
**Figure (IV.17):** Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.



**Figure (IV.18):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un hacheur.

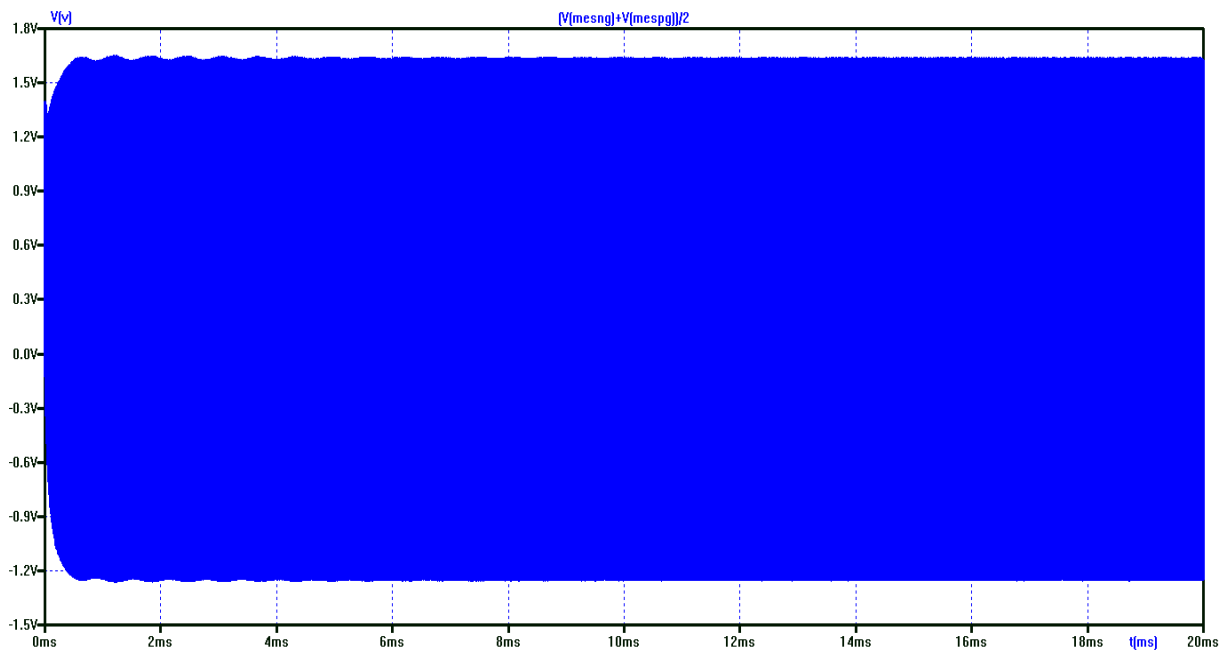


**Figure (IV.19):** Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.



**Figure (IV.20):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un hacheur.

Dans la figure (IV.20 et IV.18) les deux courbes représentent la perturbation de tension entre le neutre et la terre ( $V_{mesng}$ ) en fonction de la perturbation de fréquence et la tension entre la phase et la terre ( $V_{mespg}$ ) en fonction de la fréquence. Là où on note au début de la mesure, l'absence de perturbations est enregistrée à 0 (Hz) jusqu'à ce que la première valeur de 0,0046 (V) soit enregistrée à fréquence 2,34 kHz. A partir de cette valeur, les perturbations commencent à augmenter jusqu'à ce qu'elles atteignent leur valeur la plus élevée de 0,05 (V) à une fréquence de 2 (MHz), et à cette valeur elles commencent à diminuer.



**Figure (IV.21):** Résultats de simulation de tension MC sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.

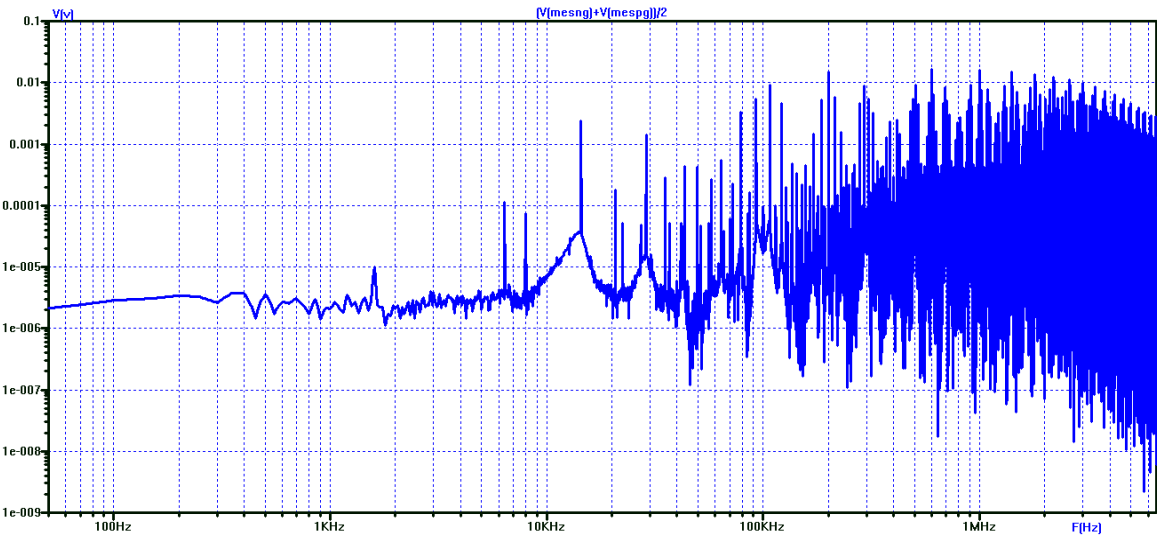


Figure (IV.22): Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un hacheur.

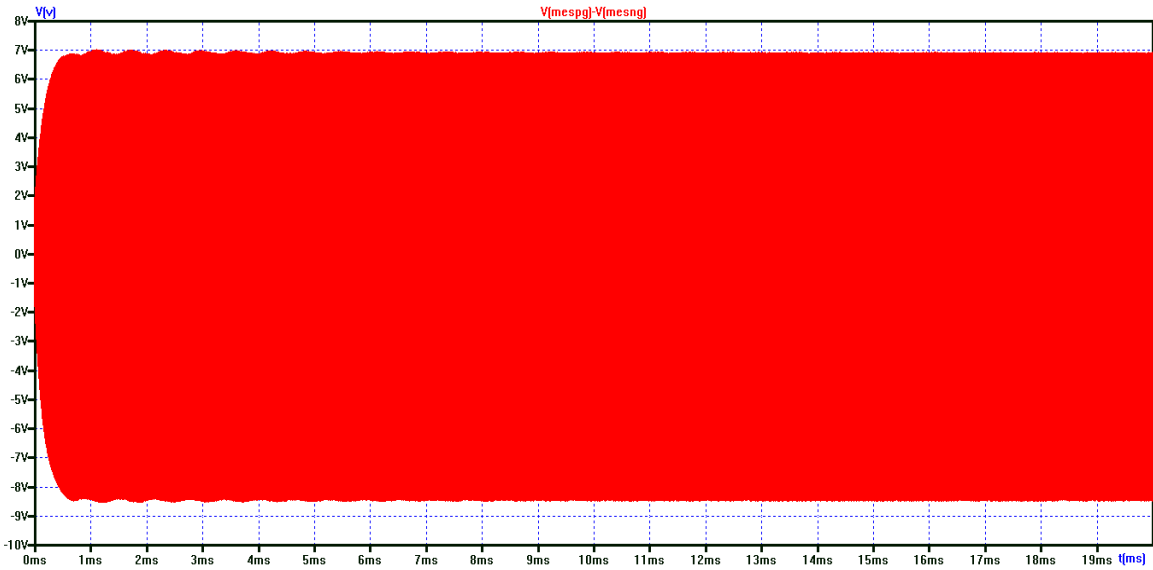


Figure (IV.23): Résultats de simulation de tension MD sortant d'un hacheur série alimenté par une source Continue à travers un RSIL.

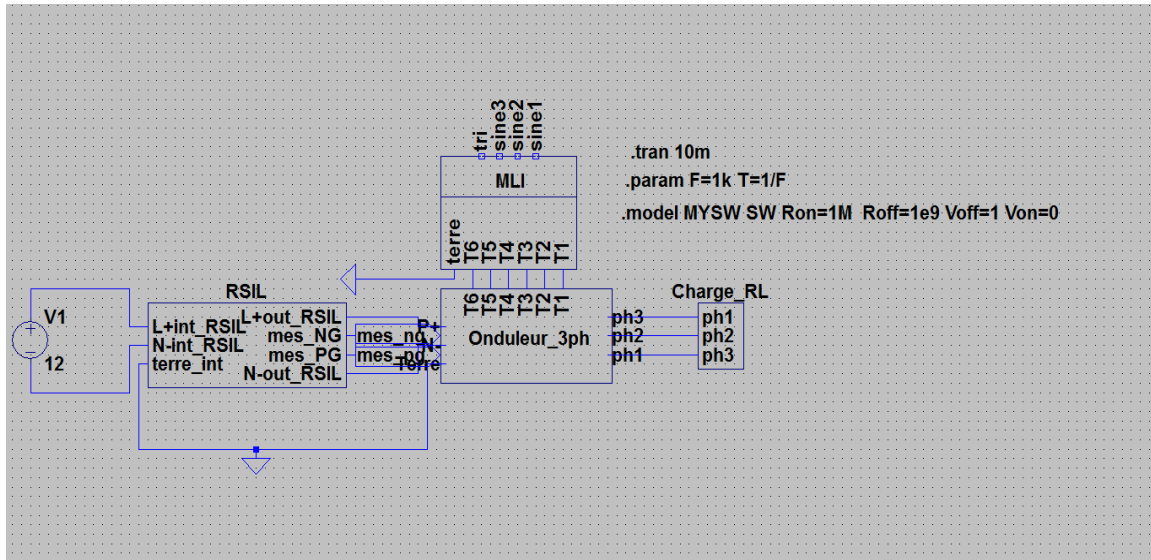


**Figure (IV.24):** Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un hacheur.

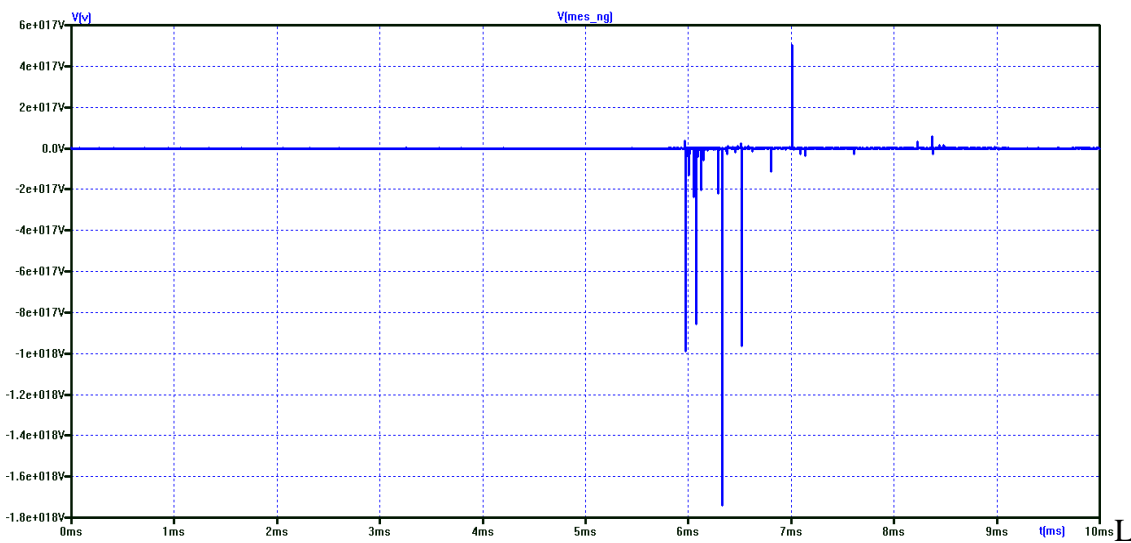
\* dans la figure (IV.22) nous remarquons la courbe de perturbation de tension de mode commun en fonction de fréquence .au début de la mesure, l'absence de perturbations est enregistrée à 0 (Hz) jusqu'à ce que la première valeur de 0,0024 (V) soit enregistrée à une fréquence de 452 (Hz), et à partir de cette valeur les perturbations commencent à augmenter jusqu'à atteindre sa valeur la plus élevée 0,02 (V) à une fréquence 600.06 (KHz), et à cette valeur, elle commence à diminuer.

