



---

## ملخص:

هذا العمل يدخل في الاطار العام لدراسة ظاهرة النقل المزدوج HVDC-HVAC و تأثيره على نوعية الطاقة الكهربائية المنقولة.

نمذجة خطوط النقل HVDC تقوم أساسا على الدراسة النظرية و التجريبية للمحولات.

الدراسة (التصميم) و الانجاز العملي للمجسمات المخبرية (الموحد-عاكس) قد انجزت من اجل الحصول على منحنيات حقيقية و التحقق من صحة النتائج النظرية للنماذج التي قمنا بتطويرها و محاكاتها.

المجسم المخبري (موحد-عاكس) المصمم و المنجز مكون من موحد محكوم ثلاثي الطور ذو ستة قواطع و عاكس ثلاثي الطور ذو مستويين.

التحكم يكون بواسطة المتحكم الدقيق من نوع PIC18F4550 الذي يضمن التحكم و مراقبة الموحد المحكوم PD3 و مراقبة العاكس ثلاثي الطور ذو مستويين.

و في الاخير قمنا بدراسة جمع (ربط) خط النقل HVAC مع خط النقل HVDC من اجل التمكن من تحليل مساهمته في تحسين نوعية الطاقة الكهربائية المنقولة.

---

---

## **Abstract:**

The work is part of the overall study of the "HVAC-HVDC" bifurcation phenomenon and its impact on improving the quality of transported electrical energy.

The modeling of an HVDC transmission line is based essentially on the theoretical and experimental study of converters.

The study and the experimental realization of the laboratory emulators (Rectifier-Inverter) was made in order to obtain real curves and to validate the theoretical results of the developed and simulated models.

The laboratory emulator (Rectifier-Inverter) designed and realized consists of a three-phase controlled rectifier by six switches and a three-phase inverter with two levels.

The control is carried out by a microcontroller "PIC18F4550" which controls and monitors the PD3 controlled rectifier and monitors the three-phase inverter at two levels.

Finally, the association of a HVAC line with an HVDC line was studied in order to analyze its contribution to the improvement of the quality of the transported electrical energy.

---

---

## Résumé:

Le travail s'inscrit dans le cadre global de l'étude du phénomène de bifurcation du transport « HVAC-HVDC » et son impact sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique transportée.

La modélisation d'une ligne de transport HVDC est basée essentiellement sur l'étude théorique et expérimentale des convertisseurs.

L'étude et la réalisation expérimentale des émulateurs de laboratoire (Redresseur-Onduleur) a été faite afin d'obtenir des courbes réelles et de valider les résultats théoriques des montages développés et simulés.

L'émulateur de laboratoire (Redresseur- Onduleur) conçu et réalisé est composé d'un redresseur triphasé commandé à six interrupteurs et un onduleur triphasé à deux niveaux.

La commande est réalisée par un microcontrôleur « PIC18F4550 » assurant le contrôle et la surveillance du redresseur commandé PD3 et la surveillance de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Enfin on a étudié l'association d'une ligne HVAC avec une ligne HVDC afin de pouvoir analyser sa contribution sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique transportée.

---

---

***Dédicace :***

*Je dédie ce travail :*

*A la mémoire de mon cher père HOCINE,*

*A ma chère mère qui n'a jamais cessé de m'aider, de m'encourager tout le long de mon cursus scolaire et universitaire, que dieu la récompense et la garde,*

*A mon mari Mohammed et A mon adorable fils Ayoub,*

*A toute ma famille, surtout ma sœur Assia.*

---

---

## *Remerciement*

Je remercie et j'exprime ma gratitude à mon directeur de thèse le professeur M<sup>f</sup> Labar Hocine, pour ces qualités humaines et professionnelles et ces conseils essentiels tout le long de mon travail.

Je tiens à remercier, le professeur M<sup>f</sup> Saad Salah directeur de laboratoire des systèmes électromécaniques « LSEM », pour m'avoir accueillie au sein de son laboratoire et m'avoir permis de réaliser mes tests de recherche dans les meilleures conditions.

Je tiens à remercier aussi, l'enseignant Mr Frihi Mohamed, laboratoire des études et recherches en instrumentation et communication « LERICA » pour m'avoir guidé et assisté et pour ses conseils importants.

Je tiens à remercier les enseignants de l'Université d'Annaba : Le professeur Mr Omeiri Amar qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse et le docteur M<sup>f</sup> Mesbah Tarek Maître de conférence classe A pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être un examinateur.

Je remercie vivement les membres de jury de l'Université de Guelma : Le Professeur M<sup>f</sup> Bounaya Kamel, le Professeur M<sup>f</sup> Lemzadmi Ahcene et le Professeur M<sup>f</sup> Moussaoui Abdelkrim pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

J'adresse mes sincères remerciements aux ingénieurs de laboratoire des circuits imprimés du département Electronique pour la prise en charge particulièrement M<sup>me</sup> Moumen, et je remercie aussi les ingénieurs de laboratoire « LSEM » Mr Adel et Mr Farouk.

---

---

## **Liste des tableaux**

<i>Tableau 1-Vue générale d'ensemble des principales perturbations électriques.....</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 2-Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519 .....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 3-comparaison entre le filtrage passif et le filtrage actif.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 4-Caractéristiques des configurations de filtres hybrides parallèles.....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 5-Paramètres de simulation PD3.....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 6-Paramètres de simulation Onduleur à deux niveaux.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 7-Caractéristique du Thyristor .....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 8-Caractéristique de L'IGBT.....</i>	<i>60</i>

---

---

## *Liste des Figures*

Figure 1-Harmoniques de tension .....	4
Figure 2-Creux de tension .....	5
Figure 3-coupure et chute de tension.....	5
Figure 4-Les Surtensions de manœuvre.....	6
Figure 5-les surtensions atmosphériques.....	7
Figure 6-Fluctuations de tension.....	8
Figure 7-Déséquilibre.....	8
Figure 8-Les deux types de résonance.....	15
Figure 9-Résonance parallèle liée à la présence de condensateurs .....	16
Figure 10-Raccordement d'une inductance anti-harmonique .....	18
Figure 11-Installations de filtres résonants.....	19
Figure 12-filtres amortis passe-haut.....	19
Figure 13-Convertisseur à source de tension .....	20
Figure 14-modèle d'un convertisseur à source de courant.....	21
Figure 15-Topologies de filtres hybrides parallèles .....	24
Figure 16-Redresseur monophasé simple alternance .....	30
Figure 17-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	30
Figure 18-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	30
Figure 19-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	31
Figure 20-Tension aux bornes du thyristor.....	31
Figure 21-Redresseur monophasé double alternance.....	31
Figure 22-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	32
Figure 23-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	32
Figure 24-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	33
Figure 25- Tension aux bornes du thyristor.....	33
Figure 26-Modèle du redresseur PD3 étudié.....	34
Figure 27-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	34
Figure 28-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	35
Figure 29-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	35
Figure 30-Tension aux bornes du thyristor.....	35
Figure 31-Modèle du redresseur S3 étudié.....	36
Figure 32-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	36
Figure 33-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	37
Figure 34-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	37
Figure 35-Tension aux bornes du thyristor.....	37
Figure 36-Modèle du redresseur dodécaphasé.....	38
Figure 37-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	38
Figure 38-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	39
Figure 39-Tension redressée avec empiètement (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	39
Figure 40-Tension de commutation avec empiètement.....	40
Figure 41-Modèle d'un onduleur triphasé à deux niveaux.....	42
Figure 42-La tension simple de l'onduleur à deux niveaux (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	43
Figure 43-La tension composée de l'onduleur à deux niveaux (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	43
Figure 44-Le courant à la sortie de l'onduleur à deux niveaux (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	44
Figure 45-Le schéma synoptique du Redresseur .....	48
Figure 46-Organigrammes .....	49
Figure 47-Modules de commande et de puissance du redresseur monophasé réalisé.....	51
Figure 48-Tension redressée pour un angle d'amorçage $\alpha = 30^\circ$ (Charge RL) .....	52

---

---

Figure 49-Tension redressée pour un angle d'amorçage $\alpha = 30^\circ$ (Charge R) .....	52
Figure 50-Tension redressée au moment de la fermeture du thyristor .....	53
Figure 51-Tension redressée au moment de l'ouverture du thyristor .....	53
Figure 52-carte Redresseur triphasé : (a) module de commande (b) module de puissance .....	54
Figure 53-Tension redressée pour un angle d'amorçage $\alpha = 30^\circ$ (Charge RL).....	55
Figure 54-Courant redressé pour un angle d'amorçage $\alpha = 45^\circ$ (Charge RL).....	55
Figure 55-Tension de Commutation aux bornes des thyristors .....	56
Figure 56-Schéma Synoptique de la carte onduleur .....	57
Figure 57-carte onduleur (a) module microcontrôleur (b) module onduleur .....	58
Figure 58-Tension composée à la sortie de l'onduleur.....	60
Figure 59-Tension simple à la sortie de l'onduleur.....	61
Figure 60-Configuration monopolaire.....	66
Figure 61-Configuration bipolaire .....	66
Figure 62-Système back to back .....	67
Figure 63-schéma équivalent d'une ligne de transmission HT.....	69
Figure 64-comparaison de la section AC et DC .....	72
Figure 65-Système de transport HVDC .....	73
Figure 66-Tension composée à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	73
Figure 67-Tension simple à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	74
Figure 68-Courant de phase à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	74
Figure 69-système de transport HVAC/HVDC .....	75
Figure 70-Tension composée à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	76
Figure 71-Tension simple à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel.....	76
Figure 72-Courant de phase à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel .....	77

---

## Liste des Symboles

Symbole	Désignation
HVAC	High voltage alternating current
HVDC	High voltage direct current
LCC	Line Commutated Converters
VSC	Voltage Source Converter
$S_{eff}$	Valeur efficace d'un signal $\delta(t)$ périodique de période $T$
$THD$	Taux de distorsion harmonique
$F_P$	Facteur de puissance
$P$	Puissance active
$Q$	Puissance réactive
$D$	Puissance de déformation
$P_h$	Puissance active harmonique
$Q_h$	Puissance réactive harmonique
$Z_h$	Impédance harmonique
$V_h$	Tension harmonique
$I_h$	Courant harmonique
$f_r$	Fréquence de résonance
$R_{ch}$	Résistance de la charge
$L_{ch}$	Inductance de la charge
$R_L$	Résistance de la ligne
$L_L$	Inductance de la ligne
$V_S$	Tension de source
$\gamma$	Angle d'empiètement
$K_1, K_2, K_3, K_4$	Etat des Commutateurs de l'onduleur
$\delta$	Angle de décalage de la commande
T	Période
E	Tension continu d'entrée de l'onduleur
$I_{T(RMS)}$	Courant efficace admissible du thyristor

---

$I_H$	Courant de maintien du thyristor
$V_{GT}$	Tension de la gâchette
$I_{GT}$	Courant de la gâchette
$Z_0$	Impédance de la ligne
$Y_0$	Admittance de la ligne
$\gamma_0$	Coefficient de propagation de l'onde électromagnétique
$U_x$	Tension de la ligne pour une longueur $x$
$I_x$	courant de la ligne pour une longueur $x$
$Z_C$	Impédance caractéristique
$x$	Longueur (distance)
$\Delta P_{CA}$	Pertes de puissance active du réseau courant alternatif
$\Delta P_{CC}$	Pertes de puissance active du réseau courant continu
$\delta$	Epaisseur de peau
$\omega$	Pulsation du courant
$f$	Fréquence du réseau
$\mu$	Perméabilité magnétique
$\rho$	Résistivité
$\sigma$	Conductivité

---

---

## Table des Matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I. Performance de la qualité de l'énergie électrique .....	3
1.1. Introduction .....	3
1.2. Les paramètres de performance de la qualité de l'énergie électrique.....	3
1.2.1. Amplitude.....	3
1.2.2. Fréquence .....	3
1.2.3. Forme d'onde .....	4
1.2.4. Symétrie.....	4
1.3. Les perturbations électriques.....	4
1.3.1. Les harmoniques.....	4
1.3.2. Les creux de tension .....	5
1.3.3. Les coupures de tension.....	5
1.3.4. Les surtensions .....	6
1.3.5. Une fluctuation de tension (flicker).....	7
1.3.6. Déséquilibre.....	8
1.4. Propagation des harmoniques sur les réseaux électriques .....	10
1.4.1. Causes et effets de la propagation des harmoniques .....	10
1.4.2. Impact de la propagation des harmoniques sur les réseaux électriques.....	11
1.4.3. Les caractéristiques des perturbations harmoniques .....	12
1.4.4. Normes concernant les perturbations harmoniques.....	14
1.5. Phénomène de résonance.....	15
1.5.1. Types de résonance .....	15
1.5.2. Problèmes liés aux résonances .....	16
1.6. Solutions d'élimination des harmoniques .....	17
1.6.1. Filtrage passif .....	17
1.6.2. Filtrage actif .....	20
1.6.3. Filtrage hybride (mixte actif-passif).....	22
1.6.4. Filtres hybrides parallèles dédiés à l'amortissement de la résonance.....	23
1.7. Conclusion.....	26
CHAPITRE II. Utilisation de l'électronique de puissance dans le domaine de conversion de l'énergie électrique.....	27
2.1. Introduction .....	27
2.2. Les Convertisseurs Statiques.....	27
2.3. Classification des convertisseurs statiques.....	28
2.4. Les Convertisseurs CA/CC .....	29

---

---

2.4.1.	Redresseur monophasé simple alternance .....	29
2.4.2.	Redresseur monophasé double alternance .....	31
2.4.3.	Redresseur Triphasé PD3 .....	33
2.4.4.	Redresseur Triphasé S3 .....	36
2.4.5.	Redresseur Dodécaphasé .....	38
2.4.6.	Phénomène d’empiètement dans les redresseurs triphasés commandés .....	39
2.5.	Les Convertisseurs CC/CA .....	40
2.5.1.	Les onduleurs triphasés à deux niveaux .....	40
2.5.2.	Les modes de commande des onduleurs à deux niveaux .....	41
2.5.3.	Modèle étudié d’un onduleur à deux niveaux à commande MLI sinusoïdale .....	42
2.6.	Analyse des résultats de simulations .....	44
2.7.	Conclusion .....	44
CHAPITRE III. Etude et réalisation expérimentale des émulateurs de laboratoire utilisés dans le transport de l’énergie électrique .....		45
3.1.	Introduction .....	45
3.2.	Type des simulateurs .....	45
3.2.1.	Les simulateurs analogiques .....	45
3.2.2.	Les simulateurs numériques .....	46
3.2.3.	Les simulateurs hybrides .....	46
3.3.	Conception des émulateurs de laboratoire .....	47
3.3.1.	Description du PIC18F4550 .....	47
3.3.2.	Caractéristiques principales du PIC18F4550 .....	47
3.3.3.	Description et Fonctionnement des émulateurs de laboratoire .....	48
3.4.	Emulateur de laboratoire « Redresseur » .....	48
3.4.1.	Description de l’émulateur de laboratoire « redresseur » .....	48
3.4.2.	Réalisation redresseur monophasé .....	51
3.4.3.	Résultats Expérimentaux du redresseur monophasé .....	52
3.4.4.	Réalisation redresseur triphasé .....	54
3.4.5.	Résultats expérimentaux du redresseur triphasé PD3 .....	55
3.4.6.	Analyse des résultats expérimentaux de l’émulateur redresseur .....	56
3.5.	L’émulateur de laboratoire « onduleur » .....	57
3.5.1.	Description de l’émulateur de laboratoire « Onduleur » .....	57
3.5.2.	Réalisation de l’onduleur .....	58
3.5.3.	Résultats expérimentaux obtenus de l’onduleur .....	60
3.5.4.	Analyse des résultats expérimentaux de l’émulateur onduleur .....	61
3.6.	Conclusion .....	61

---

---

CHAPITRE IV. Effet de phénomène de bifurcation sur la qualité de l'énergie électrique transportée.....	62
4.1. Introduction .....	62
4.2. Historique .....	63
4.3. Les rôles de L'HVDC.....	64
4.3.1. Le rôle traditionnel .....	65
4.3.2. Nouveaux rôles pour HVDC .....	65
4.3.3. Types des liaisons HVDC .....	65
4.4. La télécommunication entre les stations de conversion .....	67
4.5. Fonctionnement des liaisons HVDC .....	68
4.5.1. Fonctionnement des convertisseurs LCC .....	68
4.5.2. Fonctionnement des convertisseurs VSC .....	68
4.6. Modélisation d'une ligne de transmission HT.....	69
4.7. Comparaison entre le transport HVDC et HVAC .....	70
4.7.1. Comparaison de transit de puissance dans les câbles AC et DC .....	71
4.7.2. Comparaison des capacités de transport des lignes en CA et en CC.....	71
4.7.3. Comparaison de la section utile dans les conducteurs AC et DC.....	71
4.8. Mode de transmission HVDC .....	72
4.8.1. Transmission HVDC par câbles sous-marins.....	72
4.8.2. Transmission HVDC par câbles aériens.....	72
4.8.3. Transmission HVDC par câbles souterrains.....	72
4.9. Modélisation d'une ligne de transport HVDC.....	73
4.9.1. Modèle étudié .....	73
4.9.2. Les résultats obtenus .....	73
4.10. Effet du phénomène de bifurcation sur la qualité de l'énergie électrique transportée .....	75
4.10.1. Transport hybride HVAC/HVDC.....	75
4.10.2. Les résultats obtenus .....	76
4.10.3. Analyse des résultats .....	77
4.11. Conclusion.....	77
Conclusion Générale et Perspectives .....	78
Bibliographie.....	79
Annexe A Caractéristiques générales de PIC18F4550.....	83
Annexe B Schéma détaillé du Redresseur.....	84
Annexe C Schéma détaillé du l'Onduleur.....	92

---

## **Introduction générale**

La production de l'énergie électrique, son transport ainsi que la distribution, ont connu ces dernières années un très grand développement, dont la raison principale est l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Le rôle principal du gestionnaire du réseau de transport de l'énergie électrique est de mettre en œuvre les moyens de contrôle qui permettent de transporter cette énergie tout en maintenant la qualité souhaitée selon les normes internationales exigées [2].

Les moyens classiques de contrôle des réseaux électriques en haute tension à courant alternatif (transformateurs à prises réglables en charge, transformateurs à décalage, batteries de condensateurs et inductances additionnelles, ...etc.) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau.

Pour le transport de l'énergie électrique à courant continu HVDC (High voltage direct current), on a besoin d'autres systèmes de contrôle rapide utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance. Cette dernière connaît un développement considérable ; on trouve de plus en plus des convertisseurs statiques connectés sur le réseau électrique qui deviennent une solution optimale pour résoudre des problèmes spécifiques [18]. La mise en point des nouvelles stratégies de commandes sophistiquées a permis une amélioration importante sur la performance des convertisseurs de grandes puissances [19-20].

La technologie HVDC peut être une alternative sous réserve de trouver des solutions aux barrières scientifiques et technologiques existantes [12,13]. Elle est intégrée à de multiples réseaux électriques partout dans le monde. Ses diverses applications et avantages lui ont donné une place de choix dans le domaine du transport de l'énergie électrique à haute tension [14].

Une liaison HVDC est constituée d'une ligne à courant continu reliant deux stations de conversion AC vers DC et DC vers AC. Elle peut être configurée en plusieurs modes : Dos à Dos, ligne monopolaire, ligne bipolaire et systèmes multi-terminaux [15]. L'étude des circuits d'électronique de puissance peut se faire par l'utilisation d'outils de simulation. Cette simulation permet à travers des essais sur les prototypes de laboratoire, d'étudier des phénomènes expérimentalement. La simulation numérique permet de créer de nouveaux types de circuits ainsi que de tester l'efficacité et la fiabilité de nouvelles

commandes de façon très rapide.

La réalisation des circuits de commande des redresseurs et des onduleurs est compliquée de nature, divers techniques de commande ont été proposées où les algorithmes nécessitent une implémentation sur des prototypes de haute performance basés sur des processeurs puissants tel que DSP, PLC et FPGA. Ceci rend le système d'implémentation très coûteux. Bien que la topologie et le principe de fonctionnement des convertisseurs triphasés est simple, l'utilisation des systèmes de commande à base de microcontrôleurs 8 bits à faible coût pour les étudier est devenue attractive et concurrente [21-22-23-24].

Notre premier objectif est l'étude et la réalisation d'un émulateur de laboratoire qui est conçu et réalisé à base d'un redresseur triphasé commandé à six interrupteurs et un onduleur triphasé à deux niveaux. Cet émulateur sera employé dans le futur dans l'étude du transport de l'énergie électrique (HVDC). Les résultats expérimentaux obtenus sont comparés avec les résultats de simulation des différents montages étudiés. Notre second objectif est de modéliser une ligne de transport HVDC, ainsi que l'association HVAC/HVDC pour pouvoir analyser les phénomènes de bifurcation sur la qualité de l'énergie électrique transportée.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les performances de la qualité de l'énergie électrique, en précisant les perturbations électriques et leurs effets de propagation dans les réseaux électriques ainsi que les solutions adaptées pour filtrer les harmoniques.

Nous présentons dans le deuxième chapitre l'étude et la simulation des convertisseurs utilisés dans le domaine de la conversion de l'énergie électrique.

Dans le troisième chapitre qui est la partie expérimentale de notre travail, les émulateurs de laboratoire ont été étudiés et réalisés afin d'obtenir des courbes réelles et valider les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation de la ligne HVDC et l'analyse des phénomènes de bifurcation liée à l'association HVAC/HVDC et leur impact sur l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

## **CHAPITRE I. Performance de la qualité de l'énergie électrique**

### **1.1. Introduction**

La problématique de la qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs en présence qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou consommateurs d'électricité) ou intervenants divers (fournisseurs d'électricité ou de services, organismes de régulations...).

Le gestionnaire de réseau occupe une position centrale. Sa responsabilité est de mettre en œuvre les moyens permettant de maîtriser la qualité de l'énergie électrique entre le producteur et le consommateur, dont le souci est de respecter les normes exigées.

L'aspect sinusoïdal de la tension d'origine est nécessaire de le conserver afin de lui préserver les qualités essentielles pour la transmission de la puissance utile. Lorsque la forme de l'onde de tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre alors des perturbations qui génèrent des dysfonctionnements et des échauffements des récepteurs et appareillages raccordés sur un même réseau d'alimentation électrique [11].

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants ;

### **1.2. Les paramètres de performance de la qualité de l'énergie électrique**

#### **1.2.1. Amplitude**

L'amplitude de la tension est un facteur important pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs tels que les creux de tension, coupures et surtensions peuvent affecter l'amplitude des tensions.

#### **1.2.2. Fréquence**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

### 1.2.3. Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques.

### 1.2.4. Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. Les perturbations électriques affectant l'un des paramètres cités précédemment peuvent se manifester par plusieurs phénomènes.

## 1.3. Les perturbations électriques

### 1.3.1. Les harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental.

La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation croissante de plus en plus d'équipements de l'électronique de puissance (charges non linéaires) [5].

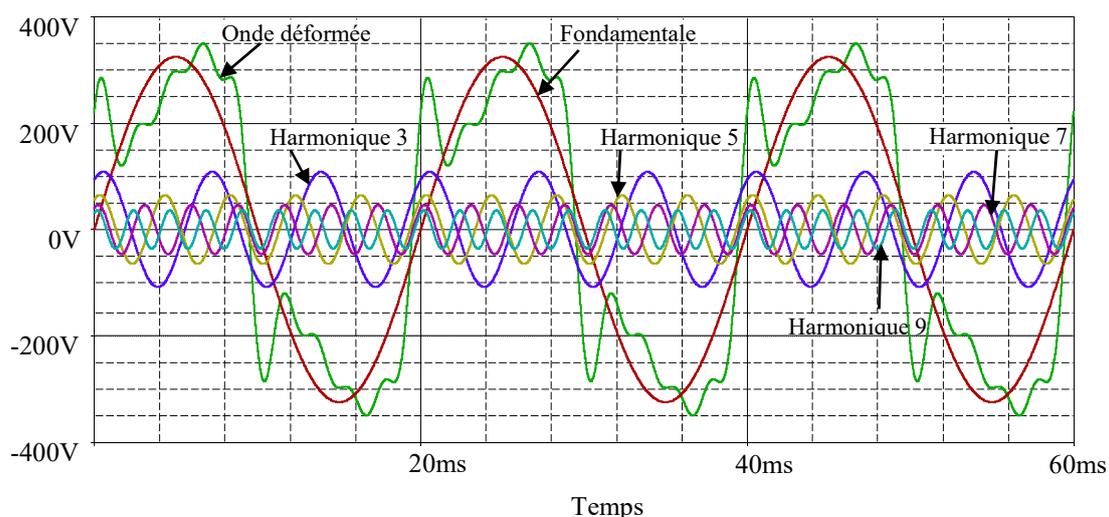


Figure 1-Harmoniques de tension

### 1.3.2. Les creux de tension

Les creux de tension affectent les réseaux électriques ou les installations raccordées. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension [1-4].

Les paramètres qui caractérisent un creux de tension sont :

Sa profondeur  $\Delta U$  ou son amplitude  $U$

Sa durée  $\Delta T$  : définie le temps pendant lequel la tension est inférieure à 90% de la valeur nominale.

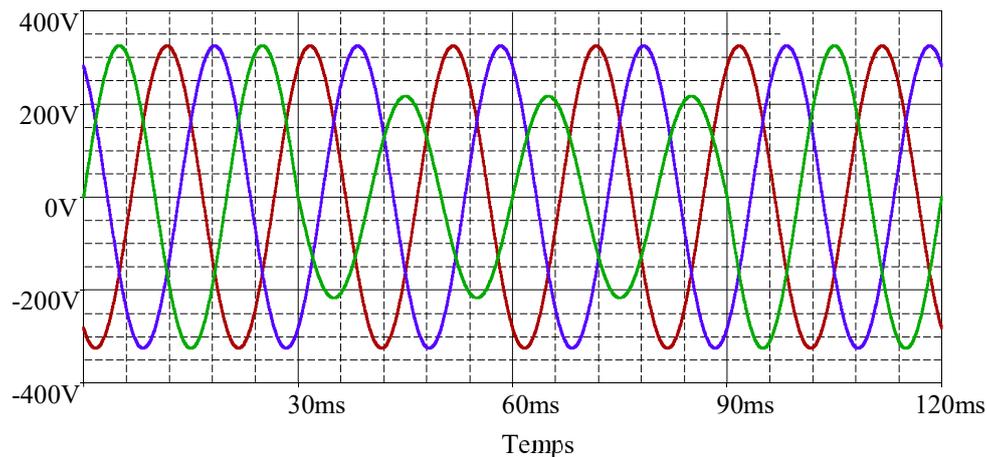


Figure 2-Creux de tension

### 1.3.3. Les coupures de tension

Les coupures sont le cas où la profondeur de la tension est supérieure à 99%. Elles sont caractérisées par un seul paramètre c'est la durée. Les coupures brèves sont de durée inférieure à une minute (coupure de 1s à 1min) et entre 10ms et 1s des « coupures très brèves ». Dans le cas d'un système triphasé, les caractéristiques  $\Delta U$  et  $\Delta T$  sont en général différentes sur les trois phases.

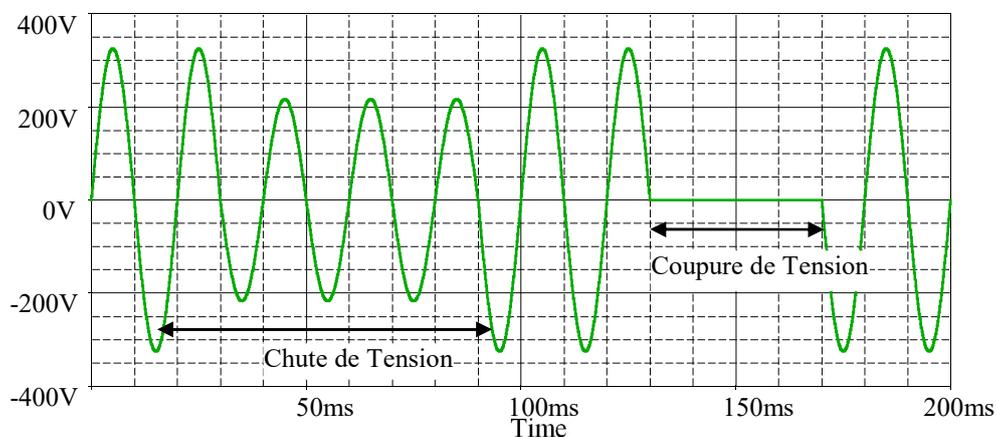


Figure 3-coupure et chute de tension

### 1.3.4. Les surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête dépasse les limites d'une plage ( $U_n + 10\%$ ) défini par une norme est une surtension.

Les surtensions ont trois natures :

- *Les surtensions Temporaires à fréquence industrielle*

C'est une augmentation brutale de la valeur efficace de la tension sur une ou plusieurs phases (plus de 110% de la tension nominale) pour une durée de 3s à 1mn, elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz).

- *Les surtensions de manœuvre*

La modification brusque de la structure d'un réseau électrique provoque l'apparition de phénomènes transitoires qui se traduisent souvent par la naissance d'une onde de surtension ou d'un train d'ondes hautes fréquences de type apériodique ou oscillatoire à amortissement rapide.

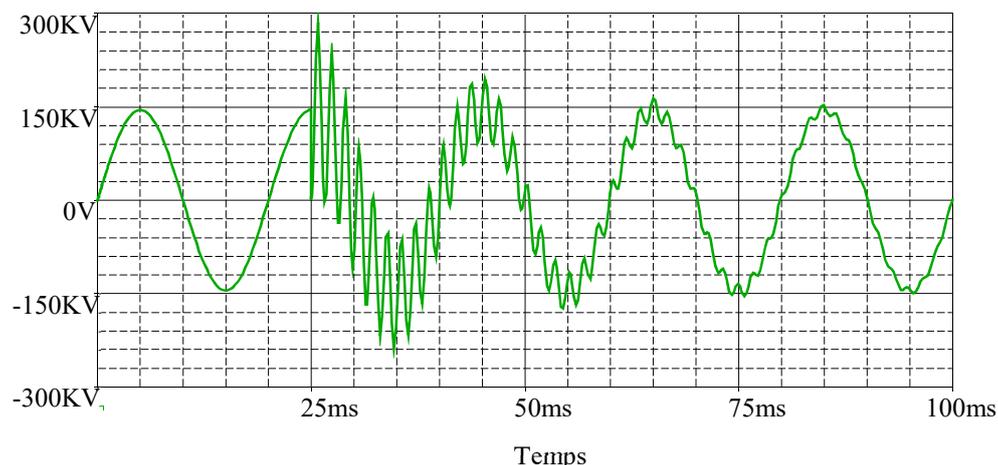


Figure 4-Les Surtensions de manœuvre

- *Les surtensions atmosphériques (transitoires)*

Les réseaux aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique. La foudre est un phénomène naturel qui apparaît en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montées en potentiel de la terre).

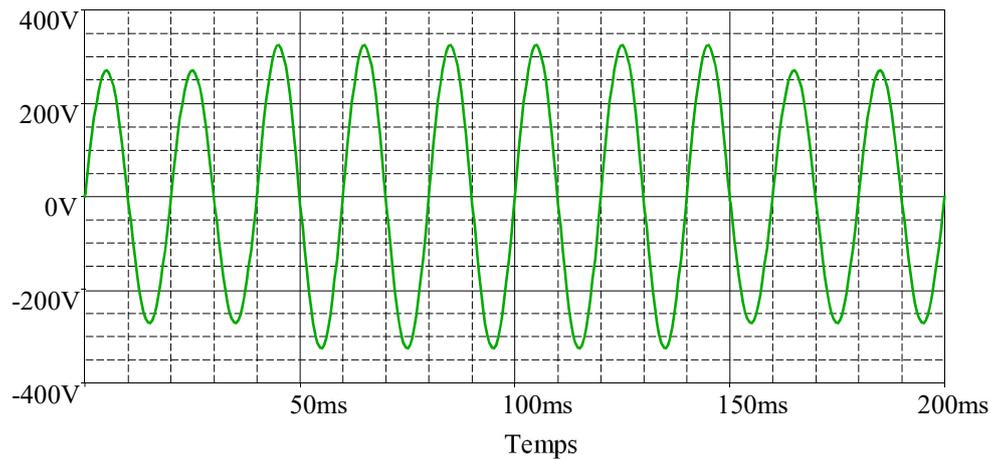


Figure 5-les surtensions atmosphériques

### 1.3.5. Les fluctuations de tension (flicker)

Les fluctuations brusques de la tension du réseau sont à l'origine de ce phénomène. Ces fluctuations d'amplitude de la tension situées dans une plage de variation de 10% de la tension nominale et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont soit des variations périodiques de la valeur efficace de la tension, soit des séries aléatoires d'à-coups de tension.

- *Les variations de tension périodiques*

Ces variations périodiques ou permanentes ont une décomposition spectrale dans une bande de 0,5 Hz à 25 Hz. Elles sont dues à des charges ou ensemble de charges dont l'utilisation se caractérise par une variation permanente d'appel de puissance.

- *Les variations de tension par à-coups*

Il s'agit ici des à-coups de tension se produisant de façon systématique. Ces variations sont dues à des mises en service de charges importantes.