\*dans la figure (IV.24) nous remarquons la courbe de perturbation de tension de mode différentiel en fonction de fréquence. au début de la mesure, l'absence de perturbations est enregistrée à 0 (Hz) jusqu'à ce que la première valeur de 0,0067(V) soit enregistrée à une fréquence de 2.34 (KHz), et à partir de cette valeur les perturbations commencent à augmenter jusqu'à atteindre sa valeur la plus élevée 0,1 (V) à une fréquence 2 (MHz), et à cette valeur, elle commence à diminuer

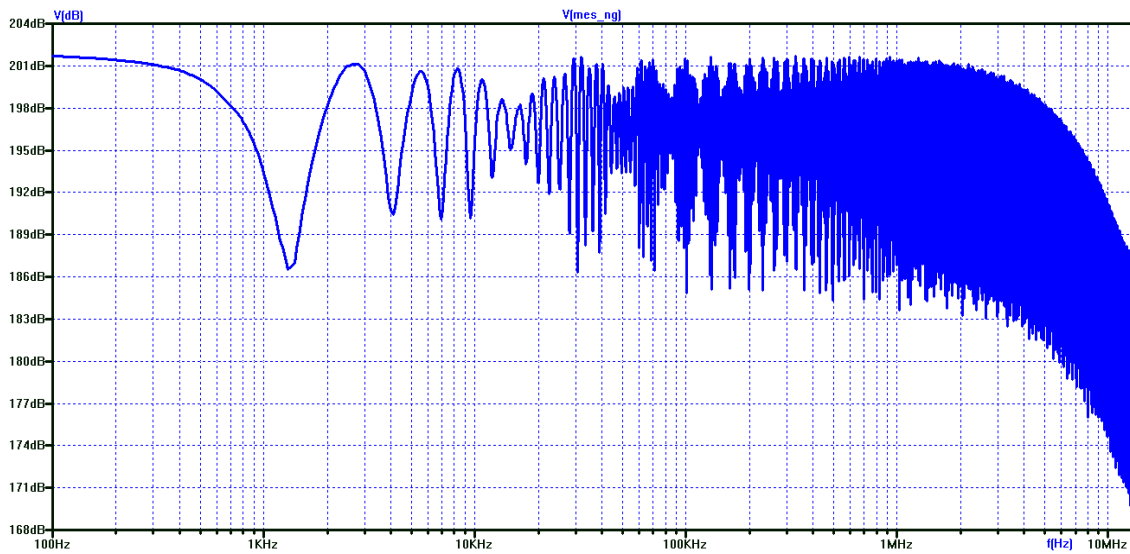
**.IV-8 Reproduction du spectre (source de perturbations) aux bornes de l'onduleur:**



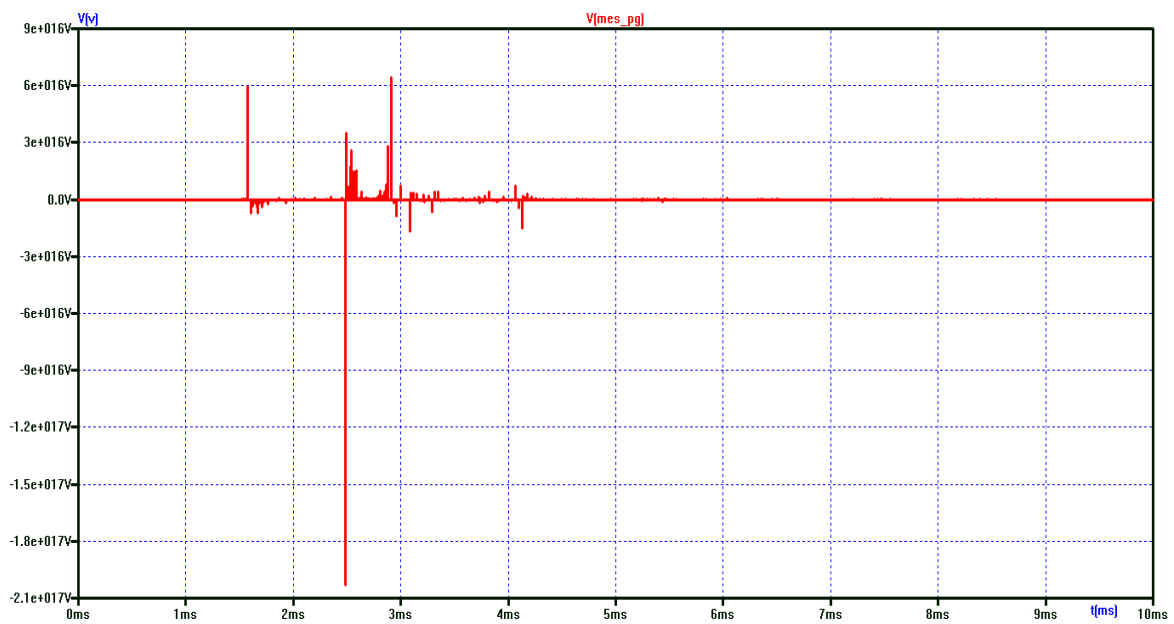
**Figure (IV.25):** Schéma électrique simulé d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.



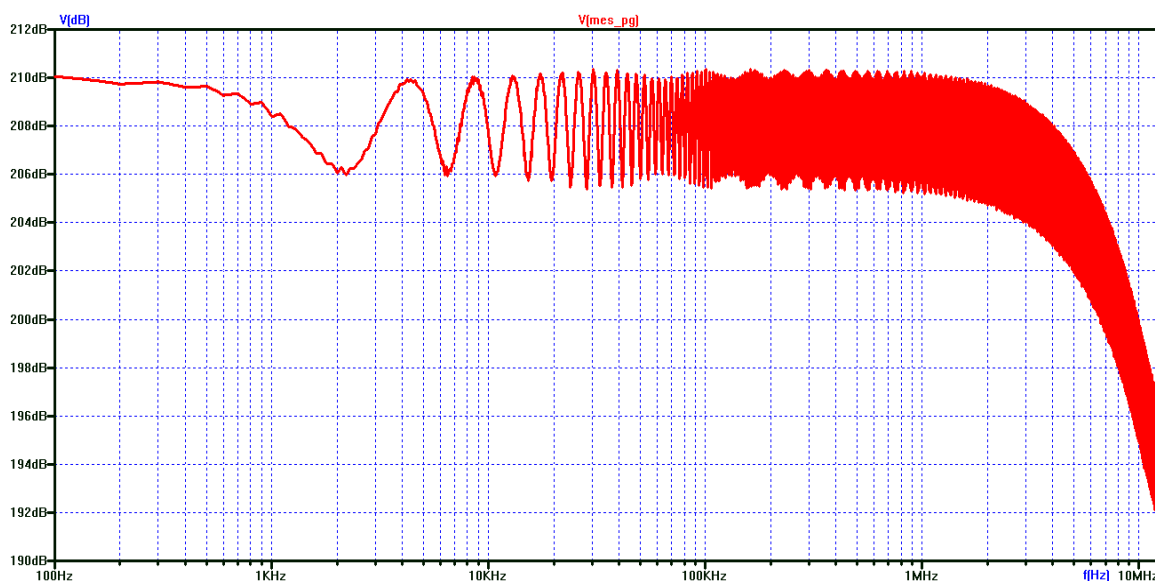
**Figure (IV.26):** Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.



**Figure (IV.27):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'onduleur.



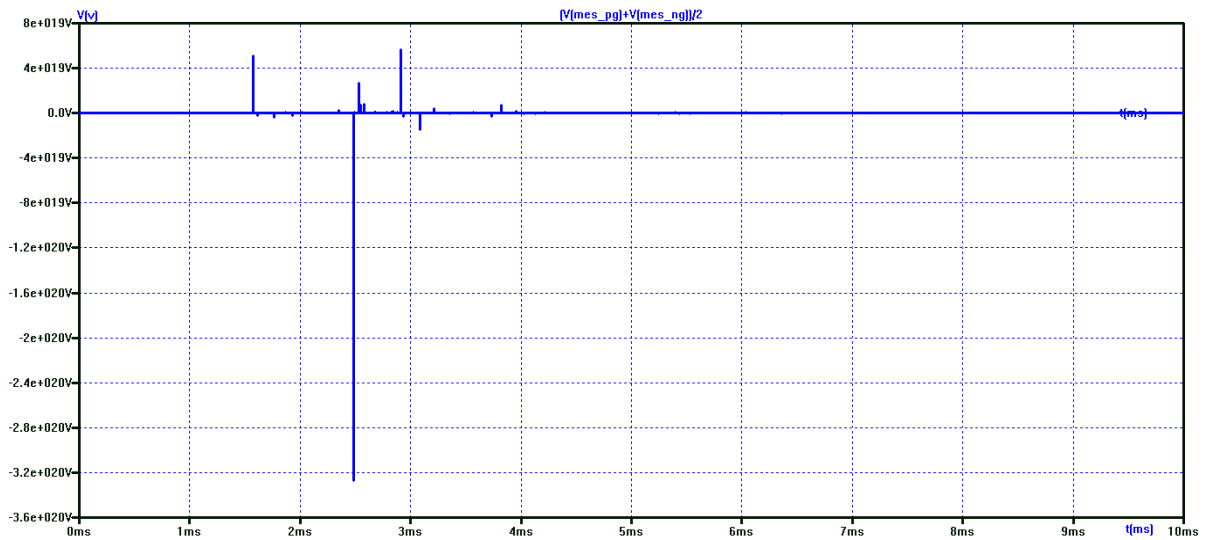
**Figure (IV.28):** Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.



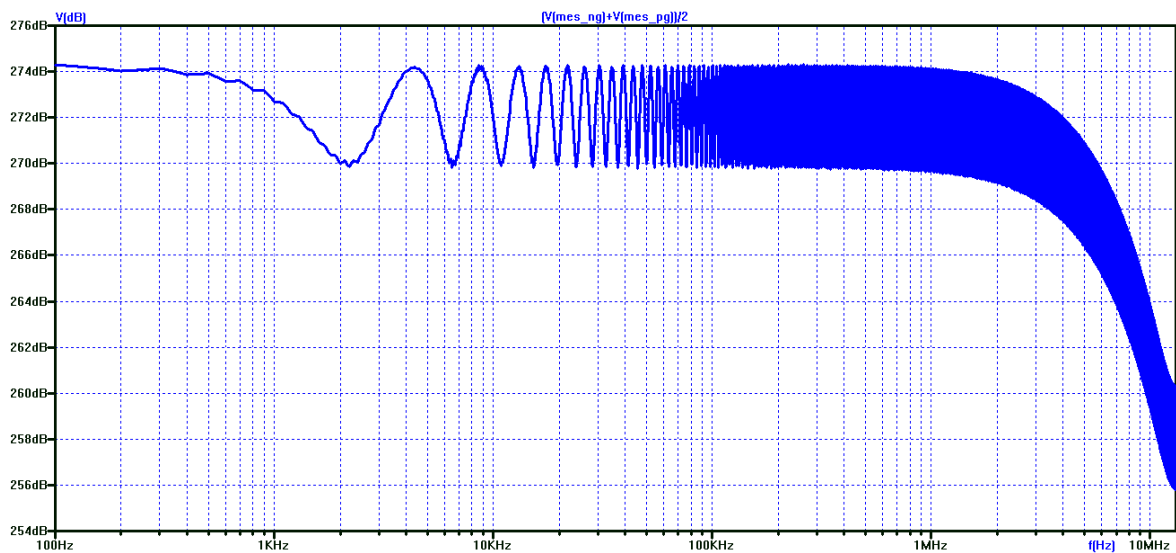
**Figure (IV.29):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d’onduleur.

\*dans la figure (IV.27) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( 187dB) à une fréquence (1.32KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (196.5dB) à une fréquence (334KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (187.5dB) à une fréquence (10.55MHz).

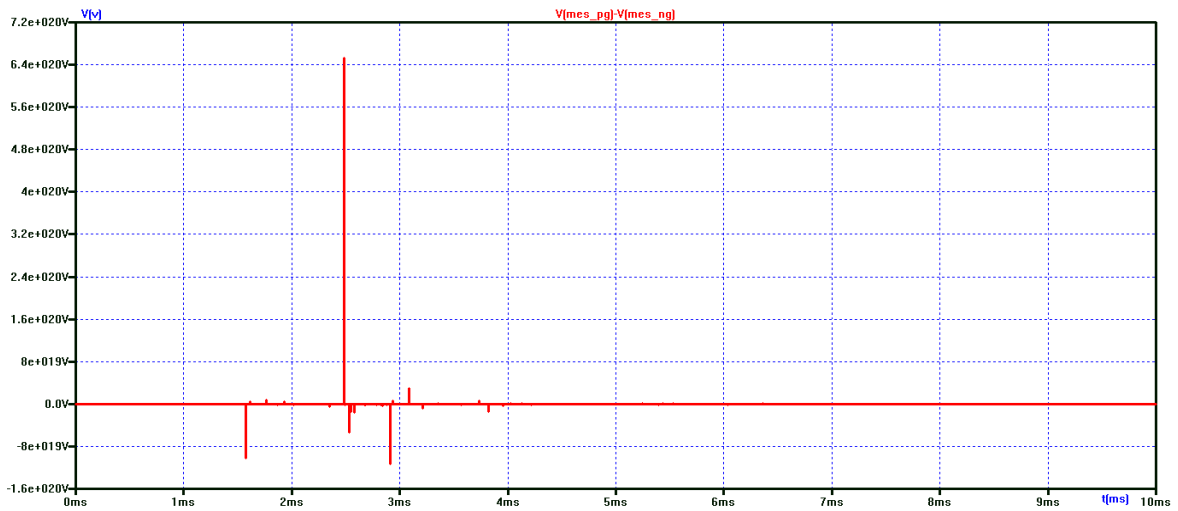
\*dans la figure (IV.29) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( 206dB) à une fréquence (2.23KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (210dB) à une fréquence (161.5KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (196.5dB) à une fréquence (11.93MHz).