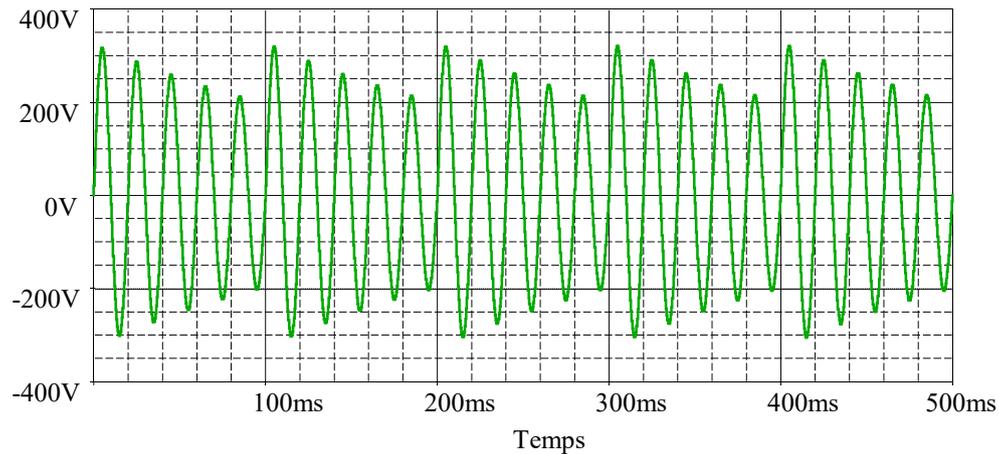


Figure 6-Fluctuations de tension

### 1.3.6. Déséquilibre

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

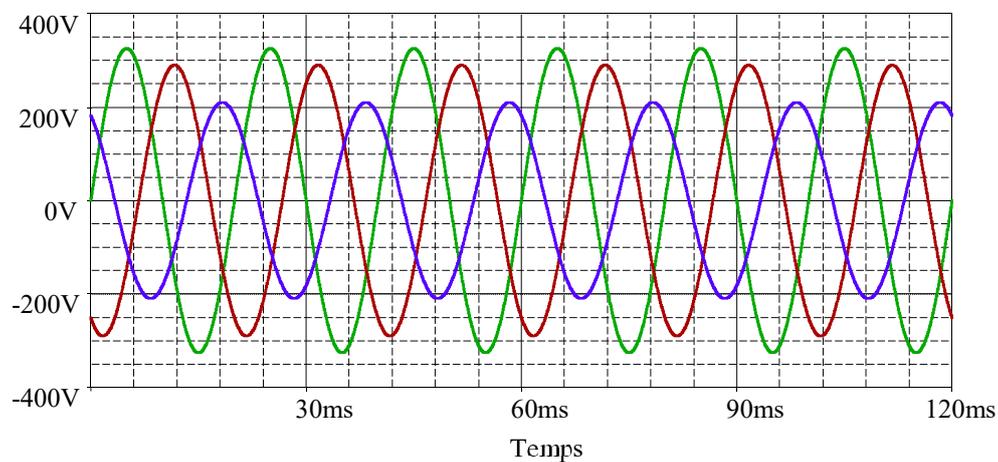


Figure 7-Déséquilibre

Tableau I-Vue générale d'ensemble des principales perturbations électriques

Type de perturbation	Origines	Conséquences	Exemple de solutions
Harmoniques	Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge ...).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Echauffements, vieillissement accéléré, surcharges (du conducteur de neutre, des sources...).</li> <li>- Pertes supplémentaires, perte de productivité, dégradation du rendement énergétique.</li> <li>- Effets quasi instantanés sur certains appareillages (EP, calculateurs, automates, ...).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Inductance de lissage</li> <li>- Utilisation de redresseurs dodécaphasés</li> <li>- Filtre passif, actif et hybride</li> <li>- Augmenter la Puissance de court-circuit.</li> </ul>
Creux de tension	- Court-circuit, commutations de charges de forte puissance, saturation des transformateurs	- Arrêts d'équipements, pertes de production	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASI</li> <li>Compensateur synchrone</li> <li>- Compensateur statique de puissance réactive</li> <li>- Condensateur série.</li> <li>- Compensateur automatique en temps réel.</li> <li>- augmenter la puissance de court-circuit.</li> <li>- Modifier la sélectivité des protections.</li> </ul>
coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif	- Arrêts d'équipements, pertes de production	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ASI</li> <li>- permutation mécanique et statique des sources.</li> </ul>
Surtension	- Manœuvre d'appareillages - foudre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Verrouillage de variateurs de vitesse</li> <li>- Déclenchements intempestifs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Parafoudre.</li> <li>- Dispositif SynchroSwitch, résistance de préinsertion, self de choc,</li> </ul>

		- destruction d'appareillage. - incendies. - pertes d'exploitation.	compensateur automatique statique.
Fluctuation	- variation importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	- papillotements de l'éclairage	- régleur en charge.
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau

#### **1.4. Propagation des harmoniques sur les réseaux électriques**

Les harmoniques présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires qui sont soumises à une tension sinusoïdale, absorbent un courant non sinusoïdal. Dans de nombreux cas, ces charges se comportent comme des sources de courants harmoniques, On peut définir aussi en tout point d'un réseau une impédance harmonique qui dépend du rang harmonique  $h$  considéré ; elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. On parle également d'une source de tension harmonique pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire ; le produit des harmoniques de courant par l'impédance harmonique du réseau en un point crée des harmoniques de tension [5].

##### **1.4.1. Causes et effets de la propagation des harmoniques**

###### **▪ Charges génératrices d'harmoniques de tension :**

Les alternateurs, les transformateurs représentent les principales charges génératrices d'harmoniques de tension. Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Le taux de distorsion harmonique produit par ces charges est généralement faible

###### **▪ Charges génératrices d'harmonique de courant**

Les charges non linéaires consomment un courant non sinusoïdal et représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. On peut distinguer différents types de charges perturbatrices telles que les montages d'électronique de puissance et les charges passives non linéaires.

#### 1.4.2. Impact de la propagation des harmoniques sur les réseaux électriques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés, on distingue deux sortes d'effets possibles :

- *Les effets instantanés*

Ce sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un matériel, certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, la précision des appareils de mesure, systèmes de contrôle et régulation, ...etc. la présence des harmoniques sur le réseau provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde

- *Les effets à terme*

Ils se manifestent après une exposition longue au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil tel que les transformateurs, les câbles électriques et les condensateurs.

On peut avoir une idée sur l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, tels que les :

- ✓ Transformateurs : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite ;
- ✓ Câbles électriques : pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes ;
- ✓ Condensateurs : ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée. Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent subvenir et soumettre les condensateurs à des surtensions,

lesquelles sont susceptibles de les dégrader.

- ✓ Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines ;
- ✓ Moteurs à courant alternatif : la déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple) ;
- ✓ Equipements à base d'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation) ;
- ✓ Réseaux de télécommunication : génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [4].

#### 1.4.3. Les caractéristiques des perturbations harmoniques

Les perturbations harmoniques sont définies par des caractéristiques tel que :

- **Rang d'harmonique :**

C'est le rapport de sa fréquence  $n f$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

$f_1$  est le fondamental du rang 1.

- **Valeur efficace d'un signal**

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal est l'évaluation de sa valeur efficace. La valeur efficace d'un signal  $S(t)$  périodique de période  $T$  est donnée par :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt}$$

- **Expression de la grandeur déformée**

Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est donc différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est alors possible d'évaluer la déformation du signal.

Le signal  $S(t)$  peut représenter un courant ou une tension.

Il est périodique de période  $T$ . Donc de fréquence  $f = 1/T$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ .

Ce signal se décompose de la façon suivante :

$$S(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(\omega ht) + B_h \sin(\omega ht)]$$

Avec

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt$$

Et pour  $h \geq 1$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(\omega ht) dt$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(\omega ht) dt$$

Et

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(\omega ht) dt$$

Ou, également :

$$S(t) = A_0 + \sum_{h=1}^n C_h \sin(\omega ht + \theta_h)$$

Ou

$$\theta_h = \arctg\left(\frac{a_h}{b_h}\right)$$

▪ **Taux de distorsion THD :**

On définit le taux de distorsion harmonique (THD), ou taux global de distorsion, qui peut s'appliquer soit au courant, soit à la tension :

Par :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \times 100$$

▪ **Facteur de puissance**

Le facteur de puissance  $F_p$  est le rapport de la puissance active  $P$  à la puissance apparente  $S$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est définie par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

$P$  : Puissance active généralisée (fondamentale  $P_1$  et harmoniques  $P_h$ )

$Q$  : Puissance réactive généralisée (fondamentale  $Q_1$  et harmoniques  $Q_h$ )

$D$  : Puissance déformante

On a :

$$P = P_1 + P_h \quad , \text{ avec : } \begin{cases} P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \\ P_h = 3 \cdot \sum_{k \neq 1} V_k \cdot I_k \cdot \cos \varphi_k \end{cases}$$

Et

$$Q = Q_1 + Q_h \quad , \text{ avec : } \begin{cases} Q_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \\ Q_h = 3 \cdot \sum_{k \neq 1} V_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k \end{cases}$$

**1.4.4. Normes concernant les perturbations harmoniques**

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Electrotechnique Internationale) en Europe [IEC 98] et IEEE en Amérique [IEEE 92], élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories [11] :

Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement :

- ✓ IEEE 519-1992
- ✓ IEC 61000-2-2
- ✓ IEC 61000-3-6

Limites sur l'émission harmonique des équipements :

- ✓ IEC 61000-3-2 (appareils de moins de 16A par phase)
- ✓ IEC 61000-3-4 (appareils de plus de 16A par phase)

Guide pour la mesure des harmoniques :

✓ IEC 61000-4-7

La norme IEEE-519, par exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (Pcc) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. A titre d'exemple, les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 2-Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519

Tension aux jeux de barres	Composante harmonique individuelle (%)	THD maximal (%)
- 69 kV et moins	3.0	5.0
- 115kV à 161kV	1.5	2.5
- Plus de 161kV	1.0	1.5

### 1.5. Phénomène de résonance

L'utilisation de condensateurs pour la correction d'un faible facteur de puissance et par conséquent la réduction des pénalités dues à une consommation excessive de l'énergie réactive est un moyen assez courant pour réduire la demande et les pertes du système de puissance.

Des sérieux problèmes sont rencontrés avec l'installation des batteries de condensateurs à cause de l'interaction avec des distorsions harmoniques causées par des charges non linéaires. Les condensateurs peuvent entraîner une ou plusieurs résonances harmoniques [7].

#### 1.5.1. Types de résonance

L'apparition de phénomènes de résonance est due à l'association sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs, on distingue deux types de résonance :

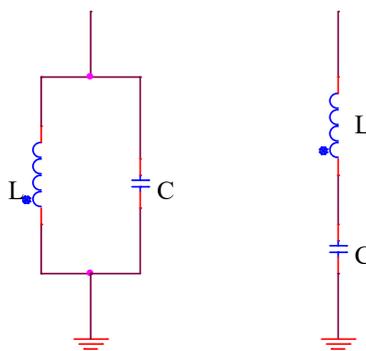


Figure 8-Les deux types de résonance

### 1.5.1.1. Résonance parallèle

La mise en parallèle d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance donnée par :

$$Z_h = jLh\omega / 1 - LC h^2 \omega^2$$

Il y a résonance lorsque le dénominateur  $1 - LC h^2 \omega^2 = 0$ , cette impédance est alors infinie.

La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

### 1.5.1.2. Résonance série :

De même, l'association en série d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance donnée par :

$$Z_h = 1 - LC h^2 \omega^2 / jCh\omega$$

Il y a résonance lorsque le numérateur est égal à zéro. L'impédance est alors nulle.

La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

### 1.5.2. Problèmes liés aux résonances

Soit le réseau de la figure ci-dessous, qui est le siège d'une résonance alimentée par une source de courant harmonique :

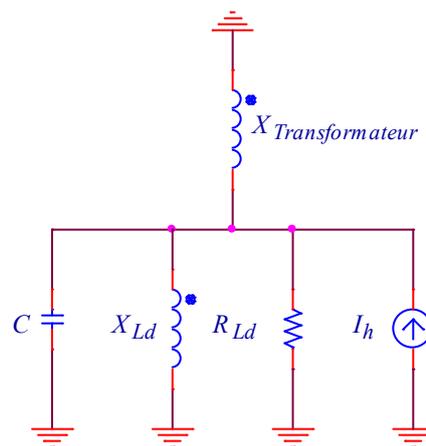


Figure 9-Résonance parallèle liée à la présence de condensateurs

$X_{Ld}$  et  $R_{Ld}$  : représentent les puissances réactive et active de la charge.

$C$  : est une batterie de condensateurs.

Si le réseau est à vide ( $R_{Ld} = \infty$ ), l'impédance harmonique  $Z_h$  au niveau du jeu de barres est infinie à la résonance. Ceci entraîne une tension harmonique infinie aux bornes des différents éléments :

$$V_h = Z_h \times I_h \rightarrow \infty$$

$V_h$  se retrouve aux bornes de l'inductance  $L$  représentant  $X_{Ld} // X_{Transformateur}$  et la capacité  $C$ . Les courants qui circulent dans ces éléments  $I_{hC}$  sont donc infinis :

$$I_{hC} = \frac{V_h}{Z_{hC}} \rightarrow \infty$$

En raison du risque de voir apparaître une ou plusieurs résonances, des précautions doivent être prises lors de l'installation des condensateurs. Aussi pour réduire l'amplification à la résonance, il faut éviter de laisser les condensateurs enclenchés sur un réseau faiblement chargé, d'où l'intérêt des gradins de condensateurs régulés par relais var-métriques.

Hors la zone de résonance, la présence de condensateur sur le réseau a un effet favorable sur les tensions harmoniques en raison de la faible impédance qu'ils présentent aux fréquences élevées [8].

## 1.6. Solutions d'élimination des harmoniques

Dans l'état actuel du réseau électrique, il n'y a pas d'équipement qui soit apte à contrôler de façon idéale la circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges.

En effet, les filtres passifs peuvent altérer d'une manière indirecte la propagation des harmoniques mais leur comportement dépend fortement de la structure du réseau. Les filtres actifs, avec un comportement plus autonome, peuvent réagir directement sur le courant ou la tension harmonique dans le réseau ; comme compensateurs d'harmoniques autonomes [6].

### 1.6.1. Filtrage passif

De nombreuses solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique. La solution la plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif des harmoniques

#### 1.6.1.1. Principe

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à « dériver » les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques y afférentes. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie.

Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre. Une telle étude est généralement menée à l'aide d'un logiciel de simulation. En fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés [4].

Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d'amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif pour les raisons suivantes :

- Le filtre série peut porter le courant en entier à partir du circuit principal et doit être isolé de la terre. Le filtre shunt, par contre, porte uniquement le courant harmonique et peut être lié à la terre à l'une des extrémités.
- A la fréquence fondamentale, un filtre shunt a l'avantage de fournir de la puissance réactive alors qu'un filtre série consomme de la puissance réactive.
- Pour des performances égales, un filtre shunt est beaucoup moins cher qu'un filtre série.

#### 1.6.1.2. Différents types de filtres parallèles

- **Inductance anti-harmonique**

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.

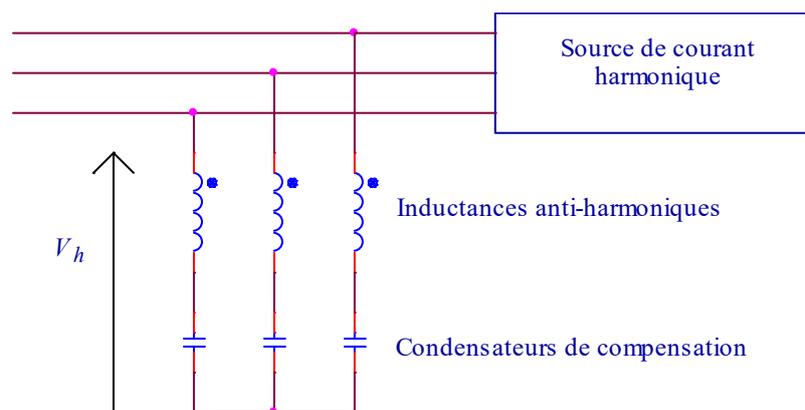


Figure 10-Raccordement d'une inductance anti-harmonique

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vue du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (antirésonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique.

▪ **Filtre résonant**

Un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé.

Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé ; l'accord du filtre est donc très pointu. Plusieurs filtres résonants correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer, sont souvent installés, en parallèle [4].

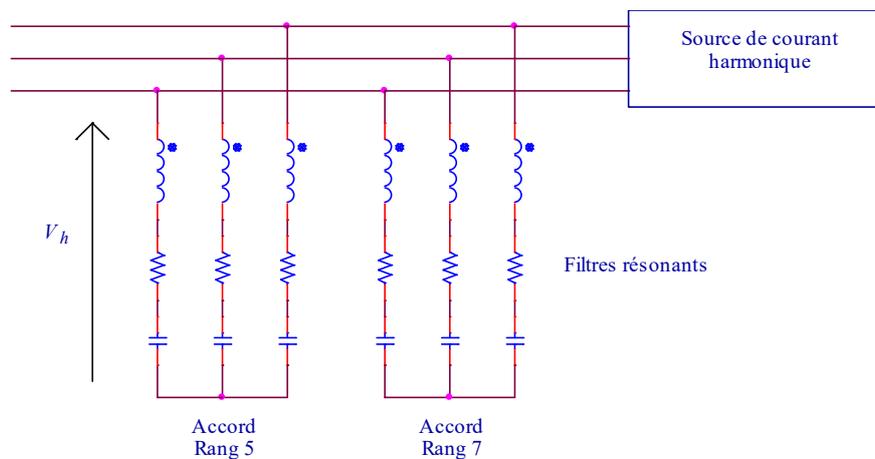


Figure 11-Installations de filtres résonants

▪ **Filtre amorti**

On distingue trois types de filtres amortis tels qu'illustrés en figure 12 ; nous avons un filtre amorti de premier ordre, un filtre amorti de second ordre et un filtre de troisième ordre.

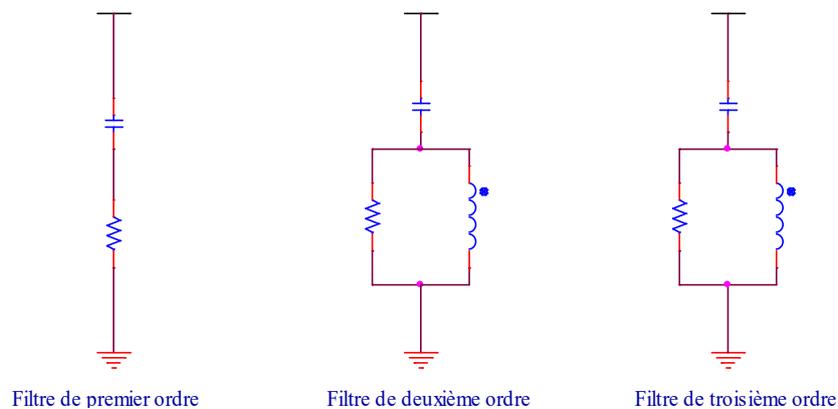


Figure 12-filtres amortis passe-haut

Les filtres résonants sont accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes. Et sur le reste du spectre (rangs > 11), les filtres amortis sont accordés pour limiter l'impédance harmonique.

### 1.6.2. Filtrage actif

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour compenser les harmoniques dans les systèmes de puissance industriels. Une évolution importante des dispositifs de commutation rapide comme les transistors de puissance et les thyristors à induction statique a développé l'étude des filtres actifs pour la compensation des harmoniques.

#### 1.6.2.1.Principe

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes.

Les convertisseurs de puissance totalement commandables utilisent un GTO, IGBT ou un MOSFET comme organe de réglage en vue d'asservir l'évolution de certaines grandeurs relatives au générateur ou au récepteur. Ces interrupteurs sont à amorçage et blocage commandés. L'utilisation de réseaux de commutation avec les thyristors classiques limite la fréquence de l'onduleur à environ 100 Hz. Les thyristors interruptibles par la gâchette étendent la fréquence jusqu'à environ 2 kHz, le transistor bipolaire à 10 kHz et le transistor MOS de puissance à 25 kHz [11].

#### 1.6.2.2.Principaux types de filtres Actifs

Le filtre actif peut être à source de tension ou à source de courant dont les schémas généraux sont présentés aux figures

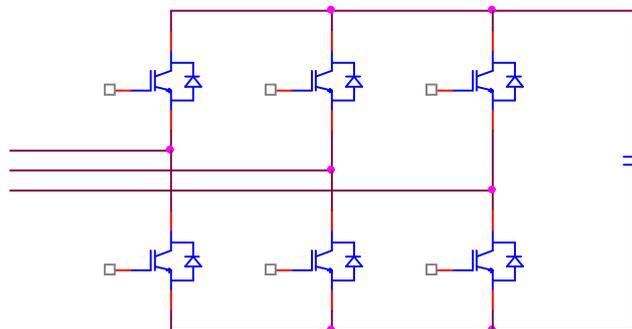


Figure 13-Convertisseur à source de tension

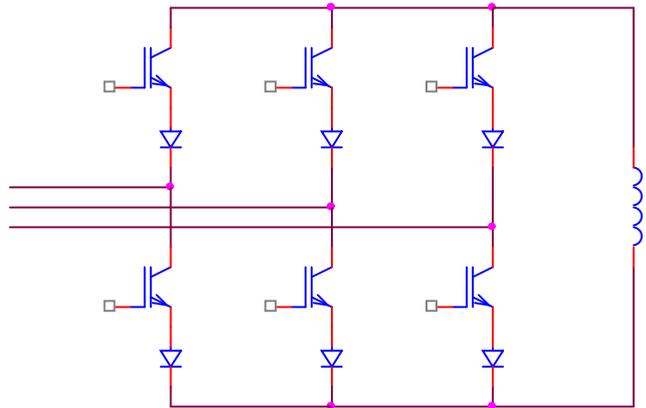


Figure 14-modèle d'un convertisseur à source de courant

Il existe:

- **Filtrage actif parallèle (shunt)**

Il est placé en parallèle avec la charge. On parle alors de filtre shunt ou parallèle. Il existe deux types de fonctionnement pour un filtre actif parallèle :

- *Compensation de courants harmoniques*

Le filtre actif parallèle compensateur de courant injecte un courant qui s'oppose au courant harmonique émis par la charge. L'ensemble charge/filtre se présente sur le réseau comme une charge qui absorbe un courant sinusoïdal. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir [9].

- *Compensation de tensions harmoniques*

Le filtre actif parallèle compensateur de tension a pour rôle de maintenir la tension sinusoïdale à ses bornes, c'est-à-dire du côté de la charge. Le filtre actif injecte un courant harmonique au travers de l'impédance de façon à créer à ses bornes une chute de tension harmonique qui permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge. Cette stratégie de filtrage convient lorsque l'impédance de ligne est suffisamment grande. En effet, le dimensionnement en courant du filtre actif dépend du rapport : tension-source/impédance-source [9].

- **Filtrage actif série**

Le filtre actif fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique du côté de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge non-linéaire. Il permet de limiter la tension harmonique aux bornes de la charge.

### 1.6.3. Filtrage hybride (mixte actif-passif)

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue de tension. De nombreuses variantes sont possibles ont été réalisées industriellement. Des performances élevées sont possibles, même avec un filtre actif de puissance réduite [10].

#### *Filtre actif en série avec la source/filtres passifs en parallèle avec la charge*

Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau, ils absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par la charge non linéaire. Le filtre actif fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge.

#### *Filtre actif et filtres passifs en parallèle avec la charge*

Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau.

Le filtre actif se comporte comme une source de tension contrôlée en courant. Les composantes harmoniques du courant de la charge sont absorbées par la branche parallèle. Le courant du réseau est alors sinusoïdal.

Le tableau suivant présente quelques éléments de comparaison entre le filtrage passif et le filtrage actif.

Tableau 3-comparaison entre le filtrage passif et le filtrage actif

Critère	Filtre actif	Filtre passif
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction de filtres accordés à des fréquences voisins
Rangs harmoniques compensés	Tous les rangs harmoniques dans sa bande passante	En général, un filtre passif par rang harmonique à compenser
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse son dimensionnement
Modification du réseau (variation d'impédance)	Pas d'influence sur les performances	Risque d'amplification des harmoniques (déplacement de fréquence d'antirésonance vers une fréquence harmonique)
Vieillessement	Pas d'influence	Risque de dégradation des performances (dérive de la fréquence d'accord)
Raccordement	Etude préalable simplifiée	Etude au cas par cas parfois complexe
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle-commande	Pas de surveillance particulière
Coût	Coût du filtre plus élevé faible coût d'étude de dimensionnement	Coût du filtre plus faible, étude de dimensionnement parfois complexe obligatoire
MTBF	Du même ordre qu'un onduleur (10 ans environ)	Du même ordre qu'un condensateur (20 ans environ)

#### 1.6.4. Filtres hybrides parallèles dédiés à l'amortissement de la résonance

L'atténuation de la résonance harmonique dans les systèmes de distribution est un problème qui demande une attention spéciale. La solution la plus efficace et la plus économique est d'adopter des filtres hybrides dans lesquels les filtres actifs agissent comme une composante variable fictive apte à changer les conditions opératoires du

système d'une manière dynamique dont le but d'atténuer la résonance. En plus, la performance du filtre passif est aussi améliorée. Selon la configuration du système de filtrage et de la stratégie de commande, la composante générée peut être résistive ou inductive ou elle peut être les deux. Il est important de souligner que le filtrage harmonique et l'atténuation de la résonance ne sont pas toujours compatibles. Le contrôle visé pour le filtrage harmonique en régime permanent peut avoir des effets négatifs par rapport à l'atténuation de la résonance durant le régime transitoire [5].

Les filtres actifs hybrides peuvent fournir aussi bien un bon amortissement de la résonance que le filtrage harmonique ; par ailleurs la performance dépend autant de la configuration que de la stratégie de contrôle. Le filtre actif agit comme une impédance fictive dans le circuit et change par conséquent les caractéristiques fréquentielles du système. Comme la nature de l'impédance active peut être variée par la commande, elle présente une solution adaptative pour l'amortissement de la résonance harmonique. Cependant, un compromis est à résoudre entre le filtrage harmonique et l'amortissement de la résonance [10].

Quatre topologies de filtres hybrides parallèles sont illustrées ci-dessous

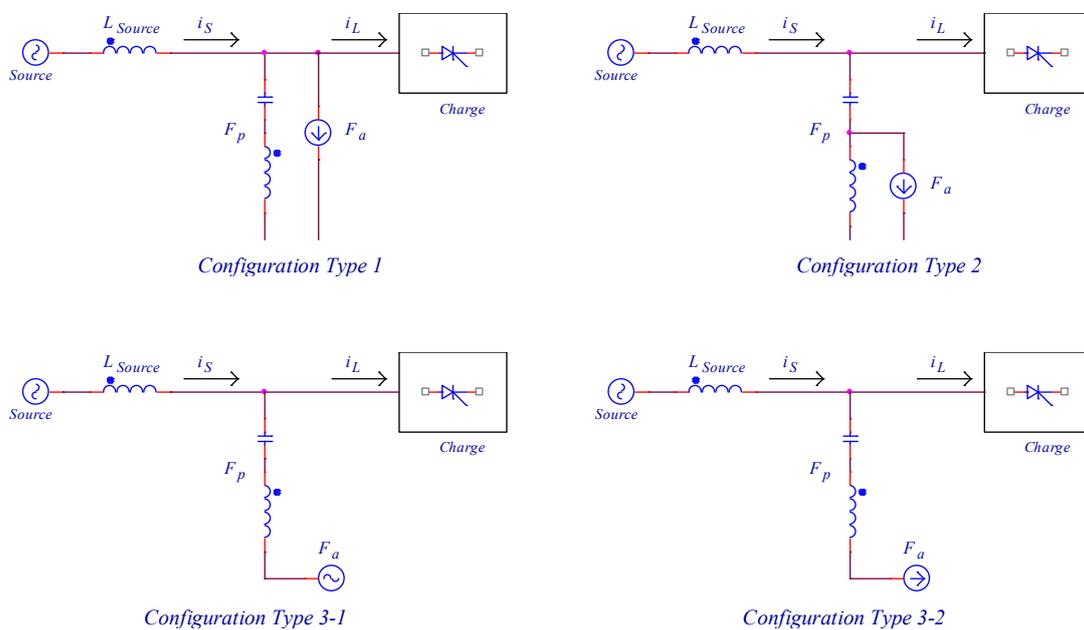


Figure 15-Topologies de filtres hybrides parallèles

Tableau 4- Caractéristiques des configurations de filtres hybrides parallèles

Type de configuration	Type 1	Type 2	Type 3-1	Type 3-2
Connexion du circuit du filtre actif	Filtre actif parallèle et filtre passif parallèle	Filtre actif en parallèle avec l'inductance du filtre passif	Filtre actif en série avec un filtre passif parallèle	Filtre actif en série avec un filtre passif parallèle
Comportement du filtre	Source de courant harmonique	Source de tension et courant harmonique	Source de tension et courant harmonique	Source de courant harmonique
Méthode d'amortissement	Injection d'un courant résistif pour augmenter le facteur d'amortissement	Injection partielle d'un courant résistif pour augmenter le facteur d'amortissement	Insertion d'une tension dans la ligne pour isoler la propagation des harmoniques entre la source et la charge	Insertion d'une tension négative dans le filtre passif pour court-circuiter le courant harmonique de charge
Effets de l'amortissement	Résonance parallèle	Résonances série et parallèle	Résonances série et parallèle	Résonance parallèle
Inconvénients	Amplification des tensions harmoniques	Le facteur $K_I$ exigé est relativement important	La bande passante du filtre est faible	Pas d'effet dans le cas de la résonance série

## **1.7. Conclusion**

La qualité de l'énergie électrique est devenue un pôle attracteur de chercheurs, expérimentateurs, managers et consultants, vu le grand rôle qu'elle joue sur tous les plans. Le domaine de la qualité de l'énergie électrique se caractérise par deux grands axes de recherche :

- Comprendre la cause des perturbations ainsi que la propagation harmonique et particulièrement le problème de résonance dû à la circulation de ces harmoniques dans les réseaux électriques.
- Trouver et choisir la solution la plus appropriée économiquement et techniquement et surtout pour le contrôle des harmoniques en précisant les avantages et les inconvénients de chaque solution et introduire de nouvelles techniques telles que le filtrage hybride dont le but est d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

## **CHAPITRE II. Utilisation de l'électronique de puissance dans le domaine de conversion de l'énergie électrique**

### **2.1. Introduction**

Depuis plusieurs années l'électronique de puissance connaît un développement considérable ; on trouve de plus en plus des convertisseurs connectés sur le réseau électrique qui deviennent une solution optimale pour résoudre des problèmes spécifiques.

L'électronique de puissance a pour objet de modifier la nature de l'énergie électrique dans le but d'utiliser cette énergie avec le rendement maximum. La gamme de puissance des montages de l'électronique de puissance va de quelques watts (variateur de vitesse de moteur de ventilateur électrique) à plusieurs gigawatts (liaisons à courant continu à très haute tension pour l'interconnexion de réseaux électriques) [3].

Les systèmes de l'électronique de puissance trouvent une application de plus en plus importante dans les réseaux électriques. En effet, la plupart de ces systèmes sont équipés de thyristors, surtout pour des puissances élevées. Les thyristors, GTO et les transistors de commutation (en particulier les transistors IGBT) ont trouvé des développements importants dans ces dernières années. Ils supportent des tensions de quelques KV et des courants de quelques KA par élément. Cela permet l'emploi de convertisseurs statiques modernes pour des puissances très élevées de plusieurs MW.

### **2.2. Les Convertisseurs Statiques**

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques semi-conducteurs capables de modifier la forme et/ou la fréquence d'une onde électrique.

Ils sont réalisés à l'aide de circuits électroniques qui permettent la liaison entre deux réseaux électriques parcourus par des courants de natures différentes, cette liaison est obtenue en reliant entre elles, d'une manière déterminée périodique et unidirectionnelle, les bornes des deux réseaux de façon à obtenir la conversion désirée.

Un convertisseur statique est une interface entre la source d'énergie électrique et son utilisation. On distingue deux types de source:

- Les sources de tension continue caractérisée par la valeur  $U$  de la tension ;
- Les sources de tension alternative définie par les valeurs de la tension efficace et de la fréquence  $f$ .

Un convertisseur peut être appelé à jouer deux rôles différents :

- Modifier la nature des grandeurs électriques : un redresseur permet l'alimentation d'un moteur à courant continu à partir d'un réseau alternatif ;
- Régler la puissance d'un système : un hacheur permet de faire tourner à vitesse variable un moteur à courant continu alimenté par une tension continue fixe

Ces deux fonctions sont donc souvent associées : un redresseur commandé permet d'alimenter un moteur à courant continu à partir d'un réseau alternatif tout en faisant varier sa vitesse.

### 2.3. Classification des convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques semi-conducteurs capables de modifier la forme et/ou la fréquence d'une onde électrique.

Ils sont réalisés à l'aide de circuits électroniques qui permettent la liaison entre deux réseaux électriques parcourus par des courants de natures différentes, cette liaison est obtenue en reliant entre elles, d'une manière déterminée périodique et unidirectionnelle, les bornes des deux réseaux de façon à obtenir la conversion désirée.

Les interrupteurs électroniques les plus couramment utilisés actuellement dans les convertisseurs statiques sont les diodes, les thyristors, les GTO, les transistors bipolaires, MOSFET, et IGBT [2].

Les convertisseurs statiques peuvent être classés de la manière suivante :

- Les redresseurs : ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, s'ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable.
  - Les hacheurs : ce sont des convertisseurs continu-continu délivrant une tension continue réglable à partir d'une tension continue de valeur fixe, ils jouent ainsi le rôle de transformateur à courant continu.
  - Les onduleurs : ce sont des convertisseurs continu-alternatif, ils permettent donc de convertir une tension continue en une tension alternative, on les désigne alors d'onduleurs de tension (ou un courant continu en un courant alternatif, on parle alors de mutateurs).
  - Les gradateurs : ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif, ou variateur de courant alternatif lorsque  $f_1 = f_2$ . Les gradateurs produisent des tensions et des courants alternatifs à partir d'une alimentation alternative sans modifier la fréquence des tensions, ils jouent ainsi le rôle des autotransformateurs abaisseurs réglables.
-

- Les cyclo-convertisseurs : ce sont des convertisseurs alternatif-alternatif (ou convertisseur de fréquence), c'est-à-dire qu'il permet la conversion d'une tension alternative de fréquence  $f_1$  en tension alternative de fréquence  $f_2$ .

Dans ce chapitre, on va étudier les convertisseurs Alternatif/Continu et Continu/Alternatif utilisés dans le domaine de la transmission de l'énergie électrique

### 2.4. Les Convertisseurs CA/CC

Les convertisseurs alternatif/continu consistent à transformer une tension alternative (monophasée ou triphasée) en tension continue en utilisant des redresseurs à base de l'électronique de puissance.

Ces convertisseurs sont présents dans de nombreux équipements industriels et domestiques ainsi que dans les dispositifs de conversion de l'énergie électrique. Nous citons ci-dessous les applications les plus courantes:

- Variateurs de vitesse pour moteurs à courant alternatif et à courant continu ;
- Circuit d'excitation des alternateurs ;
- Chargeurs de batterie ;
- Liaison à courant continu (HVDC) ;
- Alimentation des systèmes informatiques et audio visuels ;
- Dispositifs d'éclairage de nouvelle génération.

Le principe de fonctionnement est de redresser un ensemble de tensions alternatives sinusoïdales et formant un système équilibré. Ces tensions peuvent provenir directement d'un alternateur, mais généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur.

Ces convertisseurs nous permettent de réguler la puissance délivrée à une charge en modifiant la tension continue appliquée à ses bornes à l'aide des thyristors, en jouant sur l'angle d'amorçage.

#### 2.4.1. Redresseur monophasé simple alternance

Le circuit de principe est donné sur la figure 16.

Pendant l'alternance positive, on amorce le thyristor en injectant une impulsion sur sa gâchette à  $t = \alpha$ , T1 conduit et l'entrée est repérée à la sortie. Quand la tension d'entrée change de polarité, le thyristor ne se bloque pas directement, l'inductance se décharge à travers celui-ci et le thyristor se bloque dès que le courant d'anode devient inférieur à son courant de maintien.