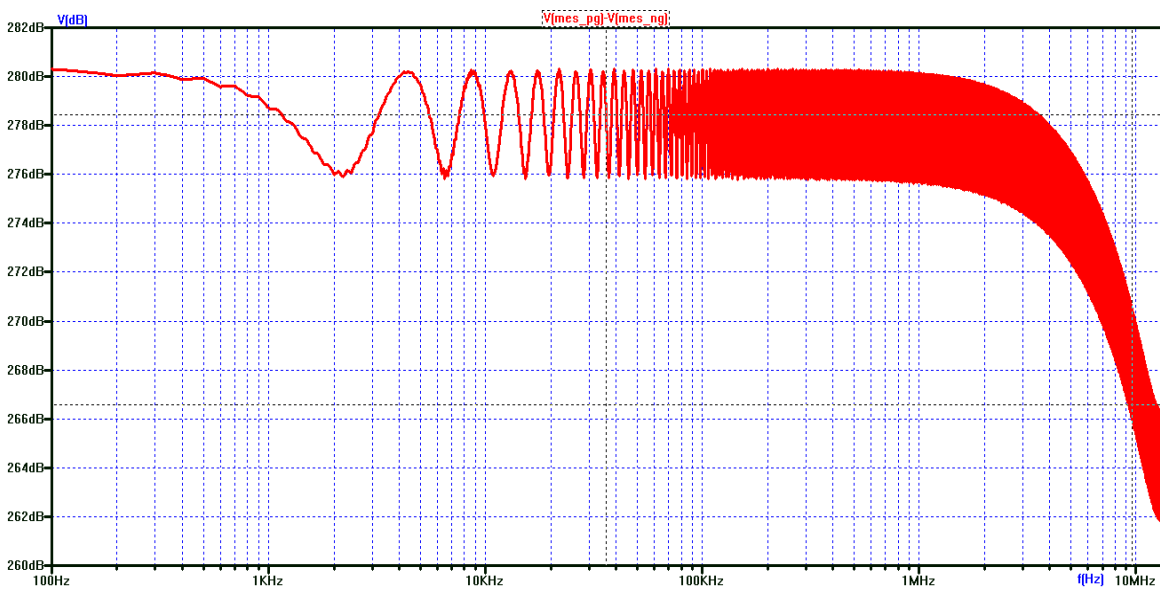
**Figure (IV.30):** Résultats de simulation de tension MC sortant d'onduleur alimenté par une source Continue à travers un RSIL.



**Figure (IV.31):** Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un onduleur.



**Figure (IV.32):** Résultats de simulation de tension MD sortant d'un onduleur alimenté par une source continue à travers un RSIL

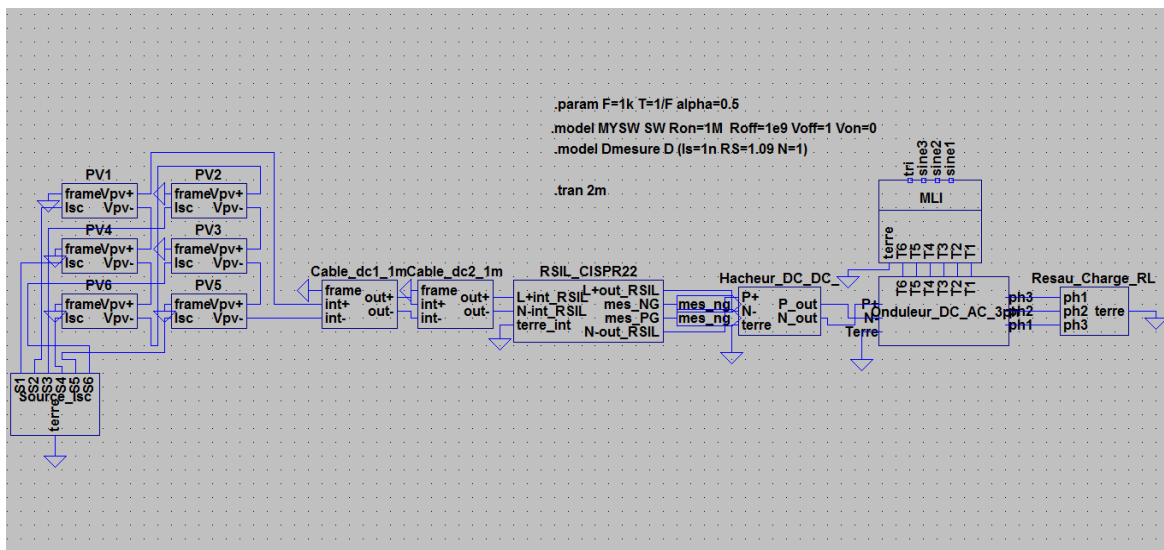


**Figure (IV.33):** Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un onduleur.

. \*dans la figure (IV.31) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( 270dB) à une fréquence (2.15KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (274.2dB) à une fréquence (61.12KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (260.5dB) à une fréquence (13.1MHz).

\*dans la figure (IV.33) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( 276dB) à une fréquence (2.13KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (280.2dB) à une fréquence (61.12KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (266.5dB) à une fréquence (10.96MHz).

**IV-9 Reproduction du spectre « perturbateur » aux bornes du RSIL d’association du panneau solaire –hacheur – onduleur et du réseau:**



**Figure (IV.34):** Schéma électrique simulé d’association du panneau solaire – RSIL hacheur – onduleur et du réseau.

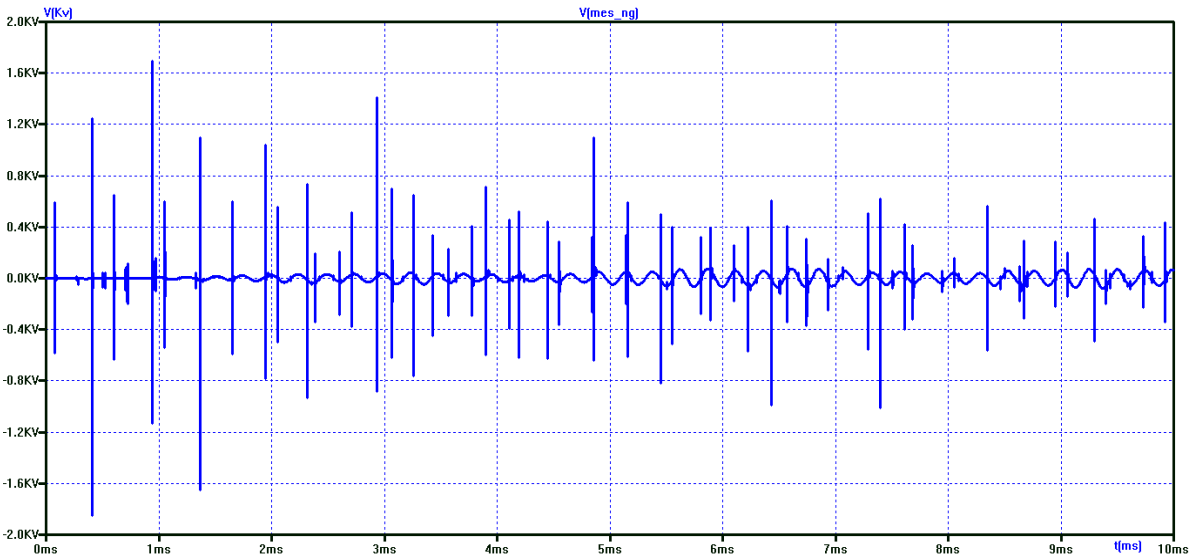


Figure (IV.35): Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire.

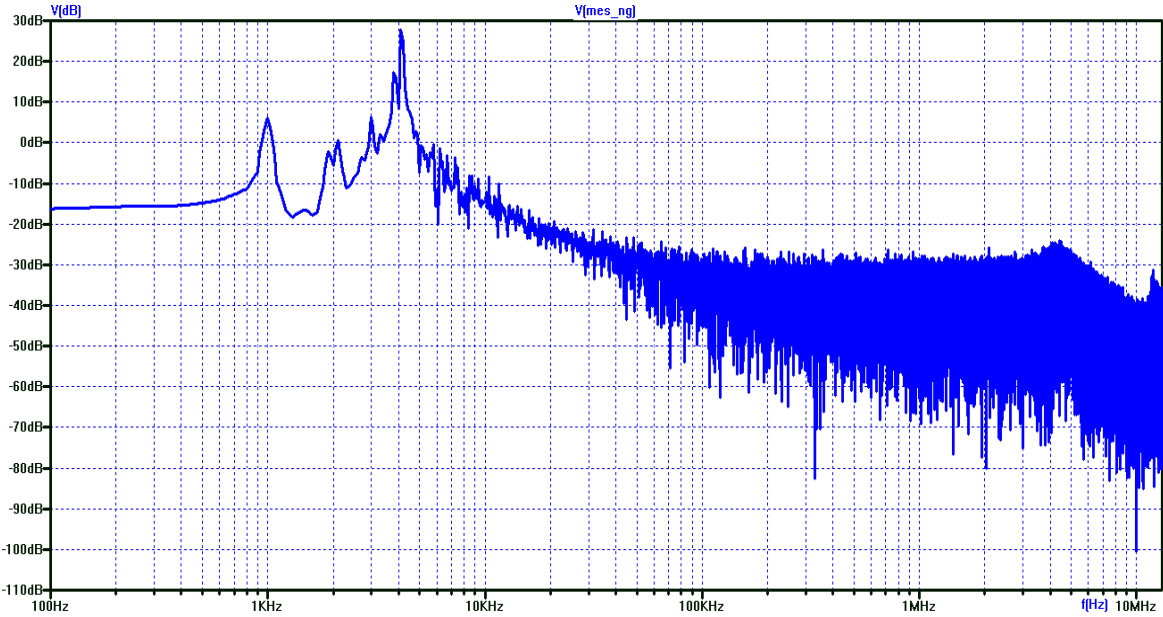


Figure (IV.36): Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire.

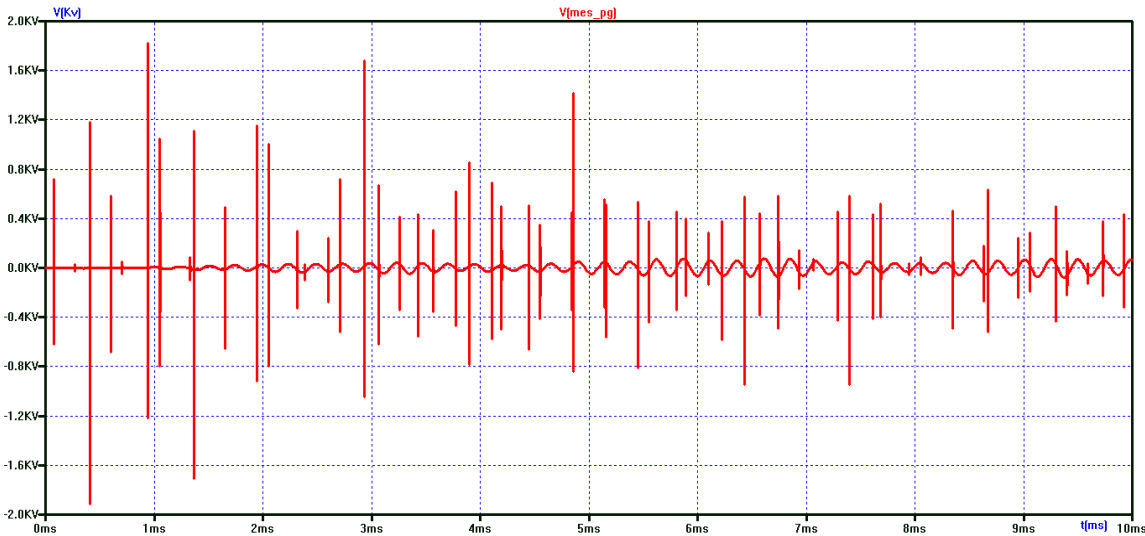


Figure (IV.37): Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire.

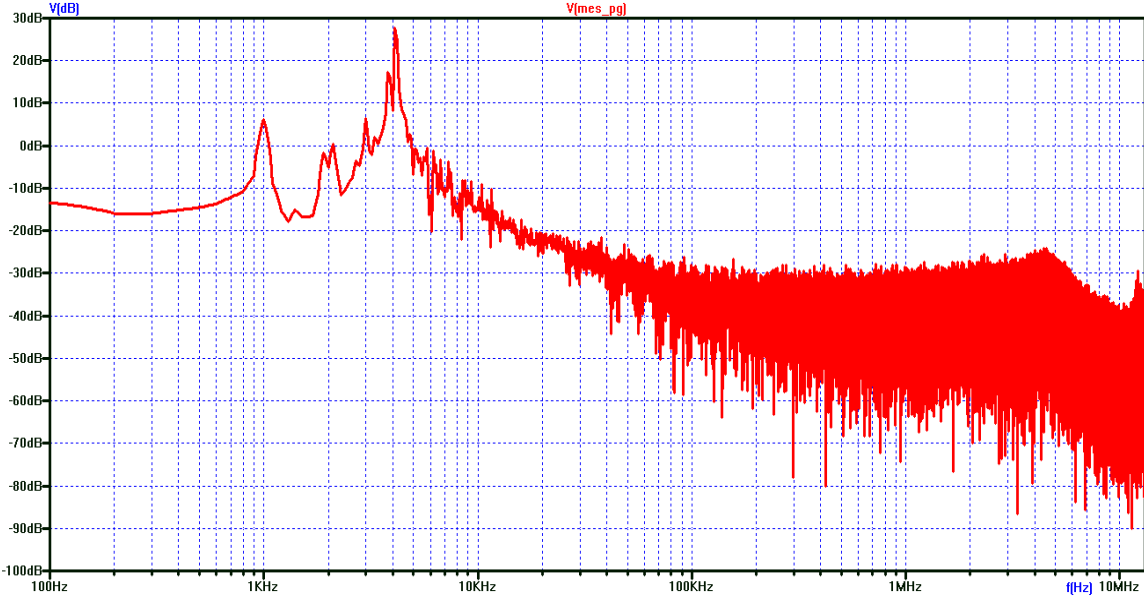
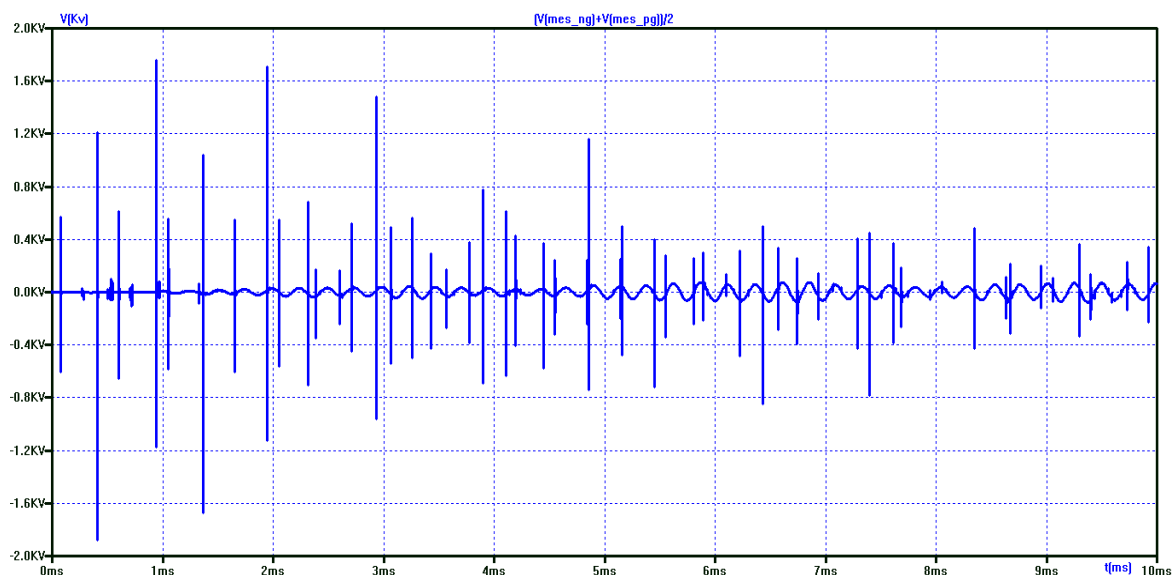


Figure (IV.38): Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire.

\*dans la figure (IV.36) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -5dB) à une fréquence (2.009KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (28dB) à une fréquence (4.1MHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-39dB) à une fréquence (10.95MHz).

\*dans la figure (IV.38) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -5dB) à une fréquence (1.99KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (28dB) à une fréquence (4.1KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-39dB) à une fréquence (10.51MHz).



**Figure (IV.39):** Résultats de simulation de tension MC sortant d'un panneau solaire

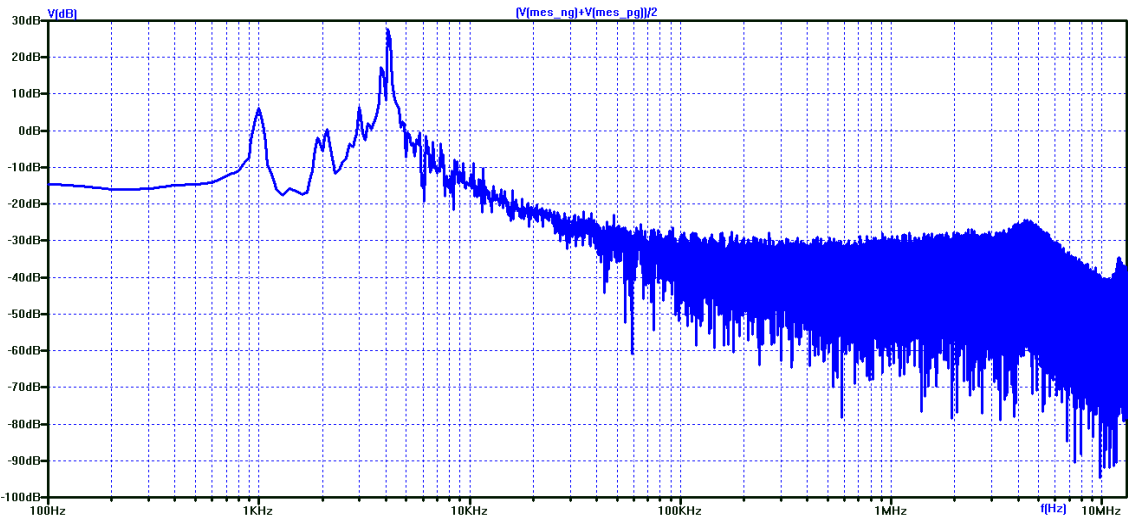


Figure (IV.40): Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un panneau solaire

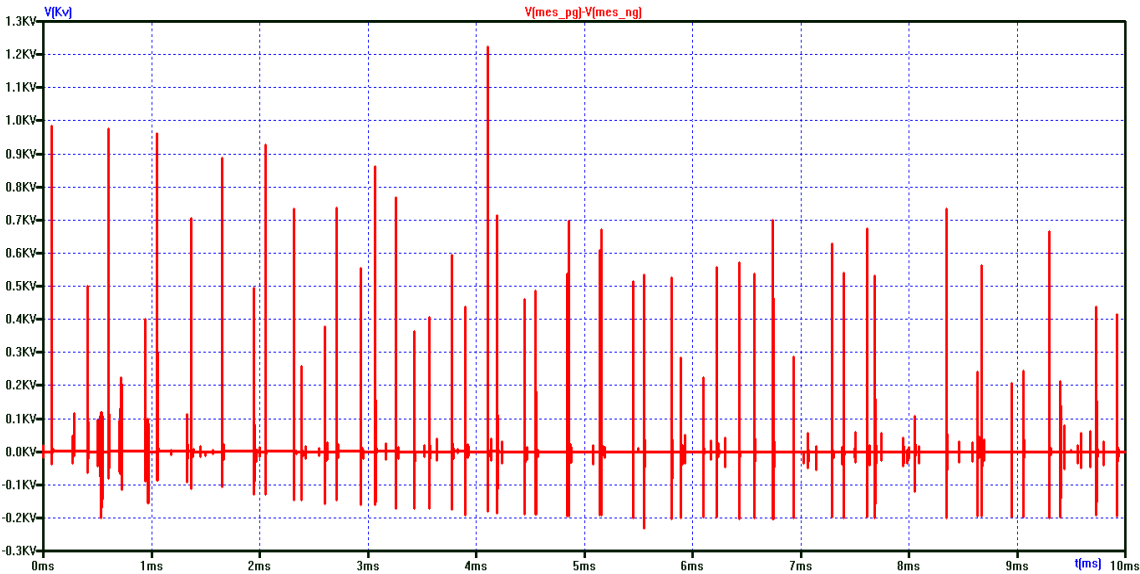
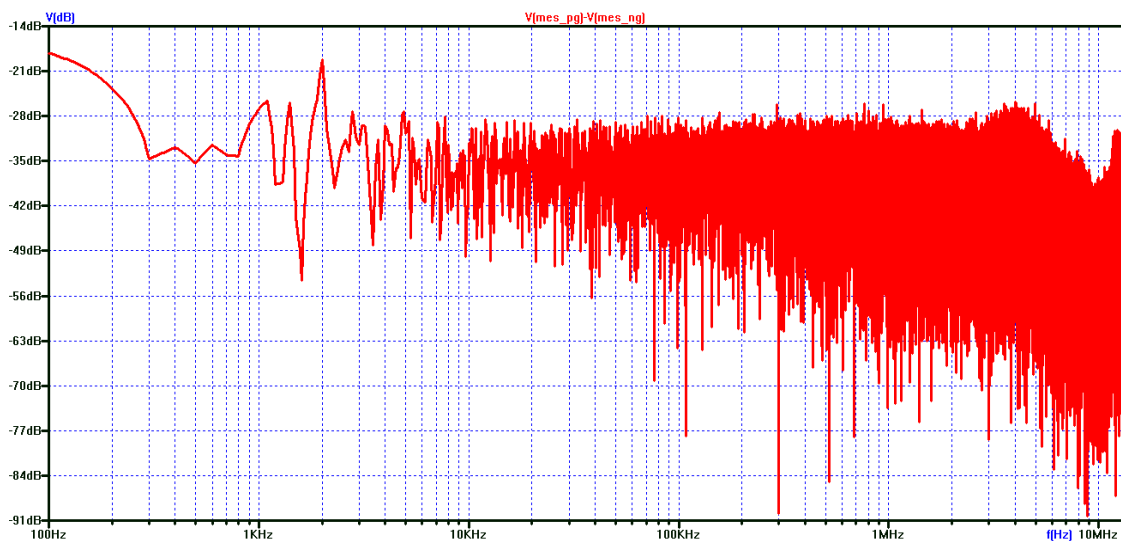


Figure (IV.41): Résultats de simulation de tension MD sortant d'un panneau solaire

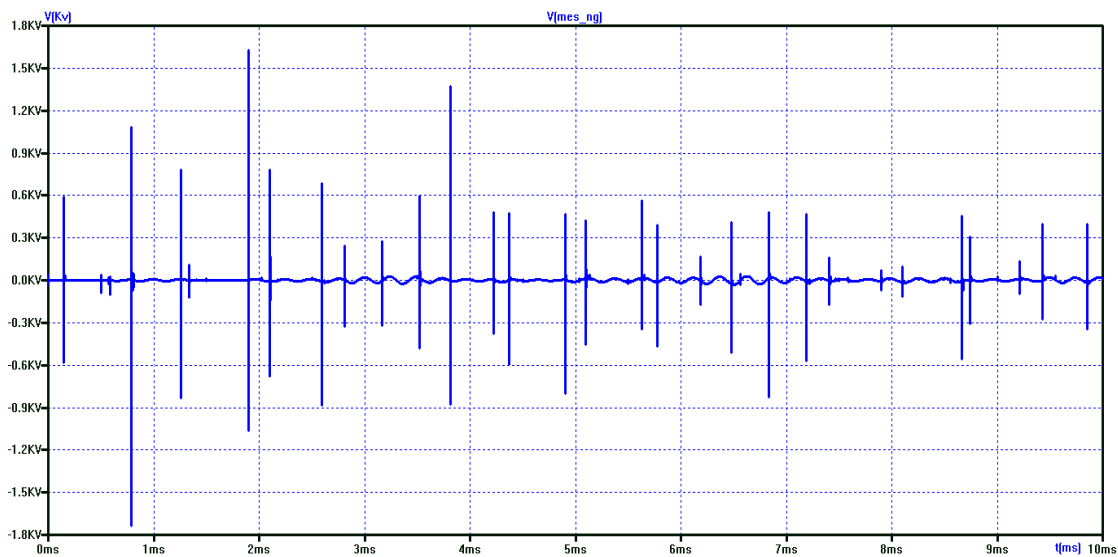


. **Figure (IV.42):** Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un panneau solaire.