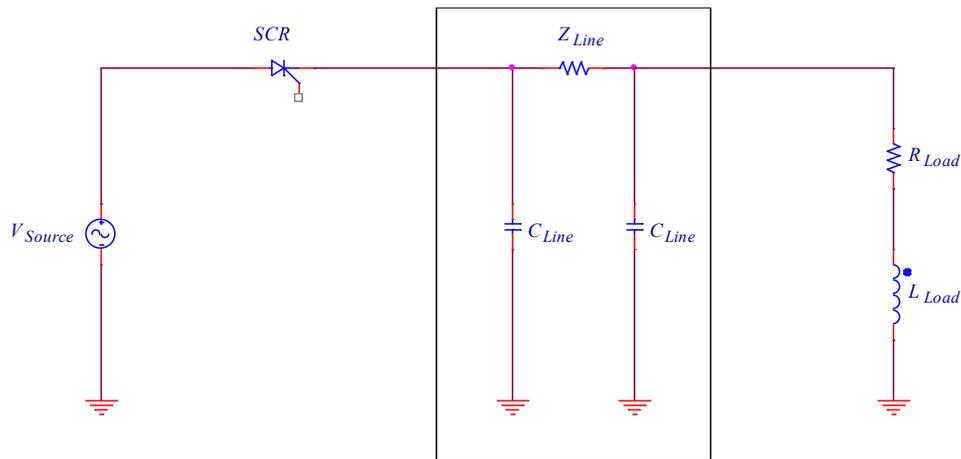


Figure 16-Redresseur monophasé simple alternance

La forme d'onde et le spectre fréquentiel de la tension redressée, courant redressé et le courant de source sont présentés respectivement sur les figures 17, 18 et 19 ; la tension de commutation aux bornes du thyristor est présentée sur la figure 20.

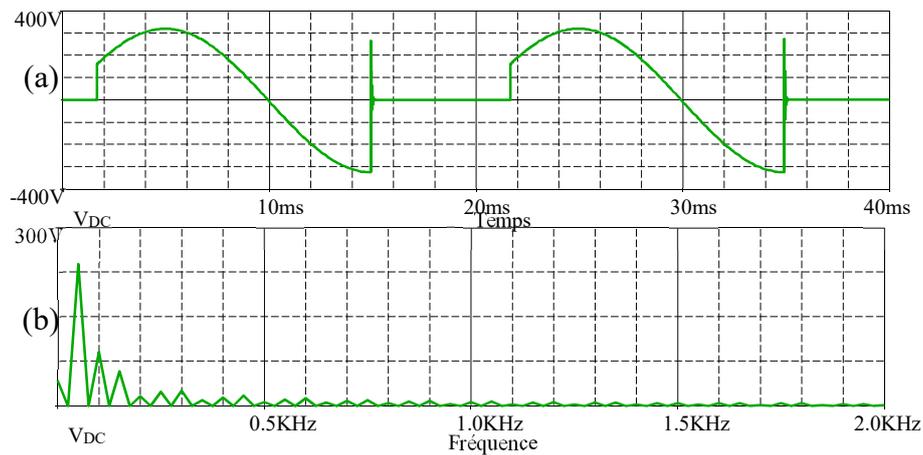


Figure 17-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

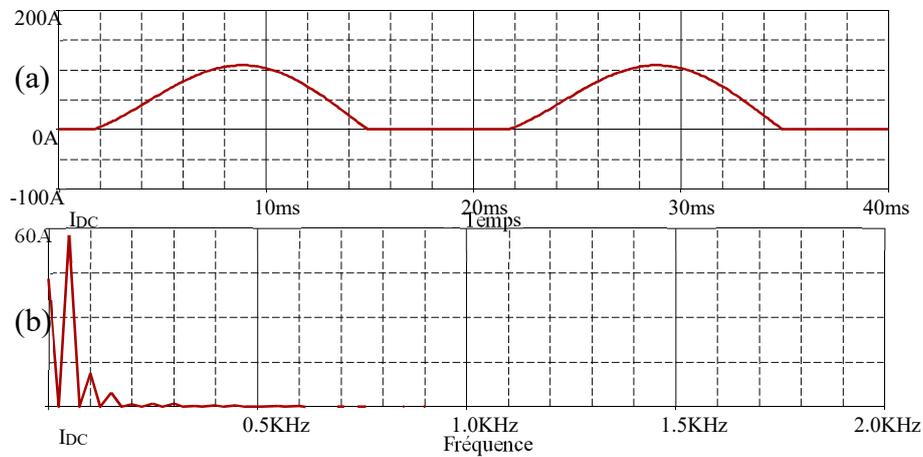


Figure 18-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

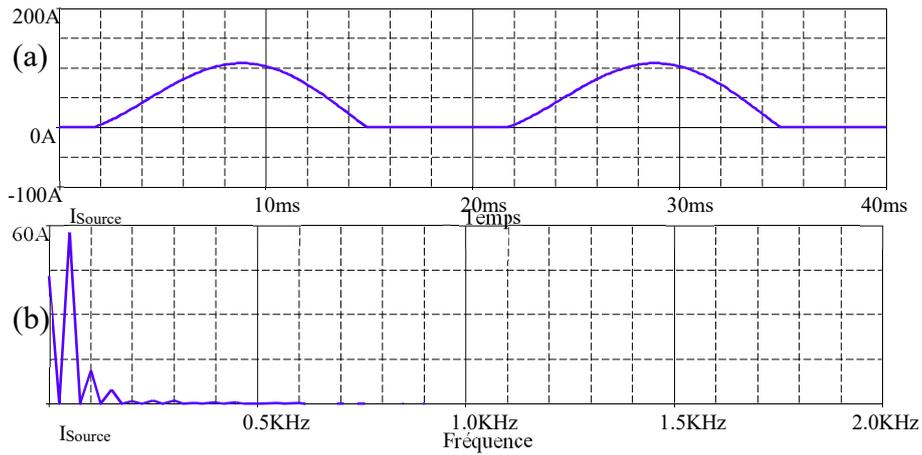


Figure 19-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

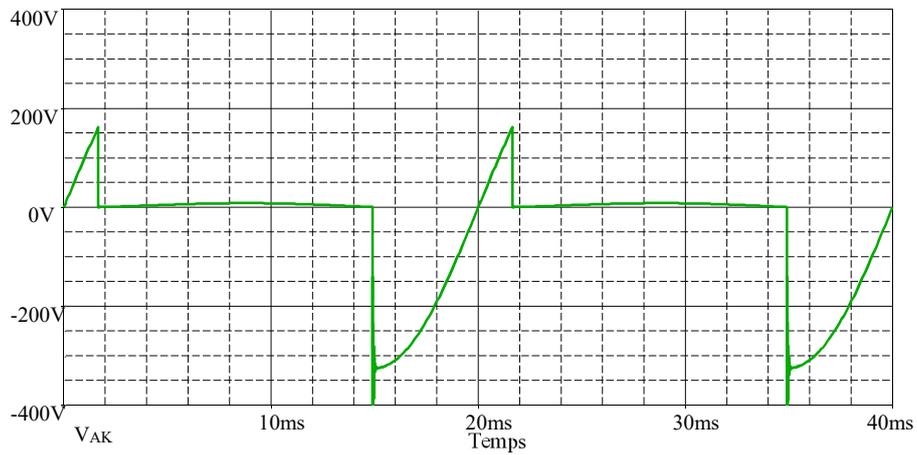


Figure 20-Tension aux bornes du thyristor

### 2.4.2. Redresseur monophasé double alternance

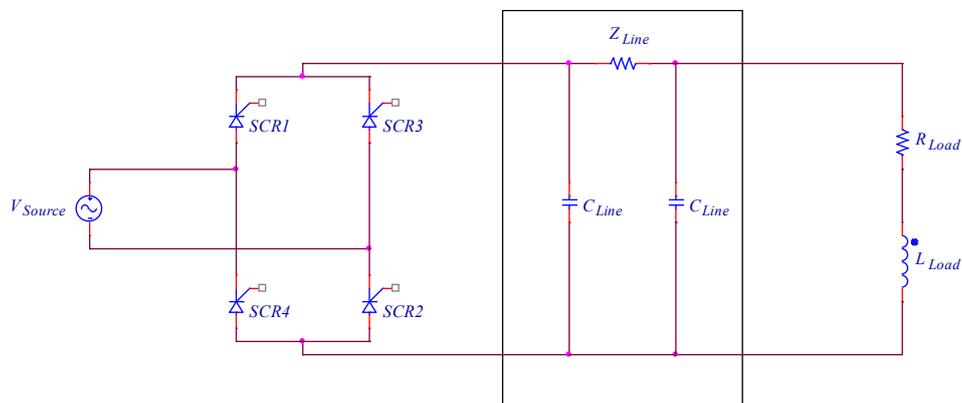


Figure 21-Redresseur monophasé double alternance

La forme d'onde et le spectre fréquentiel de la tension redressée, courant redressé et le courant de source sont présentés respectivement sur les figures 22, 23 et 24 ; la tension de commutation aux bornes du thyristor est présentée sur la figure 25.

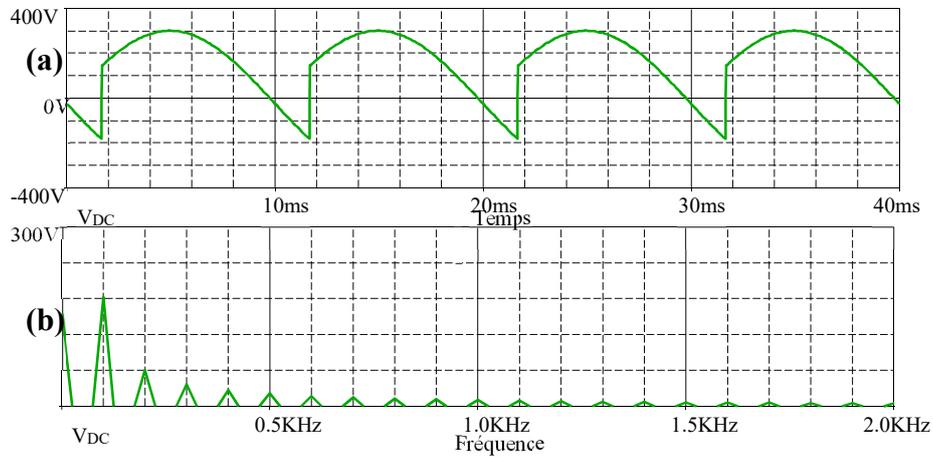


Figure 22-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

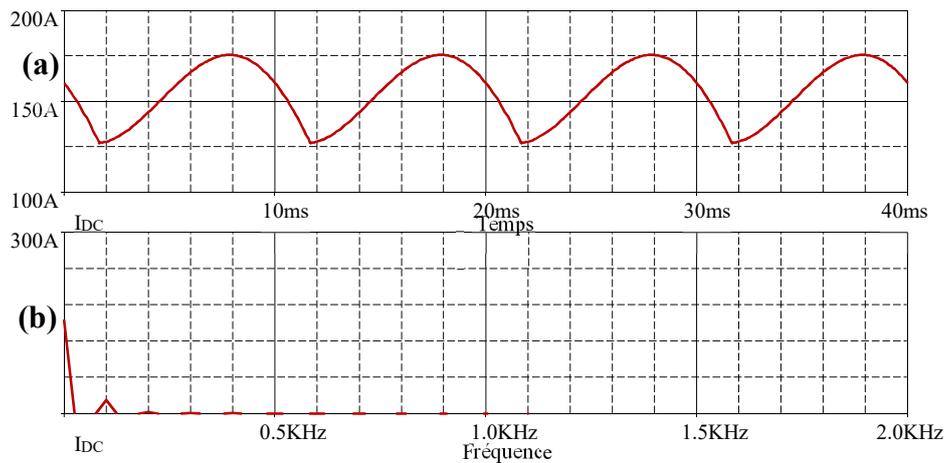


Figure 23-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

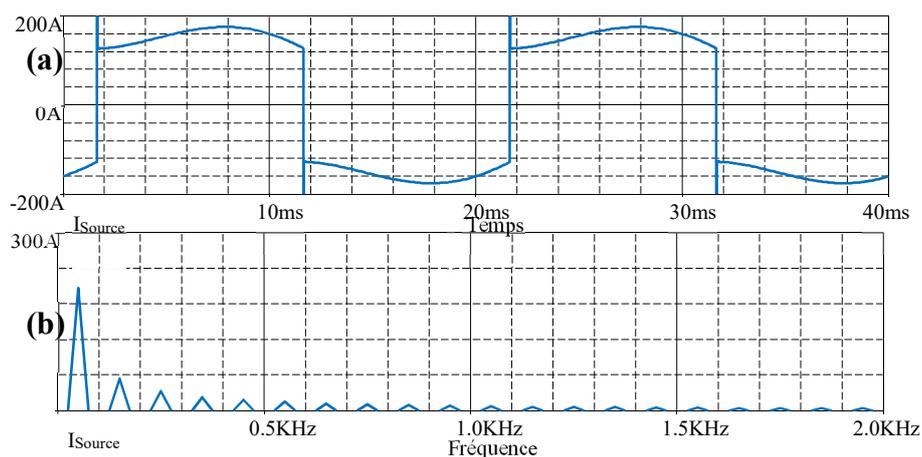


Figure 24-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

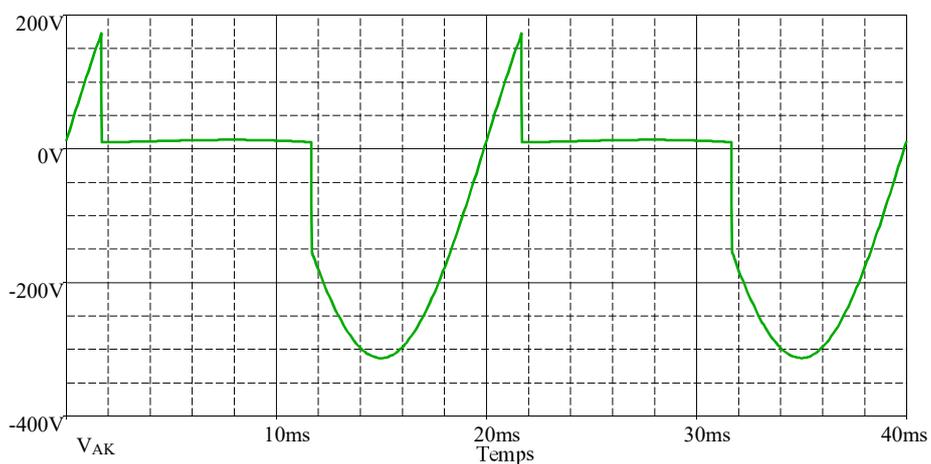


Figure 25- Tension aux bornes du thyristor

### 2.4.3. Redresseur Triphasé PD3

Le redresseur parallèle double PD3 étudié est représenté sur la figure 26. Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de thyristors.

- Un commutateur à cathode commune (SCR1, SCR3, SCR5).
- Un commutateur à anode commune (SCR4, SCR6, SCR2).

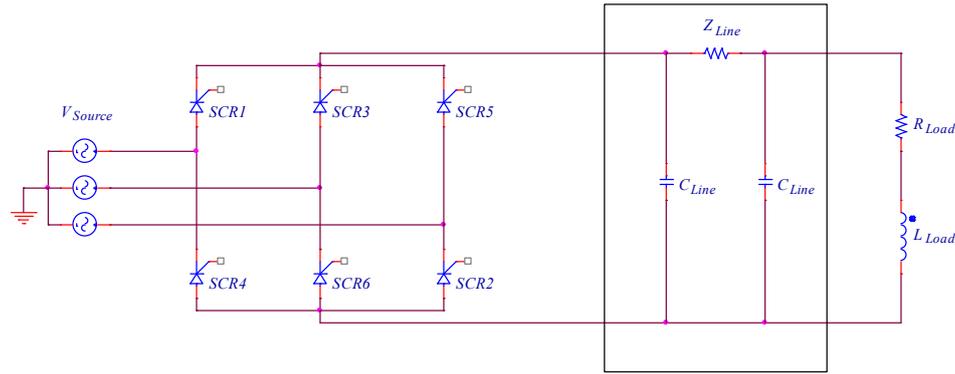


Figure 26-Modèle du redresseur PD3 étudié

Tableau 5-Paramètres de simulation PD3

$V_s$ (V)	$R_L$ ( $\Omega$ )	$L_L$ (mH)	$R_{ch}$ ( $\Omega$ )	$L_{ch}$ (mH)
230	0.1	1.273	1	12.73

La forme d'onde et le spectre fréquentiel de la tension redressée, courant redressé et le courant de source sont présentées respectivement sur les figures 27, 28 et 39 ; la tension de commutation aux bornes du thyristor est présentée sur la figure 30.