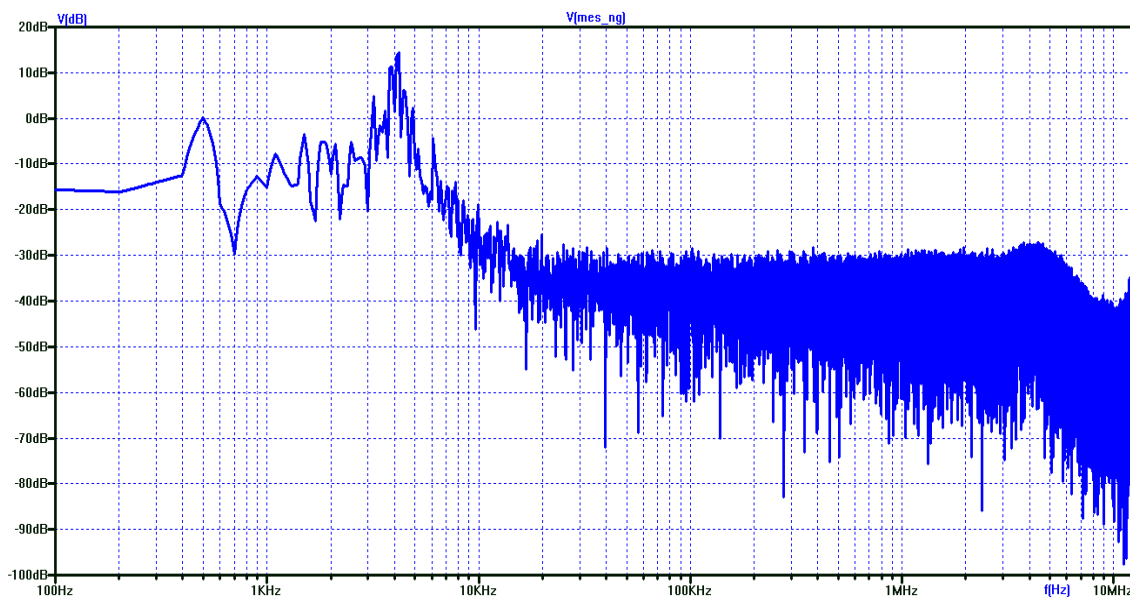
\*dans la figure (IV.40) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -5dB) à une fréquence (2.009KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (28dB) à une fréquence (4.1KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-42dB) à une fréquence (10.02MHz).

\*dans la figure (IV.42) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -26dB) à une fréquence (1.4KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (-19dB) à une fréquence (2.008KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-46dB) à une fréquence (1.59KHz).

**IV-9-1 Influence des stratégies de la commande sur les PEM:**



**Figure (IV.43):** Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau sol aire 2T.



**Figure (IV.44):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 2T.

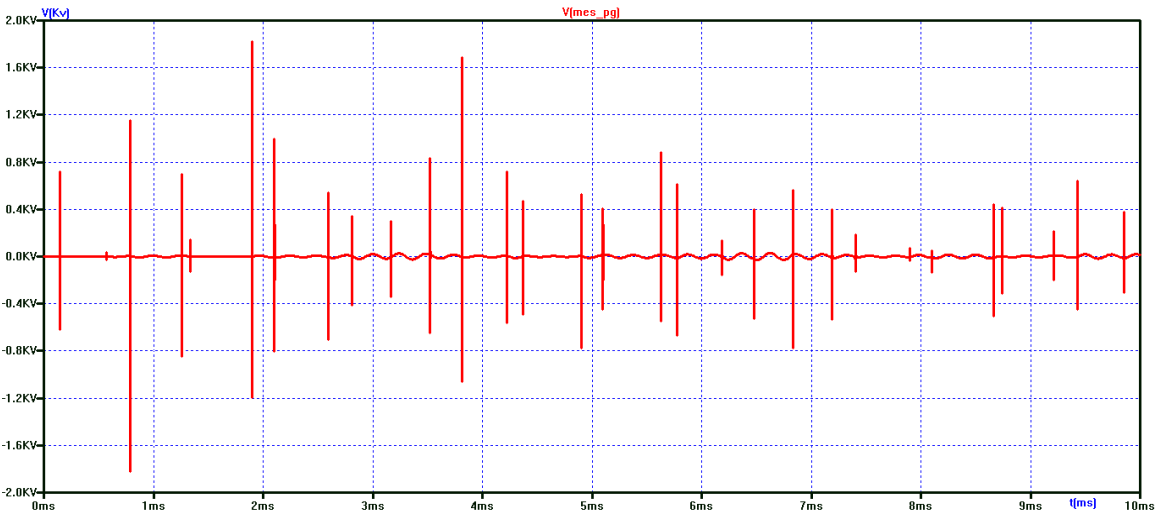


Figure (IV.45): Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 2T

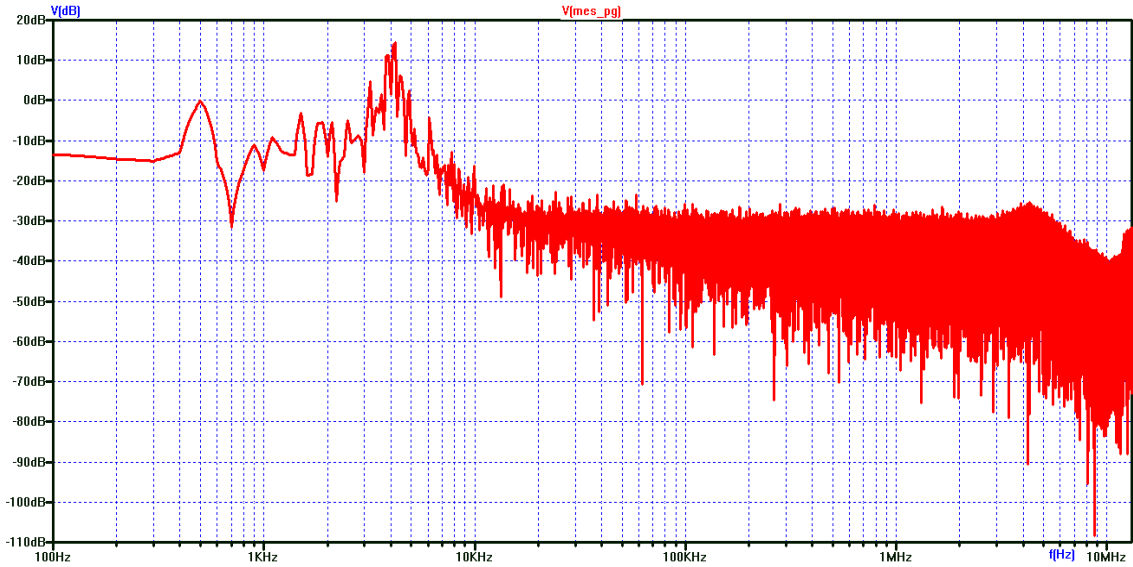
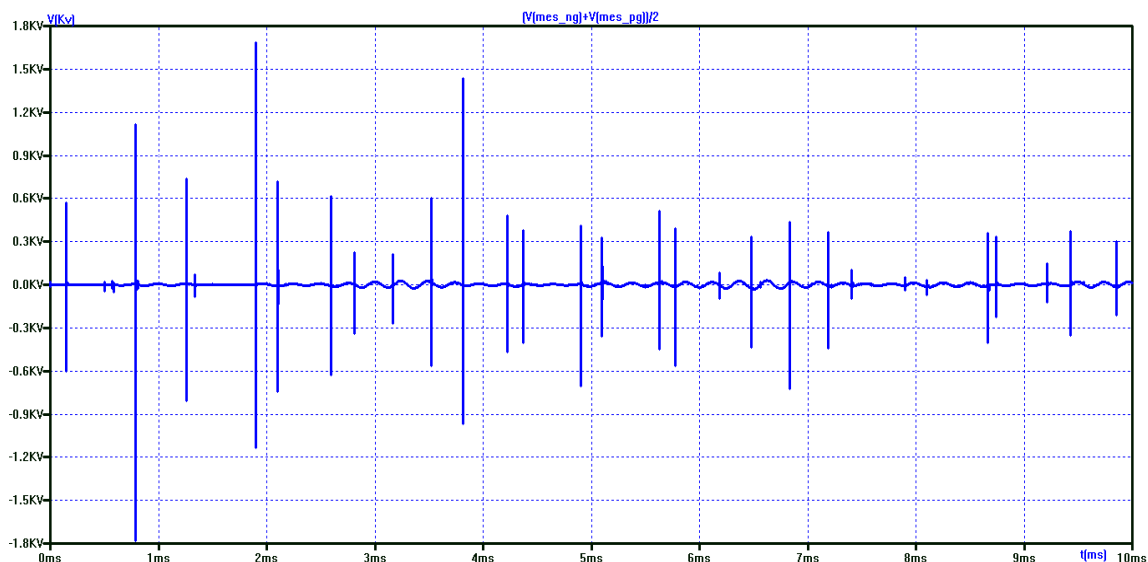


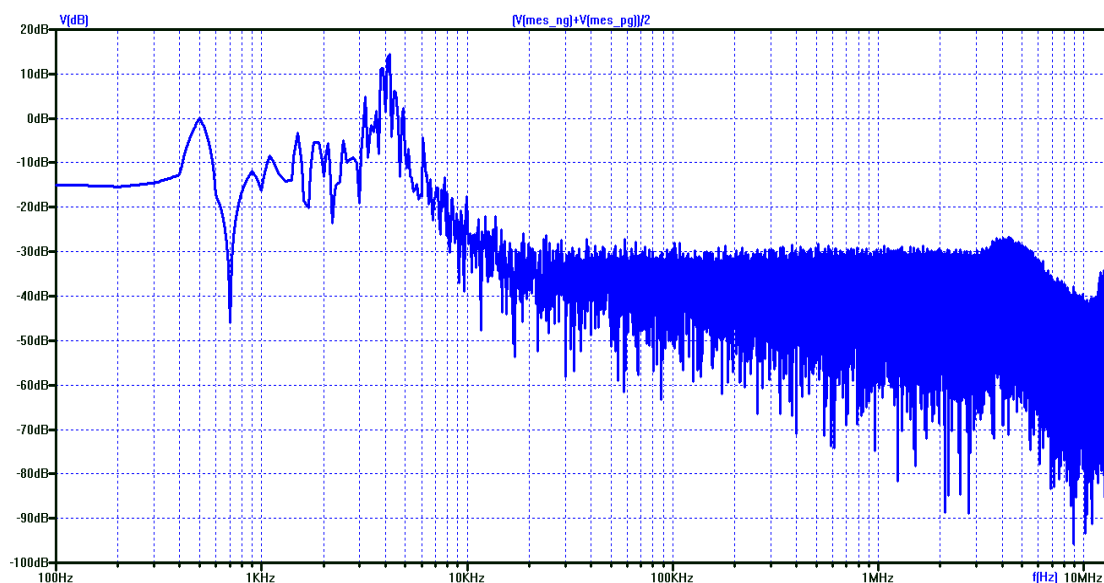
Figure (IV.46): Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 2T.

\*dans la figure (IV.44) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -5dB) à une fréquence (1.5KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (15dB) à une fréquence (4.2KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-43dB) à une fréquence (10.17MHz).

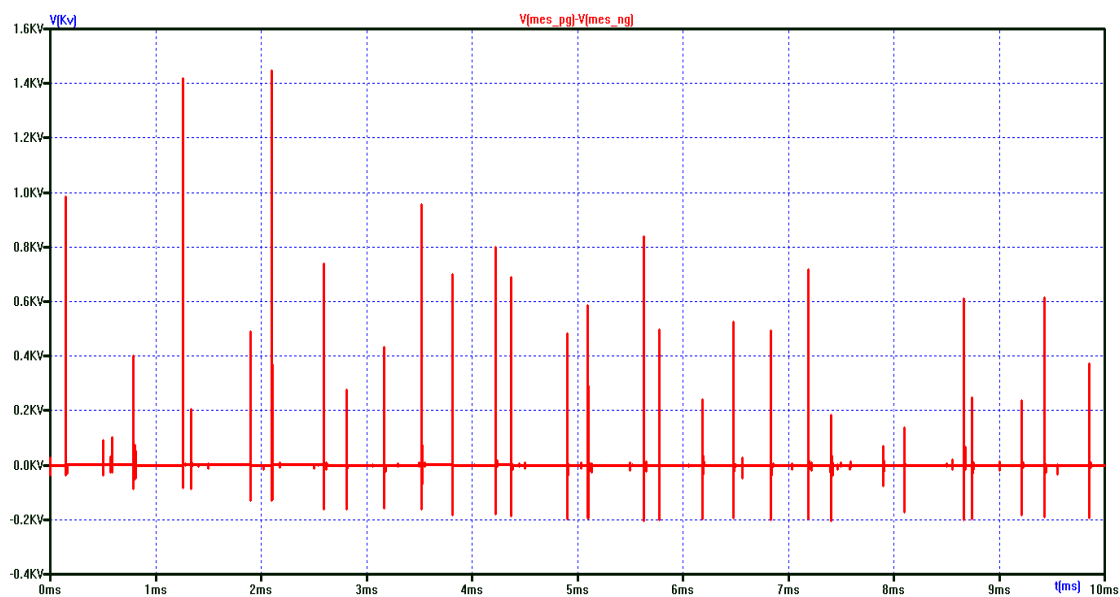
\*dans la figure (IV.46) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -11dB) à une fréquence (898.72Hz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (15dB) à une fréquence (4.16KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-40dB) à une fréquence (10.25MHz).