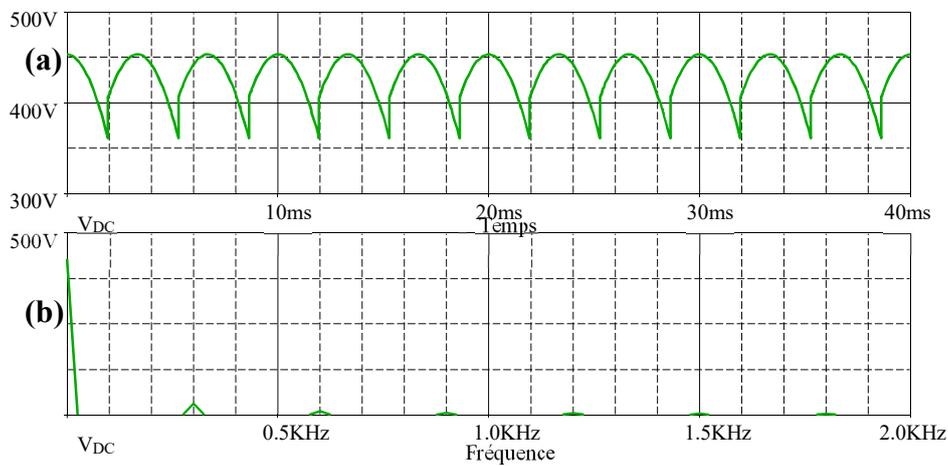


Figure 27-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

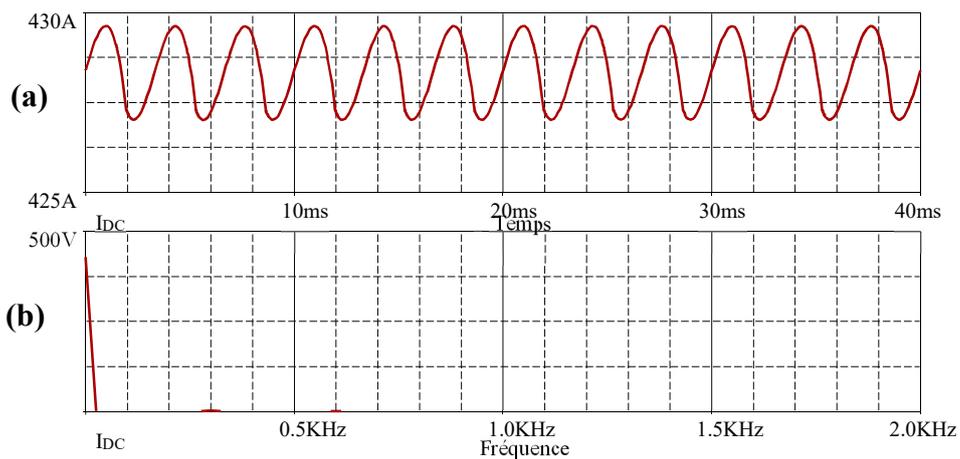


Figure 28-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

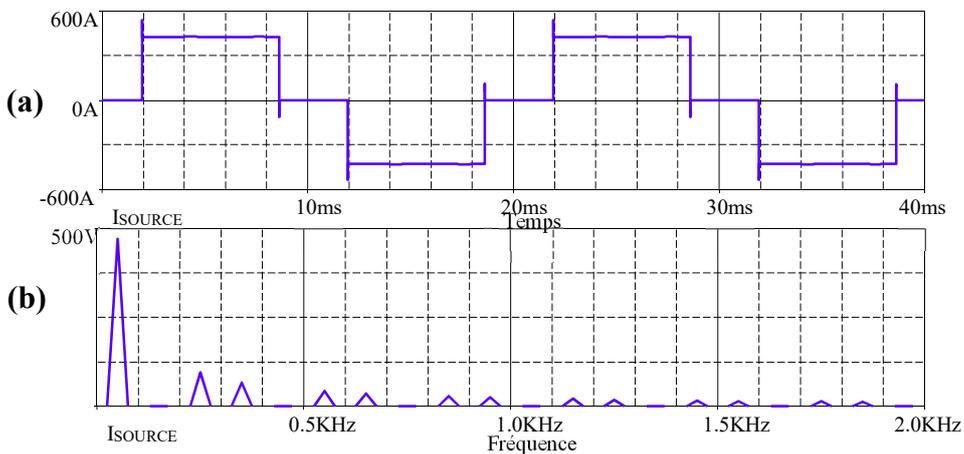


Figure 29-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

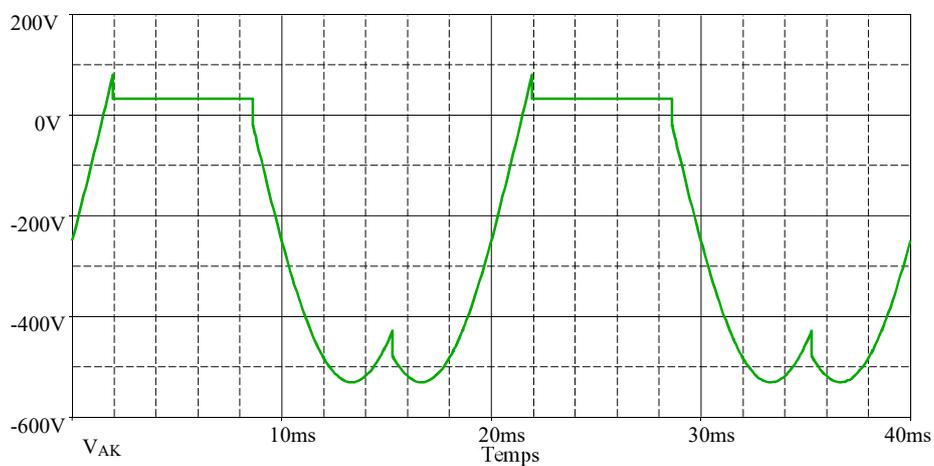


Figure 30-Tension aux bornes du thyristor

### 2.4.4. Redresseur Triphasé S3

Le redresseur S3 est le redresseur le plus utilisé des montages de type série qui redresse les trois tensions engendrées dans les enroulements du triangle.

Pour ce modèle du redresseur, le secondaire du transformateur est couplé en  $\Delta$  pour avoir un décalage de  $(30^\circ)$ , et connecté à deux groupes de thyristors.

- Un commutateur à cathode commune (SCR1, SCR3, SCR5)
- Un commutateur à cathode commune (SCR4, SCR6, SCR2)

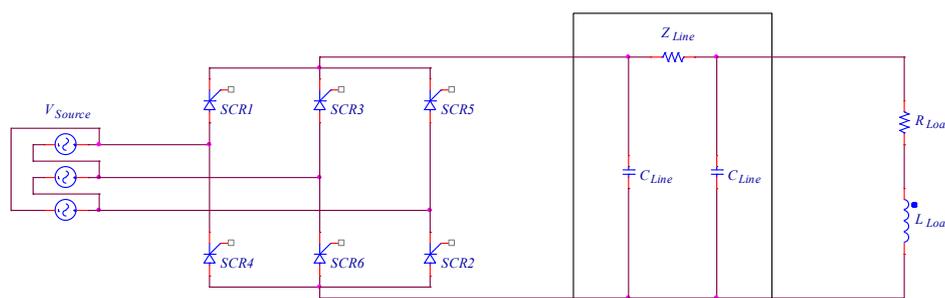


Figure 31-Modèle du redresseur S3 étudié

La forme d'onde et le spectre fréquentiel de la tension redressée, courant redressé et le courant de source sont présentées respectivement sur les figures 32, 33 et 34 ; la tension de commutation aux bornes du thyristor est présentée sur la figure 35.

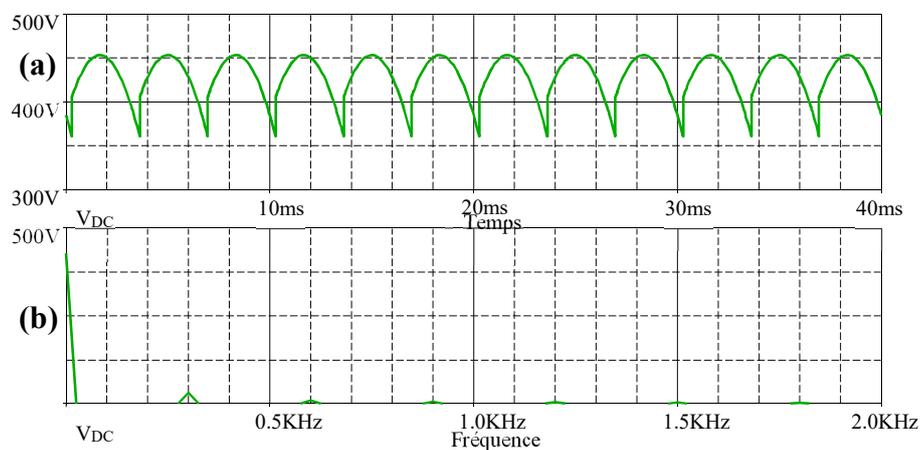


Figure 32-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

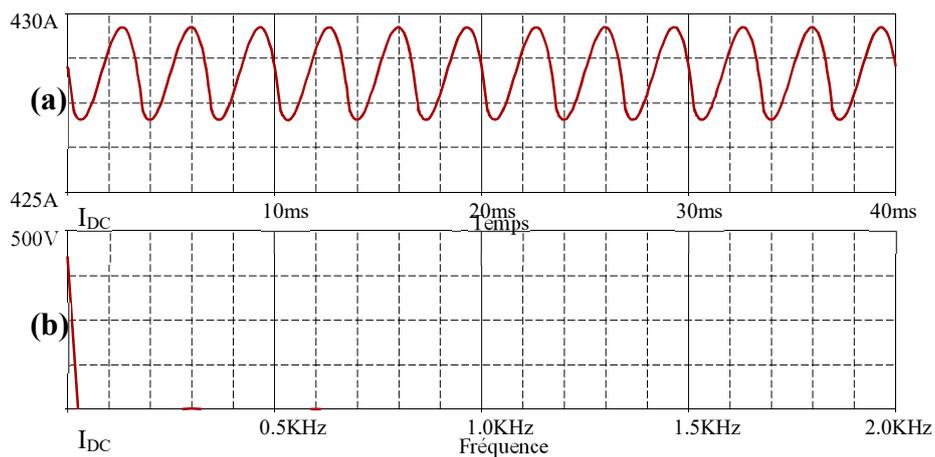


Figure 33-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

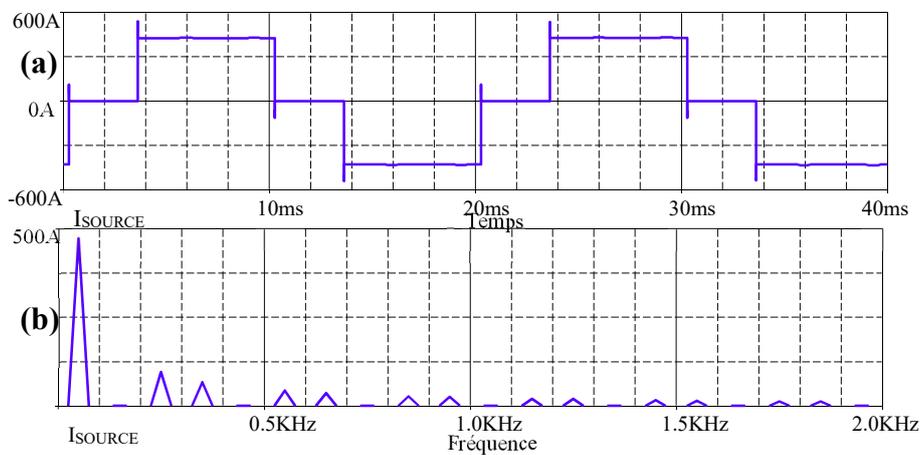


Figure 34-Courant de source (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

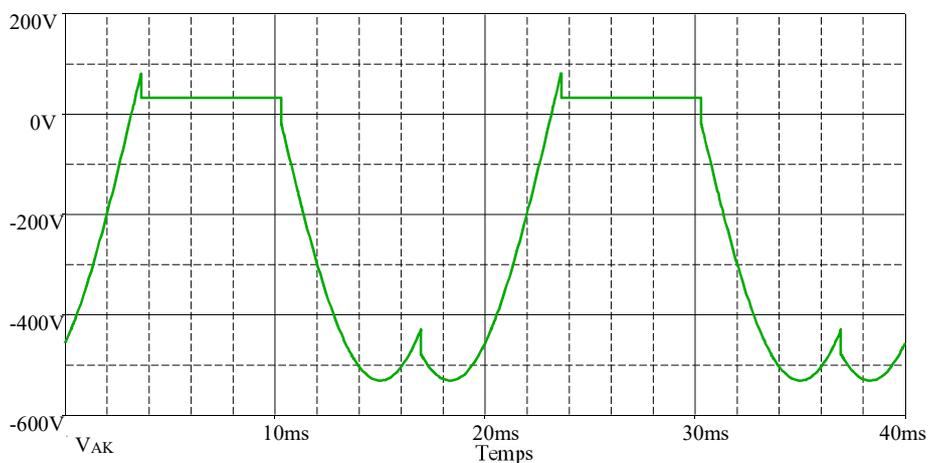


Figure 35-Tension aux bornes du thyristor

### 2.4.5. Redresseur Dodécaphasé

Pour obtenir un convertisseur à 12 pulsations, il faut connecter deux ponts de Graetz en série. Le premier transformateur en Y-Y et le deuxième transformateur en Y- $\Delta$ . Si on veut que les deux ponts en série possèdent la même valeur de tension cc, il faut que les tensions des secondaires des transformateurs soient égales. En conséquence, il est nécessaire de définir le rapport entre les enroulements du secondaire et les enroulements du primaire du transformateur [20].

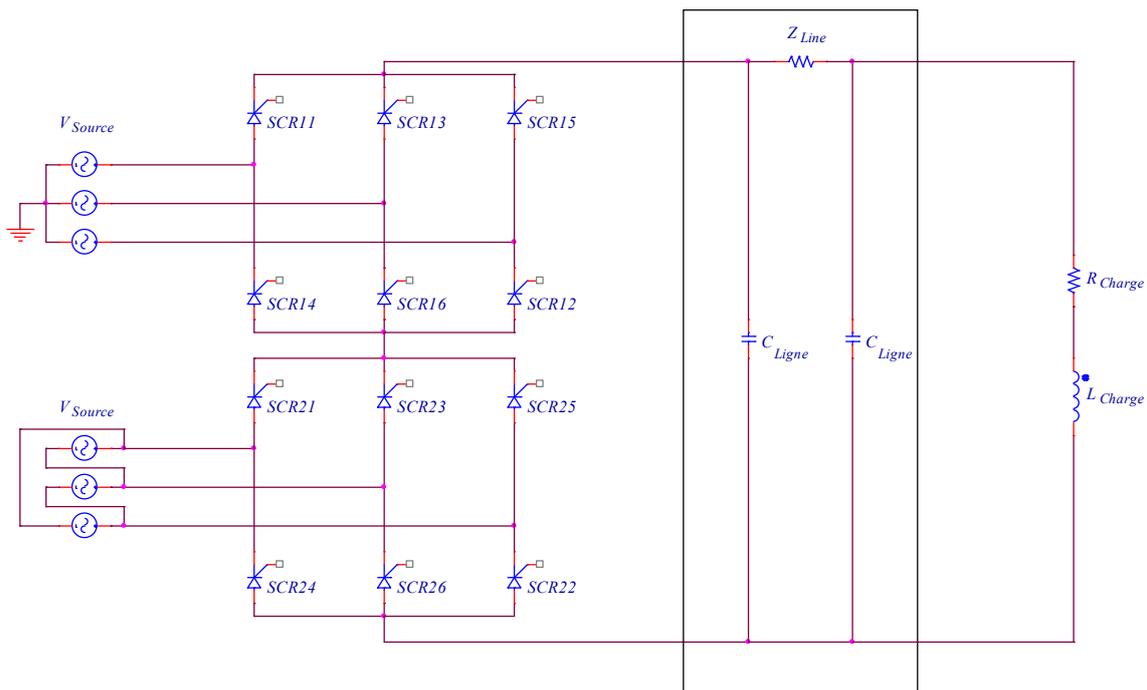


Figure 36-Modèle du redresseur dodécaphasé

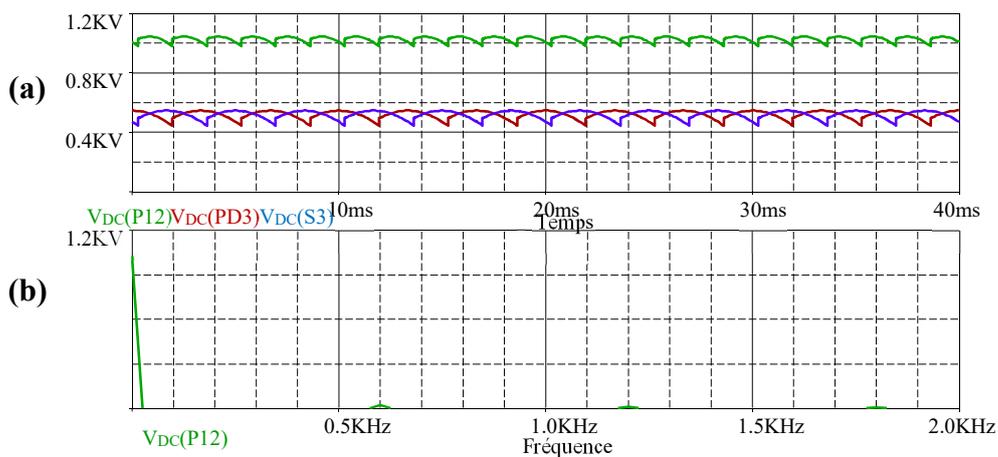


Figure 37-Tension redressée (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

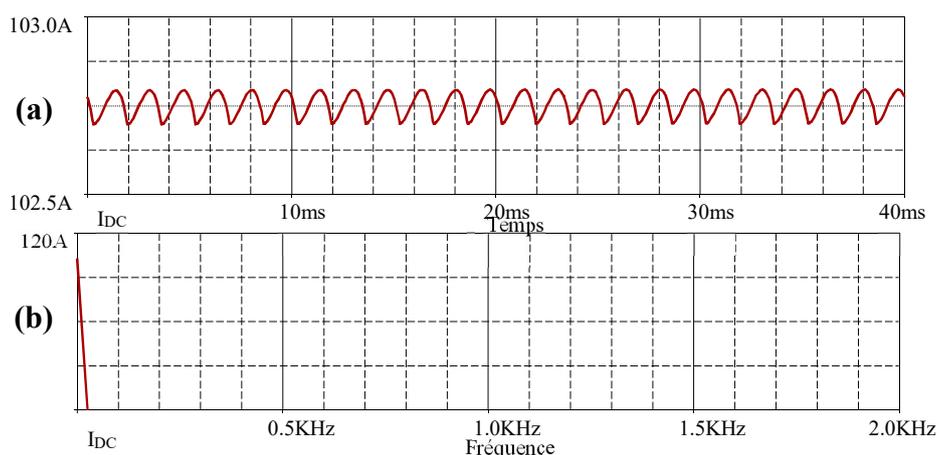


Figure 38-Courant redressé (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

#### 2.4.6. Phénomène d'empiètement dans les redresseurs triphasés commandés

Dans les simulations précédentes, il a été supposé que la commutation du courant d'un thyristor à un autre se passe d'une manière instantanée. En pratique, l'inductance du transformateur est existante, la commutation du courant est retardée, donc il aura l'apparition d'un temps de commutation [18].