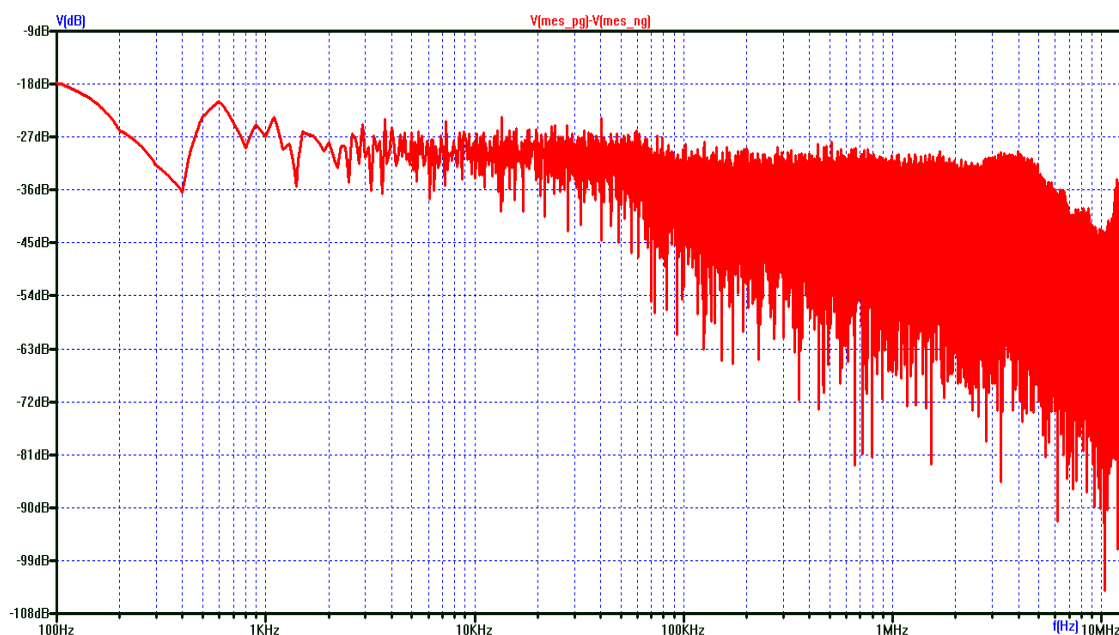
**Figure (IV.47):** Résultats de simulation de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.



**Figure (IV.48):** Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.



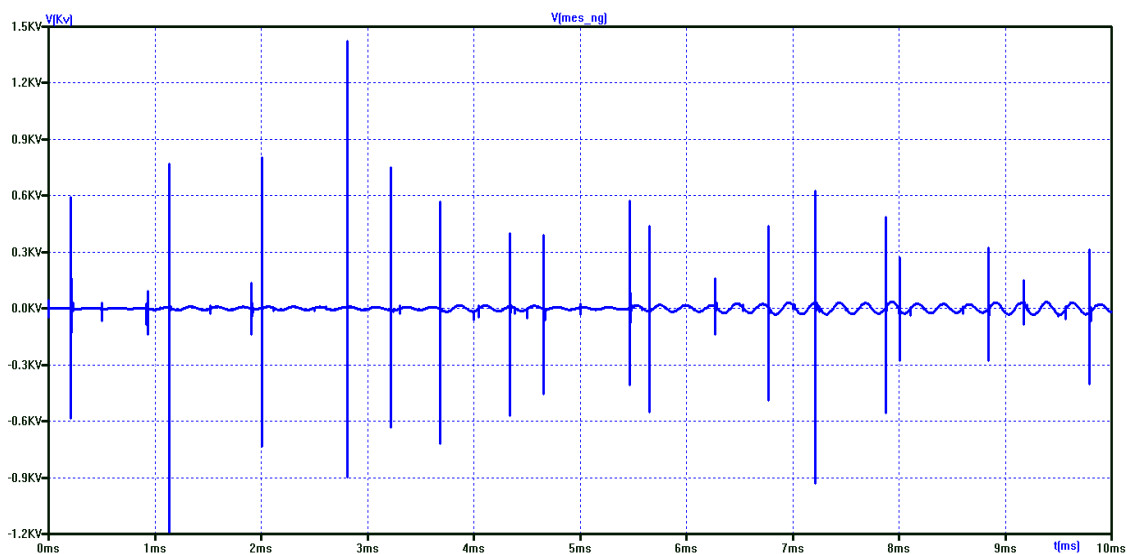
**Figure (IV.49):** Résultats de simulation de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 2T.



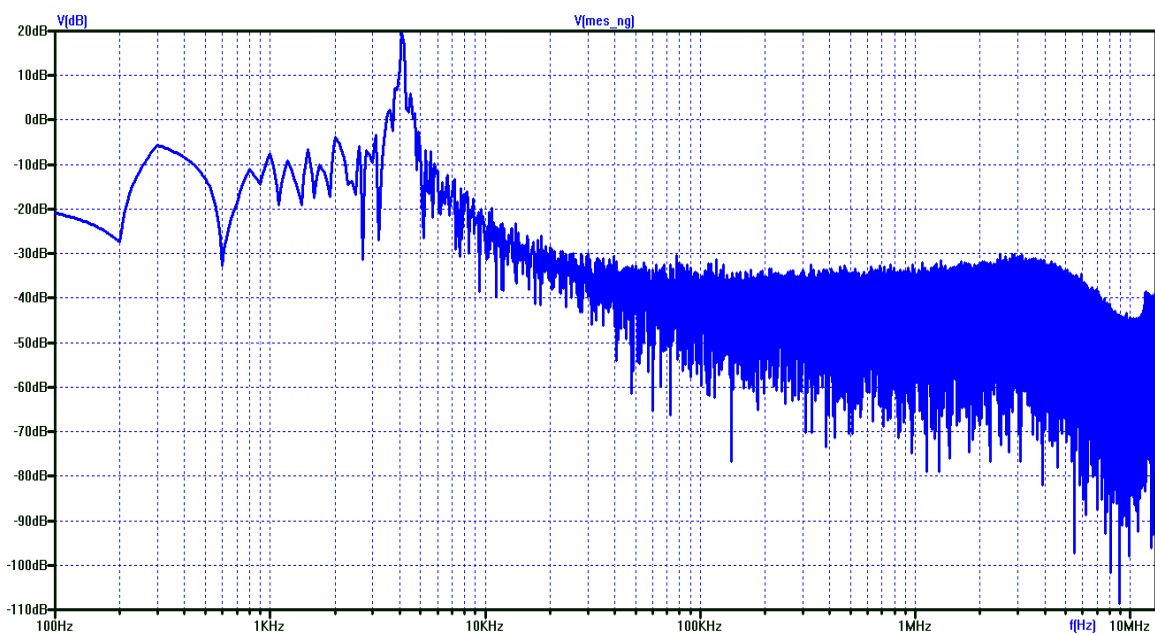
**Figure (IV.50):** Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation  $2T$ .

\*dans la figure (IV.48) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -5dB) à une fréquence (1.006KHz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (15dB) à une fréquence (4.16KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-39dB) à une fréquence (10.64MHz).

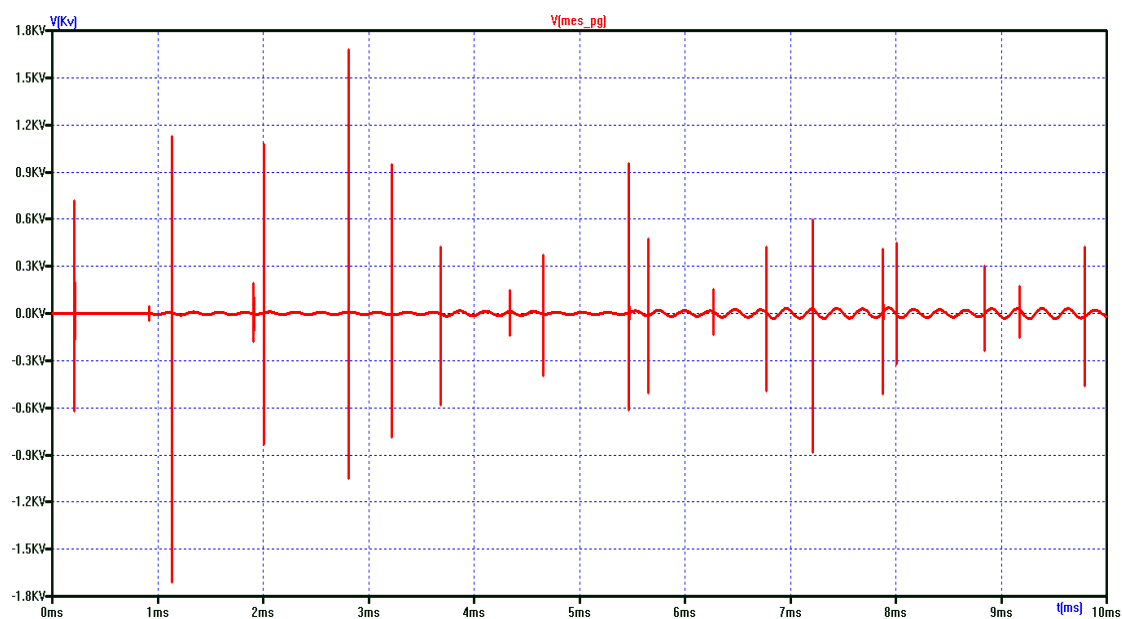
\*dans la figure (IV.50) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -28dB) à une fréquence ( 809.56Hz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (-23dB) à une fréquence (13.59KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-43dB) à une fréquence (9.68MHz).



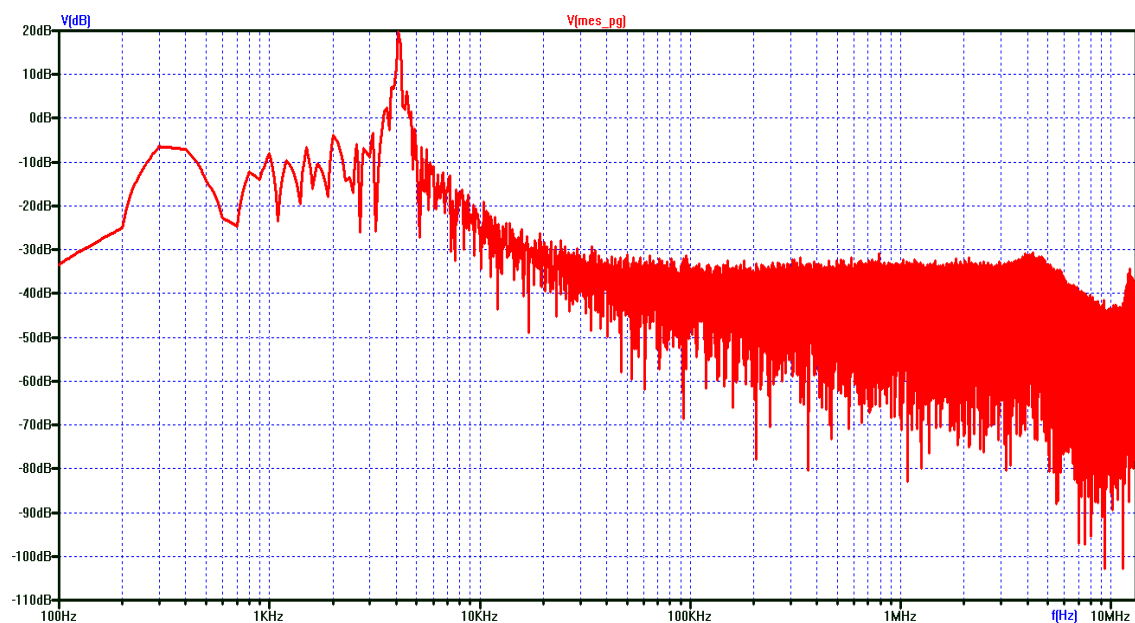
**Figure (IV.51):** Résultats de simulation de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.



**Figure (IV.52):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre neutre et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.



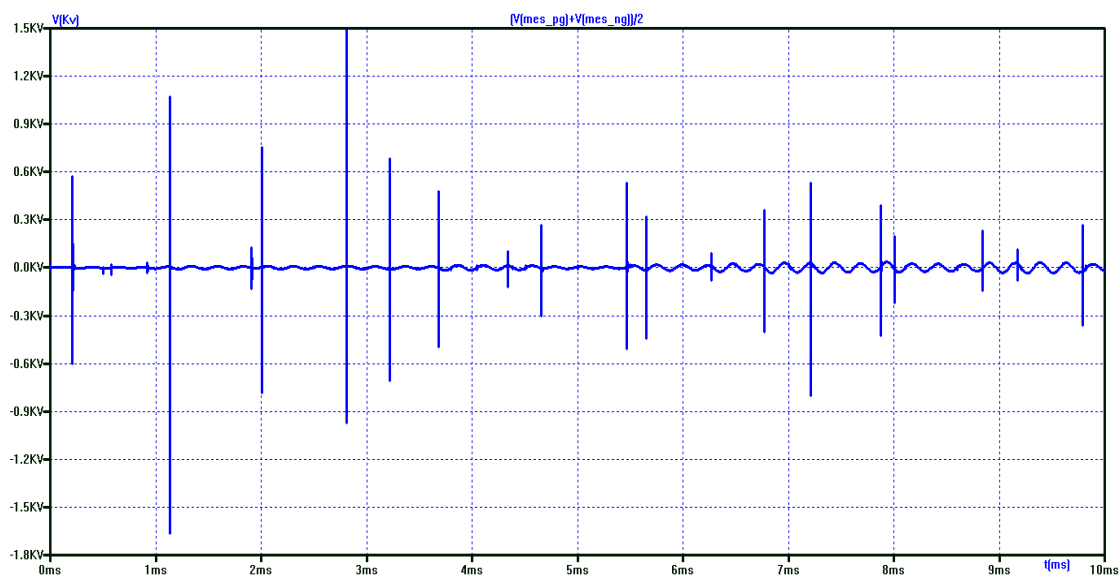
**Figure (IV.53):** Résultats de simulation de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.