Le phénomène de l'empiètement est la diminution de la tension de sortie en valeur moyenne à cause des inductances. L'effet de l'empiètement existe dans tous les redresseurs, on prend le cas d'un redresseur commandé PD3, les figures 39 et 40 montrent respectivement la tension redressée et la tension de commutation en présence de l'angle d'empiètement  $\gamma$ .

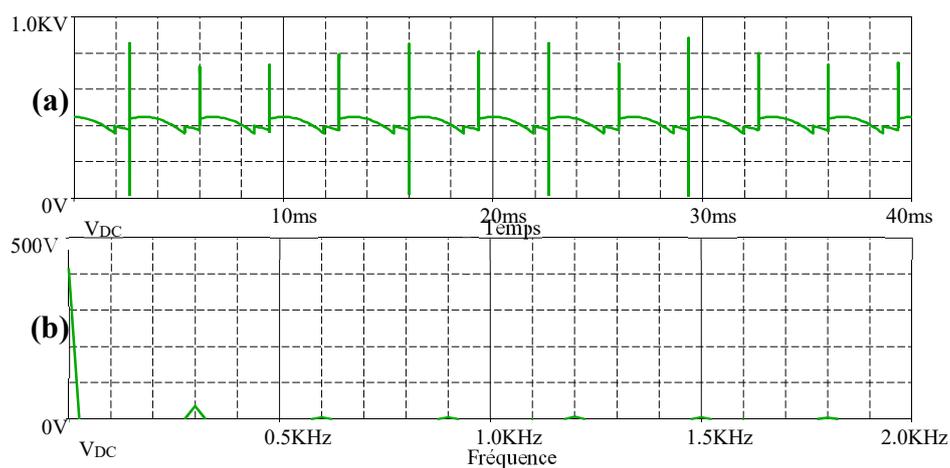


Figure 39-Tension redressée avec empiètement (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

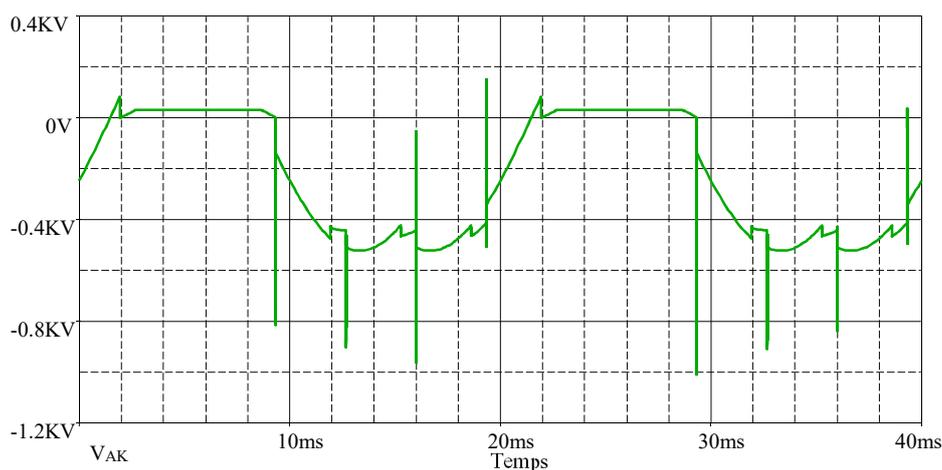


Figure 40-Tension de commutation avec empiètement

## 2.5. Les Convertisseurs CC/CA

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques transformant, la tension continue en tension alternative, la tension de sortie appliquée aux bornes de la charge peut être constante ou variable à une fréquence constante ou variable.

Une tension de sortie variable est obtenue en variant la tension d'entrée continue, et le gain de l'onduleur est maintenu constant d'un autre côté. Si la tension continue d'entrée est fixe, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur qui est normalement réalisé par la commande.

Il existe deux structures duales d'onduleur :

- L'onduleur de tension relie un générateur de tension continue et un récepteur de courant alternatif.
- L'onduleur de courant relie un générateur de courant continu et un récepteur de tension alternative.

### 2.5.1. Les onduleurs triphasés à deux niveaux

L'onduleur triphasé est utilisé dans les applications de puissance. Le signal de gâchette de l'onduleur monophasé doit être avancé ou retardé de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre pour obtenir un système équilibré.

Trois types de signal de commande peuvent être appliqués, soit le fonctionnement plein onde  $180^\circ$ , le fonctionnement décalé à  $120^\circ$  ou la modulation par largeur d'impulsion MLI.

La topologie deux niveaux a été utilisée pour plusieurs niveaux de puissance. Dans un système réel, les IGBT/diodes sont assemblés en série pour former des valves à très haute tension. Chaque IGBT est capable de supporter des courants entre 1 à 2 kA et des tensions jusqu'à environ 3kV. Grâce à la capacité d'allumage et de coupure de l'IGBT, chaque valve peut commuter plusieurs fois par cycle. Une diode antiparallèle est insérée afin de permettre le passage du courant négatif [32-36].

### **2.5.2. Les modes de commande des onduleurs à deux niveaux**

Les types de commande les plus utilisés pour cette topologie sont :

#### **2.5.2.1. Commande pleine onde**

Il est indispensable que le créneau de tension  $v(t)$  possède une valeur moyenne nulle, chaque interrupteur doit donc conduire pendant une demi-période  $T/2$ .

Dans ces conditions, la valeur efficace de cette tension à deux niveaux est  $V = E$  Sur charge résistante et inductive [27].

#### **2.5.2.2. Commande décalée**

Les deux demi-points fonctionnent avec la même période  $T$ , et leurs commutations sont telles que :  $K_1 = \overline{K_3}$  et  $K_2 = \overline{K_4}$ . Mais la commande est décalée d'une durée  $\delta$  comprise entre 0 et  $T/2$ . La tension  $v(t)$  est un créneau à trois niveaux de tension, elle fait apparaître des phases de « roue libre » où la charge se retrouve court-circuitée par deux interrupteurs passants. Sa valeur moyenne est nulle, sa valeur efficace est fonction de  $\delta$  :

$$V^2 = \frac{2}{T} \int_{\delta}^{T/2} E^2 dt$$

#### **2.5.2.3. Commande MLI**

Chaque période de la tension  $v(t)$  est découpée par action sur les commutateurs de l'onduleur en plusieurs créneaux de largeur différente. L'opération a un double but : modifier le contenu harmonique de la tension  $v(t)$  de façon à repousser ses harmoniques vers les rangs élevées. Le filtrage de la tension  $v(t)$  s'en trouvera facilité ; permettre le réglage de la valeur efficace  $v_1$  du fondamental de la tension  $v(t)$ . Ceci est indispensable dans le cas de l'alimentation d'un moteur à fréquence variable (variation de vitesse) afin de pouvoir fonctionner à flux constant ( $U/f$  est constante) [26].

### 2.5.3. Modèle étudié d'un onduleur à deux niveaux à commande MLI sinusoïdale

Le modèle étudié d'un convertisseur deux niveaux trois phases est présenté à la Figure 41, configuré avec les paramètres cités sur le tableau 6.

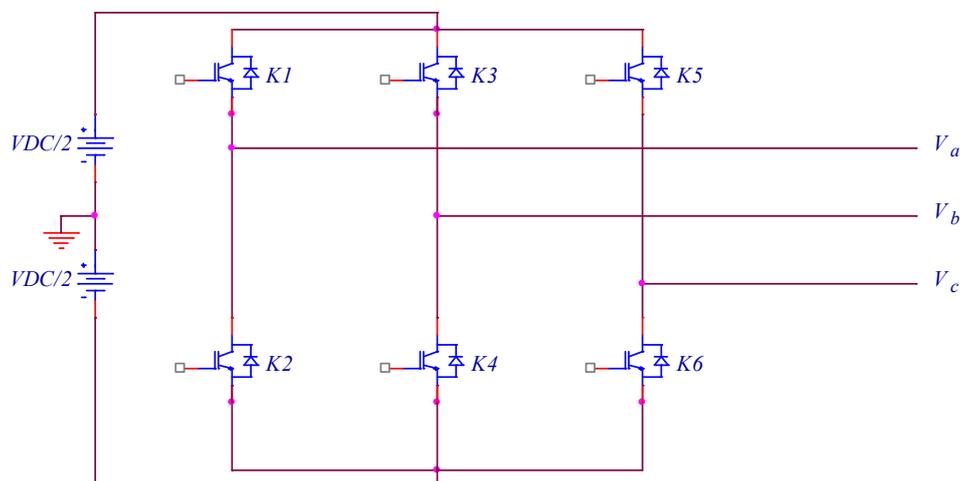


Figure 41-Modèle d'un onduleur triphasé à deux niveaux

Tableau 6-Paramètres de simulation Onduleur à deux niveaux

$V_{DC}$ (V)	$R_{ch}$ ( $\Omega$ )	$L_{ch}$ (mH)
300	1	12.73

Les résultats de simulation obtenus sont représentés comme suit :

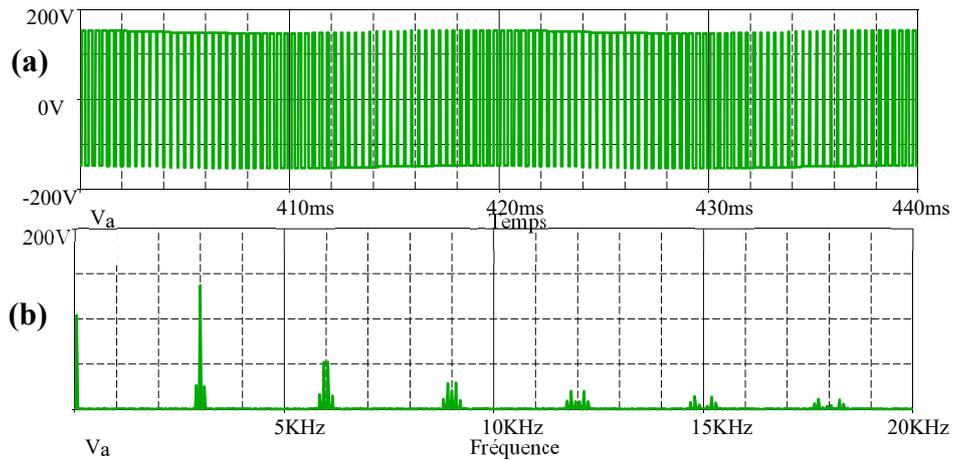


Figure 42-La tension simple de l'onduleur à deux niveaux (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

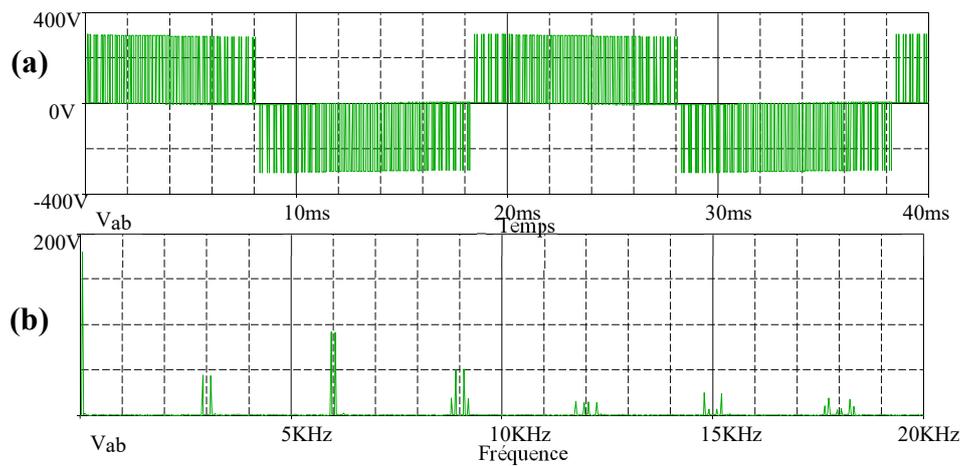


Figure 43-La tension composée de l'onduleur à deux niveaux (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

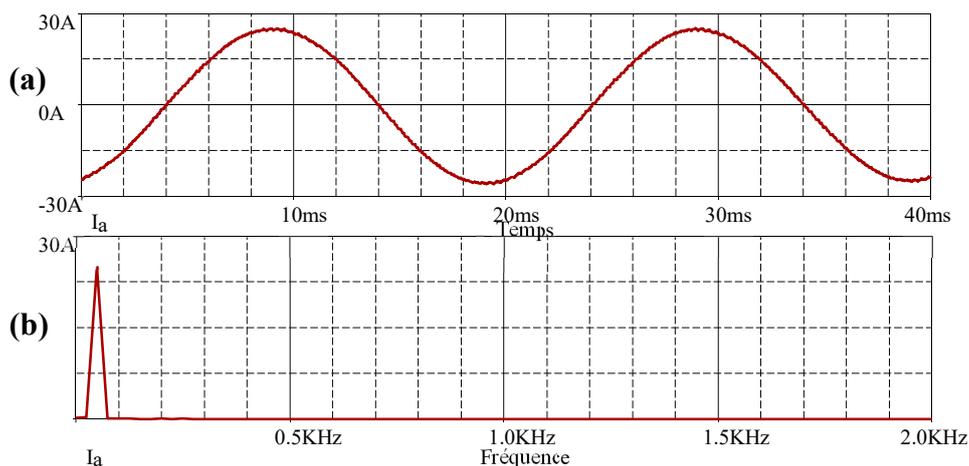


Figure 44-Le courant à la sortie de l'onduleur à deux niveaux (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

## 2.6. Analyse des résultats de simulations

Les formes d'ondes des redresseurs commandés montrent que l'angle d'amorçage  $\alpha$  retarde le courant de la source qui contient des harmoniques, ce qui augmente la valeur efficace de sa composante fondamentale.

La courbe d'empiètement est située entre la tension du thyristor qui commence à conduire et la tension de celle en fin de conduction.

Pour les onduleurs, on observe que les harmoniques multiples de trois sont égales à zéro pour les tensions composées.

## 2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, notre travail est dédié à l'étude et la simulation des redresseurs et des onduleurs qui ont été modélisés avec une bonne précision. Ils influent sur les formes d'ondes de tension, courant et la tension de commutation.

La performance des redresseurs et des onduleurs s'observe dans leur spectre d'harmoniques, que nous estimons très satisfaisantes, particulièrement pour le courant.

## **CHAPITRE III. Etude et réalisation expérimentale des émulateurs de laboratoire utilisés dans le transport de l'énergie électrique**

### **3.1. Introduction**

Les réseaux électriques intègrent, de plus en plus des éléments d'électronique de puissance pour la conversion et le transport de l'énergie électrique. Une des premières applications est l'utilisation des liaisons HVDC comme moyen de transmission de l'énergie électrique.

L'étude des circuits d'électronique de puissance peut se faire par l'utilisation d'outils de simulation. Cette simulation permet à travers des essais sur les prototypes de laboratoire, d'étudier des phénomènes et ce, expérimentalement.

Un simulateur temps-réel dédié à la simulation de réseaux électriques peut être amené à tester des équipements tels que :

- Les systèmes de protection de défauts. Ils permettent de détecter le franchissement de seuils de tensions et de courants qu'ils contrôlent (relais de protections, indicateurs de passage de défauts...). En cas de défaut, un signal d'information ou de déclenchement peut alors être généré ;
- Les systèmes de régulation. Par exemple, les systèmes permettant de contrôler la tension en un point du réseau par l'injection d'énergie réactive (excitation des alternateurs...). Les systèmes permettant de réguler la fréquence par action sur la puissance active injectée au réseau (producteurs d'énergie, vitesse des alternateurs...);
- Les systèmes de contrôle de dispositifs à base d'électronique de puissance. Pour le réseau de transport, pour le réseau de distribution et les systèmes d'interfaçage de producteurs d'énergie (systèmes éoliens, photovoltaïques...).