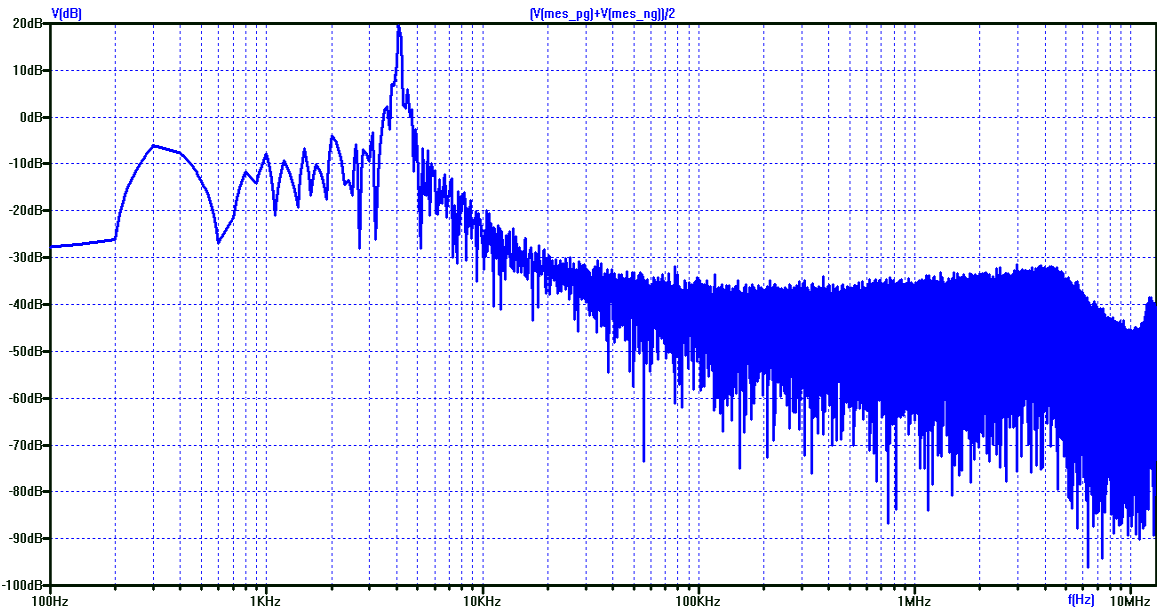
**Figure (IV.54):** Représentation spectrale des perturbations de tension entre phase et la terre sortant d'un panneau solaire 3T.

\*dans la figure (IV.52) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -30dB) à une fréquence (603.3Hz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (20dB) à une fréquence (4.12KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-45dB) à une fréquence (10.05MHz).

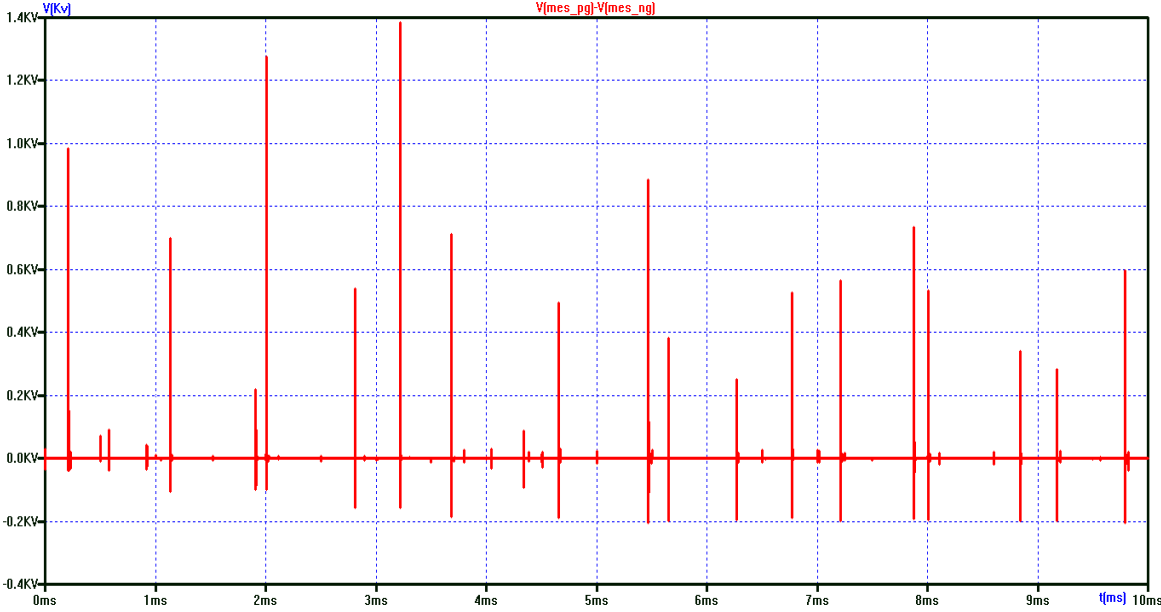
\*dans la figure (IV.54) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -23dB) à une fréquence (702.67Hz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (20dB) à une fréquence (4.12KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-43dB) à une fréquence (9.6MHz).



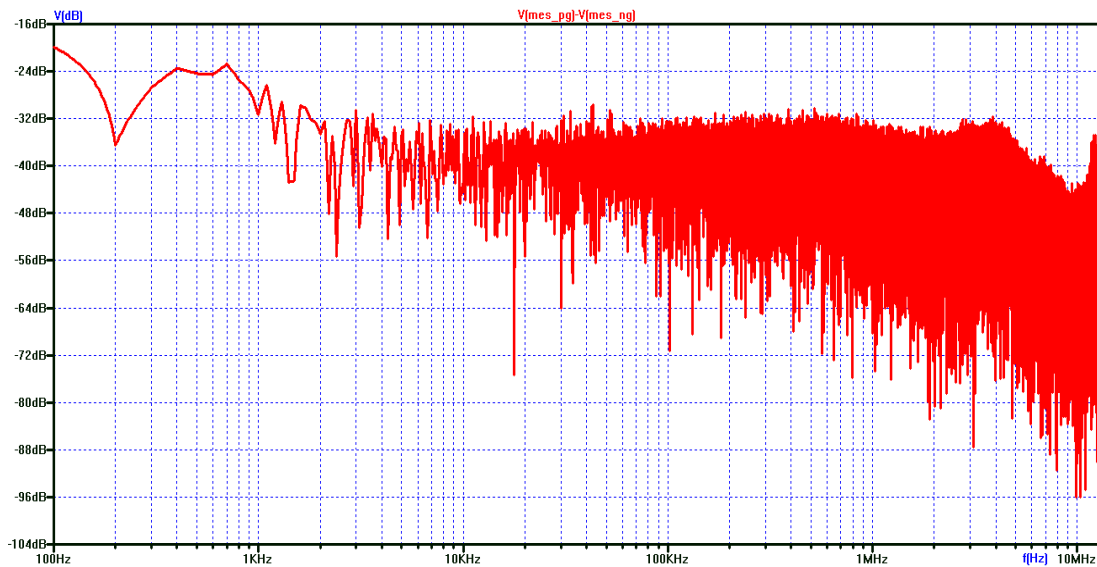
**Figure (IV.55):** Résultats de simulation de tension MC sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.



**Figure (IV.56):** Représentation spectrale des perturbations de tension MC sortant d’un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.



**Figure (IV.57):** Résultats de simulation de tension MD sortant d’un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.



**Figure (IV.58):** Représentation spectrale des perturbations de tension MD sortant d'un panneau solaire selon une fréquence de commutation 3T.

\*dans la figure (IV.56) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -26dB) à une fréquence (609.67Hz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (20dB) à une fréquence (4.12KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-45dB) à une fréquence (9.68MHz).

\*dans la figure (IV.58) on remarque au début de la mesure l'absence de perturbation jusqu'à ce qu'elles atteignent la valeur ( -30dB) à une fréquence (997.33Hz) et les vibrations continuent jusqu'à ce qu'elles atteignent sa valeur la plus élevée (-29dB) à une fréquence (42.73KHz) et à partir de cette valeur les perturbations commencent à diminuer jusqu'à sa valeur la plus basse (-45dB) à une fréquence (9.23MHz).

**IV-10 Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons fait une application des Simulation le système pv recordé au réseau,nous avons ensuite présenté les résultats pour une variation de la perturbation électromagnétique dans le système PV,les résultats de simulation montre un que la source des perturbations se situe au niveau du transformateur électrique (hacheur et onduleur).

donc à semi-conducteurs utilisés dans les convertisseurs sont la principale source de perturbations existant dans le système PV.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Cette thèse se situe dans le contexte des perturbations électromagnétique dans système PV , thème demeure d'actualité à la vue de traiter au mieux la cohabitation électromagnétiques des systèmes électriques et électroniques. L'ampleur des perturbations électromagnétiques survenant dans les réseaux électriques impose de manière impérative l'élaboration d'un système de protection fiable et efficace. En effet, La compatibilité électromagnétique des systèmes électriques est conditionnée par l'environnement électromagnétique, ce dernier est connu par l'identification et la quantification des sources de perturbation par la mesure ou le calcul.

Dans le première chapitre regroupe un ensemble d'information nous permettant d'élargir nos connaissances sur les systèmes PV connecte au réseau et la notion de la compatibilité électromagnétique (CEM), puis les techniques de couplage électromagnétique. Le chapitre est terminé par une présentation des nombreux travaux de recherche concentrent sur la compatibilité électromagnétique générée dans un système photovoltaïque.

Comme discuté dans le deuxième chapitre, les PEM sont une préoccupation croissante dans les systèmes photovoltaïques. Les perturbations générées par les convertisseurs de puissance PV sont conduits aux côtés d'entrée et de sortie des convertisseurs. Du côté d'entrée DC, les émissions sonores sont conduites vers les panneaux PV à travers les longs câbles DC et sont potentiellement rayonnés par ces composants.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté une méthode de modélisation d'un système PV connectée au réseau pour la prédiction des perturbations conduites. Le panneau PV peut être modélisé à l'aide de diodes avec une résistance parasite supplémentaire, capacité et inductance, le câble DC été modélisé par méthode transmission de ligne sur une large bande de fréquence, nous avons modélisé le hacheur et l'onduleur de tension par des générateurs équivalents et des capacités parasites dans le but de réduire le temps de calcul pour la simulation temporelle.

Dans le quatrième chapitre, nous avons fait une application des Simulation le système pv recordé au réseau,nous avons ensuite présenté les résultats pour une variation de la perturbation électromagnétique dans le système PV,les résultats de simulation montre un que la source des perturbations se situe au niveau du transformateur électrique (hacheur et

onduleur) donc à semi-conducteurs utilisés dans les convertisseurs sont la principale source de perturbations existant dans le système PV.

À la fin de cette mémoire, nous avons pu atteindre le but de l'étude, qui est de connaître la source des perturbations électromagnétiques qui existent au niveau des transformateurs de puissance et des semi-conducteurs.

En tant que point de vue, afin de réduire les perturbations électromagnétiques, un changement dans le type et la qualité des transformateurs de puissance et des semi-conducteurs doit être effectué, et la longueur du fil DC doit être étudiée.

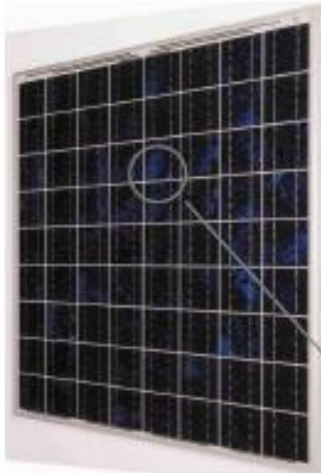
# **ANNEXES**

## Annexes:

### PW1650 PV module (175 W) caractéristique



## PW1650- 12/24 V HIGH EFFICIENCY PHOTOVOLTAIC MODULE - JBox



- Grid connected system
- Water pumping
- Telecommunications
- Battery charging system
- Cathodic protection system
- Building integrated power system



The PW1650 is made of 8 x 9 high efficiency (up to 15%) 5 inch polycrystalline silicon solar cells (125,50 mm X 125,50 mm), with a silicon nitride anti-reflective coating.

The PW1650 is Photowatt's 5 inch high efficiency module. Thanks to its optimum size it is easy to handle and specifically dedicated to large scale grid connected applications.

The PW1650 module uses Photowatt's multicrystalline technology. The solar cells are individually characterized and electronically matched prior to interconnection. Encapsulation beneath high transmission tempered glass is accomplished using an advanced, UV resistant thermal setting plastic. The encapsulant, ethylene vinyl acetate, cushions the solar cells within the laminate and protect the cells from etching. The rear surface of the module is completely sealed from moisture and mechanical damage by a continuous high strength polymer sheet.

The PW1650 is using a reinforced transparent anodised aluminium frame, designed to meet Photowatt's High Quality Standards for corrosion resistance (lifetime tested 3 times longer than requested by CEI 61215).

With a tolerance improvement to +/- 3%, the PW1650 module ensures more power homogeneity in installations, and a financial investment corresponding to the real power produced.

A 12V version and a UL version are available on request.

**POWER TOLERANCE : +/- 3%    EFFICIENCY WARRANTY : 25 YEARS\*    PRODUCT WARRANTY : 5 YEARS \***

PW1650		24 V Configuration			12 V Configuration		
Typical power	W	155	165	175	155	165	175
Minimum power	W	150	160	170	150	160	170
Voltage at typical power	V	34	34,4	35	17	17,2	17,5
Current at typical power	A	4,5	4,8	5	9,2	9,6	10
Short circuit current	A	4,8	5,1	5,3	9,6	10,2	10,6
Open circuit voltage	V	43	43,2	43,4	21,5	21,6	21,7
Maximum system voltage	V	770V DC					
Temperature coefficient		α <sub>P</sub> = -0,46 mW/A/°C ; β <sub>V</sub> = -2,5 mV/°C ; γ <sub>P/P</sub> = -0,43 %/°C			α <sub>P</sub> = -0,92 mW/A/°C ; β <sub>V</sub> = -3,9 mV/°C ; γ <sub>P/P</sub> = -0,43 %/°C		
Power specifications at 1000 W/m <sup>2</sup> : 25°C : AM 1,5							



\*According to general warranty conditions  
Data subject to evolution - Last update : 03/09/2012

# **BIBLIOGRAPHIQUES**

## BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOUTLILIS. F « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique » thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem ,2018.
- [2] Melle BRIHMAT Fouzia «Étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Éolien». Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2012.
- [3] Y. AZZOUG, « Commande de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïque » thèse de doctorat, QUEBEC, février 2008.
- [4] R.MERAHI, Modélisation d'un dispositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateur photovoltaïques, mémoire, Annaba 2010.
- [5] K.HELALI, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, magistère, Université de TIZI-OUZOU, 2012.
- [6] Thi Minh Chau Lé « Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle / commande et rejet de perturbations » Thèse de Doctorat de L'université De Grenoble, 2012
- [7]CHERIF Lahcene Modélisation CEM d'un ensemble Variateur de vitesse – Machine asynchrone ,mémoire de magisteur , Université des Sciences et de Technologie d'Oran e
- [8] REZINI. Saliha : " Etude de problèmes de compatibilité électromagnétique dans les dispositifs d'électronique de puissance", Mémoire de magister, Département d'électrotechnique USTO, 2005.
- [9] BIDI MANEL « CEM Compatibilité électromagnétique et réseaux d'énergie, perturbations, effets et solutions » ,thèse de doctorat,Université des frères Mentouri de Constantine,2017.
- [10]Jukkrit Jiraprasertwong “Electromagnetic Interference in Photovoltaic System and Mitigation of Conducted Noise at DC Side”,IEEE,2016.

- [11] Yasutoshi Yoshioka “CISPR limits for the Conducted Disturbances of DC ports of PV-GCPCs”, IEICE, 2014.
- [12] Manish Prajapati « Extraction of Equivalent Noise Source Model from Photovoltaic Systems”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018.
- [13] Wenjie Chen “Modeling and Prediction of Radiated Emission From Solar Cell in a Photovoltaic Generation System” IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS,2016.
- [14] M. Rucinski “Analysis of Electromagnetic Disturbances in DC network of Grid Connected Building-Integrated Photovoltaic System”,IEEE,2015.
- [15] Prajapati, Manish « Modeling and analysis of EMI from DC input of photovoltaic systems” , Thèse de doctorat·Université technologique de Nanyang, Singapour,2019
- [16] F .Costa , G. Rojat "CEM en Electronique de Puissance , Sources de Perturbation Couplages , SEM " , Techniques de l'Ingénieure , Vol . D3 290 .PP. 1-26
- [17] J. Jiraprasertwong and C. Jettanasen, “Analysis and mitigation of conducted electromagnetic interference in a photovoltaic single-phase inverter,” TENCON IEEE Region 10 Conference. IEEE, , pp. 1–5, 2014.
- [18] N. Henze et al., “Radio interference on the DC side of PV systems research results and limits of emissions,” 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Munich, Germany, 2001.
- [19] H. Haeberlin, “New DC-LISN for EMC-measurements on the DC side of PV systems: Realisation and first measurements at Inverters,” 17th EU PV Conf.,Munich, Germany, Oct. 2001.
- [20] K.Rajkumar,” An Overview Of Conducted EMI And Its Mitigation In Photovoltaic Systems” International Journal of Applied Engineering Research,2015.
- [21] C.R.Paul, Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Edition, 2000
- [22] International Special Committee on Radio Interference - CISPR 22 Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement.

- [23] Official Journal of the European Union, Directive 2004/108/EC of the European Parliament and of the Council, 15 December 2004.
- [24] IEC EN641000-6-4:2006 Electromagnetic Compatibility Generic Emission Standard, Part 6-4: Generic Standards – Emission Standard for Industrial Environments.
- [25] B.Revol, "Modélisation et optimisation des performances CEM d'une association variateur de vitesse – machine asynchrone".Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2003.
- [26] A. ALES, "Etude de la CEM d'une association convertisseur machine asynchrone". These magister EMP, 2009.
- [27] F. BEGGAT, " Etude et amélioration des performances des filtres CEM". These magister EMP, 2016.
- [28] H. Zhu et al., "Analysis of conducted EMI emissions from PWM inverter based on empirical models and comparative experiments," 30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 2, July 1999, pp. 861–867.
- [29] A. R. Hefner and D. M. Diebolt, "An experimentally verified IGBT model implemented in the Saber circuit simulator," Record 22nd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 1991, pp. 10–19.
- [30] L. Yang et al., "Modeling and characterization of a 1 KW CCM PFC converter for conducted EMI prediction," Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, vol. 2, Feb 2004, pp. 763–76
- [31] D. Hamza, M. Qiu, and P. K. Jain, "Application and stability analysis of a novel digital active EMI filter used in a grid-tied PV microinverter module", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 6, pp. 2867–2874, 2013.
- [32] X. Pei et al., "Analytical estimation of common mode conducted EMI in PWM inverter," IEEE Industry Applications Conference, vol. 4, Oct 2004, pp. 2651–2656.
- [33] E. Zhong et al., "Analytical estimation and reduction of conducted EMI emissions in high power PWM inverter drives," 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 2, June 1996, pp. 1169–1175.

- [34] J. Deng and K. Y. See, "In-circuit characterization of common-mode chokes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 451–454, May 2007.
- [35] B. Touré et al., "EMC modeling of drives for aircraft applications: Modeling process, EMI filter optimization, and technological choice," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1145–1156, March 2013.
- [36] H. Bishnoi et al., "Analysis of EMI terminal modeling of switched power converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 9, pp. 3924–3933, Sept 2012.
- [37] M. F. Moad, "Two-port networks with independent sources," *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, no. 7, pp. 1008–1009, July 1966.
- [38] Q. Liu, F. Wang, and D. Boroyevich, "Model conducted EMI emission of switching modules for converter system EMI characterization and prediction," *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 3, Oct 2004, pp. 1817–1823.
- [39] M. Jin, M. Weiming, and Z. Lei, "Determination of noise source and impedance for conducted EMI prediction of power converters by lumped circuit models," *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, vol. 4, June 2004, pp. 3028–3033.
- [40] D. Zhang et al., "Measurement of noise source impedance of off-line converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 5, pp. 820–825, Sept 2000.
- [41] V. Tarateeraseth et al., "Accurate extraction of noise source impedance of an SMPS under operating conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 1, pp. 111–117, Jan 2010.
- [42] B. Archambeault and A. E. Ruehli, "Analysis of power/ground-plane EMI decoupling performance using the partial-element equivalent circuit technique," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, no. 4, pp. 437–445, Nov 2001.
- [43] A. C. Baisden, D. Boroyevich, and J. D. Van Wyk, "High frequency modeling of a converter with an RF-EMI filter," *41st Industry Applications Conference*, vol. 5, IEEE, 2006, pp. 2290–2295.
- [44] W. Chen et al., "Numerical and experimental investigation of parasitic edge capacitance for photovoltaic panel," *International Power Electronics Conference*, May 2014, pp. 2967–2971.

- [45] W. Chen et al., “Novel leakage current study model based on finite element analysis for photovoltaic panels,” IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 2015, pp. 2623–2627.
- [46] S. Brehaut et al., “A conducted EMI model for an industrial power supply full bridge,” IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 4, June 2004, pp. 3227–3231.
- [47] L. Ran et al., “Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems. I. Time domain analysis and identification of dominant modes,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, no. 4, pp. 757–767, July 1998.
- [48] H. Zhu, A. R. Hefner, and J. S. Lai, “Characterization of power electronics system interconnect parasitics using time domain reflectometry,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 4, pp. 622–628, July 1999.
- [49] S. Wang, F. C. Lee, and W. G. Odendaal, “Using scattering parameters to characterize EMI filters,” IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, June 2004, pp. 297–303.
- [50] K. A. Kim et al., “A dynamic photovoltaic model incorporating capacitive and reverse-bias characteristics,” IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 3, no. 4, pp. 1334–1341, Oct 2013.
- [51] H. Meng, S. Chen, Y.L. Guan, C.L. Law, P.L. So, E. Gunawan & T.T. Lie : A transmission line model for high-frequency power line communication channel, Power 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on, tome 2, pages 1290–1295 vol.2, 2002.
- [52] C. Vermaelen : Contribution à la modélisation et à la réduction de perturbations conduites dans les systèmes d’entraînement à vitesse variable, Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2003.
- [53] Clément Marlier » Modélisation des perturbations électromagnétiques dans les convertisseurs statiques pour des applications aéronautiques », thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2013.
- [54] Djellal IEILA Imemne , Dib Yasmina, Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un système photovoltaïque, master, Université de Tlemcen, 2017.

**Titre du mémoire :** Simulation et analyse des perturbations électromagnétiques conduites dans un système photovoltaïque intégré au réseau électrique.

**Master :** Electromécanique.

**Auteur :** Kaddour Abdelfatah - Touati Oussama - Dogga Abde Razzak

**Mots clés :** Système PV connectée au réseau électrique, perturbations électromagnétiques,

**Résumé :**

L'énergie renouvelable est devenue l'alternative la plus préférable source d'énergie, qui a moins d'impact sur l'environnement, dans en particulier, l'énergie solaire photovoltaïque(PV). Cependant, les équipements à système PV connectée au réseau électrique et les dispositifs sont constitués de dispositifs électroniques de puissance pouvant générer perturbations électromagnétiques (PEM) pendant son fonctionnement. Ce peut causer des dommages physiques et entraver le fonctionnement du système, il faut donc analyser la compatibilité électromagnétique (CEM) afin de faire fonctionner en douceur différents équipements en commun environnement électromagnétique.

---

**Report title:** Simulation and analysis of electromagnetic disturbances conducted in a photovoltaic system integrated into the electrical network.

**Keywords:** PV system connected to the electricity grid, electromagnetic interference ,.

**Abstract:**

Renewable energy has become the most preferable alternative source of energy, which has less impact on the environment, in particular, solar photovoltaic (PV) energy. However, grid connected PV system equipment and devices consist of power electronic devices that can generate electromagnetic disturbances (PEM) during operation. This can cause physical damage and hamper the operation of the system, so it is necessary to analyze the electromagnetic compatibility (EMC) in order to operate different equipment smoothly in common electromagnetic environment.

---

**عنوان المذكرة:** محاكاة وتحليل الاضطرابات الكهرومغناطيسية التي أجريت في نظام كهروضوئي متكامل في الشبكة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** النظام كهروضوئي المتصل بشبكة الكهرباء ، الاضطرابات الكهرومغناطيسية ،

**الملخص:**

أصبحت الطاقة المتجددة أكثر المصادر البديلة المفضلة للطاقة ، والتي لها تأثير أقل على البيئة ، ولا سيما الطاقة الشمسية كهروضوئية (PV). ومع ذلك ، فإن معدات وأجهزة النظام كهروضوئي المتصلة بالشبكة تتكون من أجهزة إلكترونية للطاقة يمكنها توليد اضطرابات كهرومغناطيسية (PEM) أثناء التشغيل. يمكن أن يتسبب ذلك في ضرر مادي ويعيق تشغيل النظام ، لذلك من الضروري تحليل التوافق الكهرومغناطيسي (EMC) من أجل تشغيل المعدات المختلفة بسلاسة في

بيئة كهرومغناطيسية مشترك