### **3.2. Type des simulateurs**

Elle existe plusieurs types de simulateurs :

#### **3.2.1. Les simulateurs analogiques**

Historiquement, les premiers simulateurs furent analogiques. Ces simulateurs ont été basés sur des composants électriques physiques à taille réduite ou des fonctions de transfert équivalentes. Les principaux avantages de ces simulateurs sont qu'ils fonctionnent naturellement en temps-réel, puisque basés sur des composants physiques. Par ailleurs, le fonctionnement temps-réel est assuré quel que soit la complexité des réseaux représentés. Les grandeurs physiques d'un réseau électrique que sont les courants

---

et les tensions existent, à valeur réduite, sur un simulateur analogique.

Les simulateurs analogiques présentent encore des avantages indéniables pour certains domaines d'utilisation par rapport aux simulateurs numériques temps-réel, les inconvénients suivants font que ces derniers tendent à les remplacer :

- La limitation dans la taille des réseaux représentés, causée par l'encombrement et la complexité des micro-réseaux réalisés ;
- Le manque de souplesse quant aux changements de topologie, bien que des systèmes de connexion automatique aient été conçus ;
- Les coûts élevés d'exploitation et de maintenance, à cause de l'utilisation d'équipements faits sur-mesure, de la connectique, du vieillissement et de la détérioration du matériel ;
- La nécessité d'utiliser du matériel spécifique (réalisation des systèmes à taille réduite).

### **3.2.2. Les simulateurs numériques**

L'essor des calculateurs et l'augmentation de leurs puissances de calcul ont abouti à la conception fait que les simulateurs temps-réel numériques, il y a déjà une vingtaine d'années. En effet, la taille et la complexité des systèmes simulés en temps-réel ainsi que les fréquences des phénomènes étudiés dépendent directement de la puissance des calculateurs utilisés [39].

La simulation numérique présente des avantages déterminants tels que :

- Une bonne représentation des éléments et phénomènes électriques par l'utilisation de modèles pouvant être adaptés facilement aux études réalisées ;
- Une préparation plus rapide et plus aisée aux tests, car les caractéristiques des composants ainsi que les paramètres de simulation peuvent être modifiés par simple programmation ;
- La reproductibilité des essais grâce à l'invariance des caractéristiques électriques des composants simulés ;
- L'évolutivité des simulations et la possibilité de création de plans d'évènements

### **3.2.3. Les simulateurs hybrides**

Les simulateurs temps-réel hybrides rassemblent les avantages des simulateurs temps-réel analogiques et numériques. Ils sont constitués d'une partie simulée numériquement connectée à une partie analogique de puissance via un amplificateur. L'avantage de ce type de simulateurs est que la partie analogique peut permettre de simuler un équipement difficilement modélisable numériquement par sa complexité ou par rapport aux

---

phénomènes fréquentiels mis en jeux [30].

Il est aussi possible de simuler un système industriel en puissance. Cela présente un intérêt particulier si l'on ne connaît pas le système et que l'on souhaite identifier les paramètres de ce système dont le but est de le modéliser par la suite.

Dans le cadre de cette étude les simulateurs numériques utilisés sont à base de microcontrôleurs.

### **3.3. Conception des émulateurs de laboratoire**

Afin de valider et d'enrichir expérimentalement les résultats obtenus par la simulation, la conception et la réalisation des émulateurs de redresseur monophasé, redresseur PD3 et onduleur à deux niveaux destinés pour le transport de l'énergie électrique a été mise en place.

Le fonctionnement de ces trois émulateurs est basé sur une conception hybride Analogique/numérique afin de garantir une efficacité optimale de commande avec le microcontrôleur implanté PIC18F4550 fabriqué par Microchip.

#### **3.3.1. Description du PIC18F4550**

Le PIC 18F4550 fait partie de la gamme qui porte le nom high-end ou haute-performance de Microchip, caractérisé par leur richesse en ressources matérielles internes et de ces capacités très importantes, de leurs mémoires vives et de leurs mémoires de programme. Cette gamme est évidemment celle qui est adaptée à la programmation en langages haut niveau.

#### **3.3.2. Caractéristiques principales du PIC18F4550**

Nous citons ci-dessous les caractéristiques principales du PIC18F4550 (Annexe A) :

- Mémoire programme flash : 32K octet
- Mémoire vive RAM : 2048 octet
- Mémoire morte EEPROM : 256 octet
- Ports E/S: 35 Ports A, B, C, D, E
- Vingt sources d'interruptions avec deux vecteurs.
- Un temporisateur 8bits (Timer0) et trois temporisateurs 16bits (Timer1 a Timer3)
- Un module capture/Compare/PWM (ou MLI) : CCP
- Un module Capture/compare/PWM amélioré : ECCP
- Un module de communication série USART amélioré.
- Les modules de communication série MSSP : SPI et I<sup>2</sup>C maître et esclave.
- Module convertisseur analogique numérique (A/D) Treize canaux 10 bits avec temps d'acquisition programmable.

- Double comparateurs analogiques avec entrée multiplexée
- Un module de communication USB.

### 3.3.3. Description et Fonctionnement des émulateurs de laboratoire

Le fonctionnement de l'émulateur est basé sur un processus de commande hybride (analogique/numérique), afin de garantir une commande optimale en temps réel des interrupteurs du convertisseur AC/DC, d'où la variation précise de l'angle d'amorçage du redresseur réalisé est la fonction principale, dont le but est d'étudier son impact sur la qualité de l'énergie transmise. Aussi l'émulateur possède une fonction de mesure des grandeurs, communication et régulation de puissance.

Le passage par zéro de l'alternance positive des tensions est la référence de base du calcul de l'angle d'amorçage par le PIC18F4550, et qui doit être détecté en temps réel, cette dernière ainsi que le filtrage d'entrée des formes d'ondes des tensions réseau sont assurés indépendamment du PIC18F4550 par des modules analogiques.

Concernant Le convertisseur DC/AC à commande MLI Sinusoïdale est réalisé en utilisant des modules analogiques, le microcontrôleur assure uniquement le monitoring.

## 3.4. Emulateur de laboratoire « Redresseur »

### 3.4.1. Description de l'émulateur de laboratoire « redresseur »

Le schéma synoptique simplifié du redresseur est déterminé dans la figure 45.

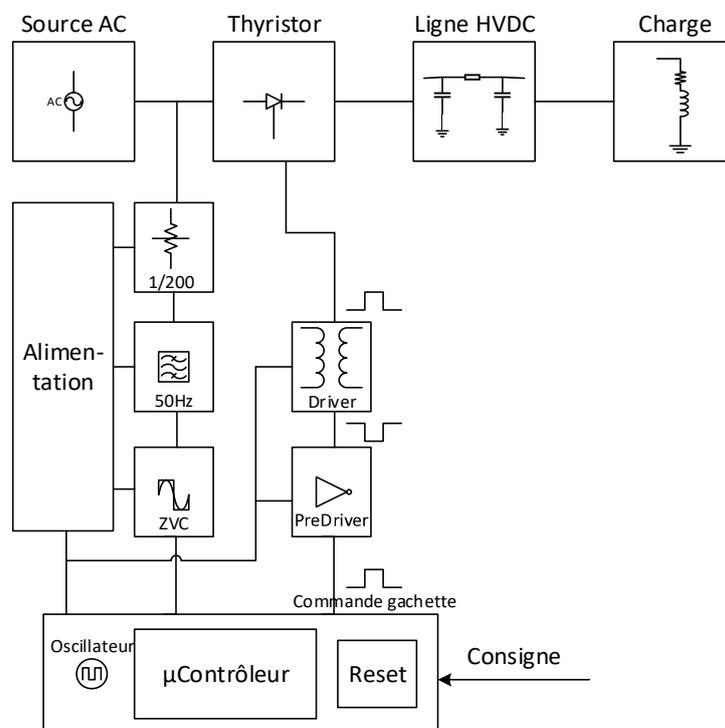


Figure 45-Le schéma synoptique du Redresseur

La carte de commande supervise le passage par zéro des tensions d'entrée et commande les gâchettes des thyristors en séquences en temps réel par l'utilisation des sources d'interruption du PIC. La figure 45 présente l'organigramme du programme implanté sur le  $\mu$ contrôleur, le programme principal calcule en base de temps la valeur correspondante à la consigne de l'angle d'amorçage et la valeur initiale à charger dans le temporisateur.

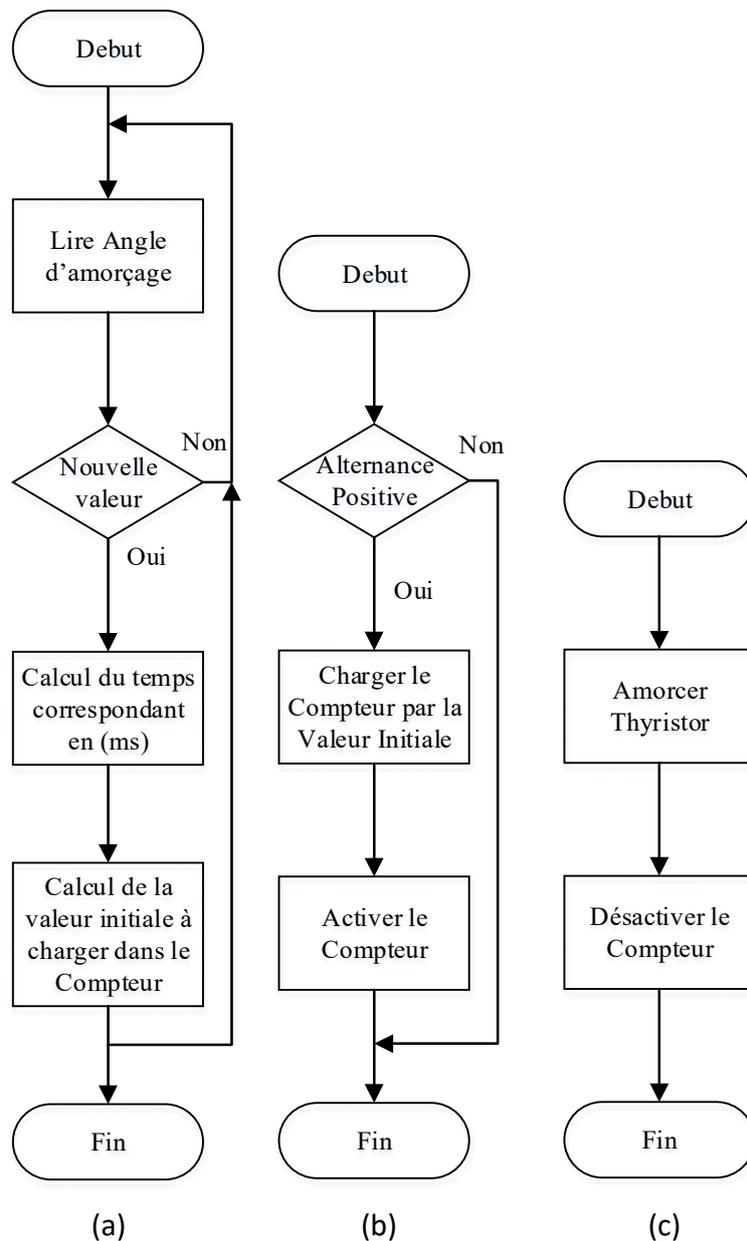


Figure 46-Organigrammes (a) programme principal (b) routine interruption de ZVC (c) routine interruption de débordement de compteur

Les deux redresseurs réalisés monophasé et triphasé sont représentés respectivement sur les figures 47 et 53, ils sont constitués de deux modules (Annexe B) :

- *Module de contrôle*

Le module de contrôle surveille le signal de puissance, calcule la temporisation selon la valeur consigne de l'angle d'amorçage et commande les gâchettes du thyristor, il est composé par les circuits suivants :

- µcontrôleur PIC18F4550 et ses circuits annexes : Reset et Oscillateur de type quartz de fréquence de 20MHz.
- Filtre passe-bande centré à 50Hz : fonctionne pour éliminer les harmoniques du réseau à l'entrée de la commande pour avoir uniquement la fondamentale, la particularité de l'introduction d'un filtre passe-bande et de garder le même angle de phase.
- Détecteur de passage par zéro : un comparateur à temps de réponse ultra-rapide (12ns) est utilisé pour obtenir avec précision l'instant du passage par zéro de la tension de chaque phase, ce moment représente la référence (le début) du retard de déclenchement ( $\alpha$ ). (Cet instant représente l'origine du calcul de l'angle de déclenchement ( $\alpha$ ))
- Pré-Driver : l'interface entre le PIC et les Drivers des gâchettes, utilisé pour fournir la puissance nécessaire à la commande des Drivers.
- Driver : consiste en transformateur de puissance lequel commande directement la gâchette du thyristor, et aussi il sert à l'isolation galvanique entre le module de commande et la puissance.
- Transformateur de tension : diviseur de tension avec un rapport de 1/200 pour avoir l'image en basse tension du réseau (AC et DC).
- Transformateur de courant : capteur à effet hall (un transducteur) pour obtenir l'image de courant DC.
- Interface Homme Machine : une liaison PC pour faire varier l'angle d'amorçage, pour le cas du redresseur triphasé l'interface est équipée en option avec un clavier et afficheur LCD.

▪ *Module de puissance*

Le module de puissance est constitué principalement du composant de commutation : un thyristor pour le redresseur monophasé et six thyristor pour le triphasé, dont les paramètres sont cités dans le Tableau 7

Tableau 7- Caractéristique du Thyristor

Mark	SEMIKRON
Type	SKKT91/12 <sup>E</sup>
VRRM/VDRM	1200V
ITRMS	150A
IH	250mA
VGT	3V
IGT	150mA

**3.4.2. Réalisation redresseur monophasé**



Figure 47- Modules de commande et de puissance du redresseur monophasé réalisé

3.4.3. Résultats Expérimentaux du redresseur monophasé

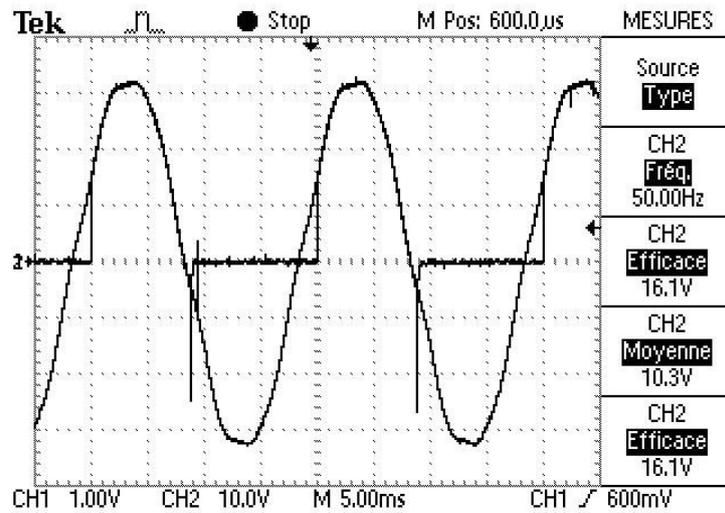


Figure 48-Tension redressée pour un angle d'amorçage  $\alpha = 30^\circ$  (Charge RL)

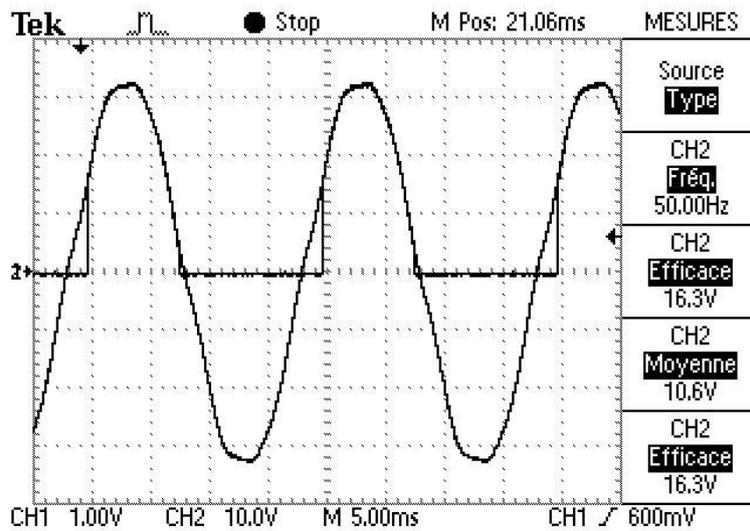


Figure 49-Tension redressée pour un angle d'amorçage  $\alpha = 30^\circ$  (Charge R)

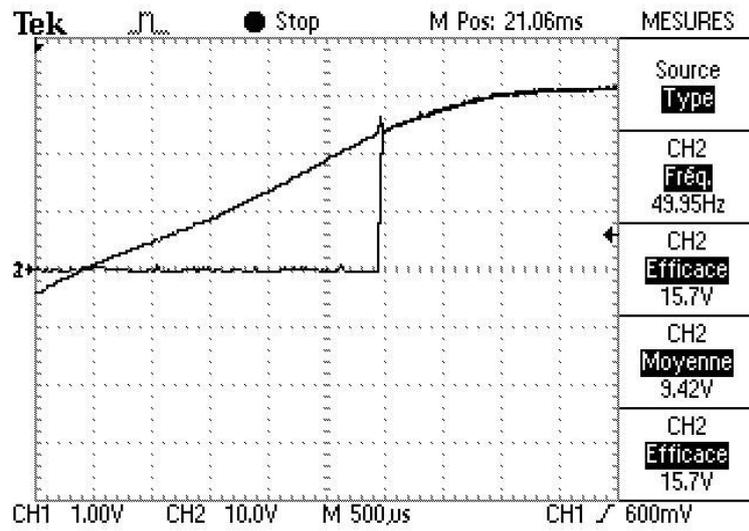


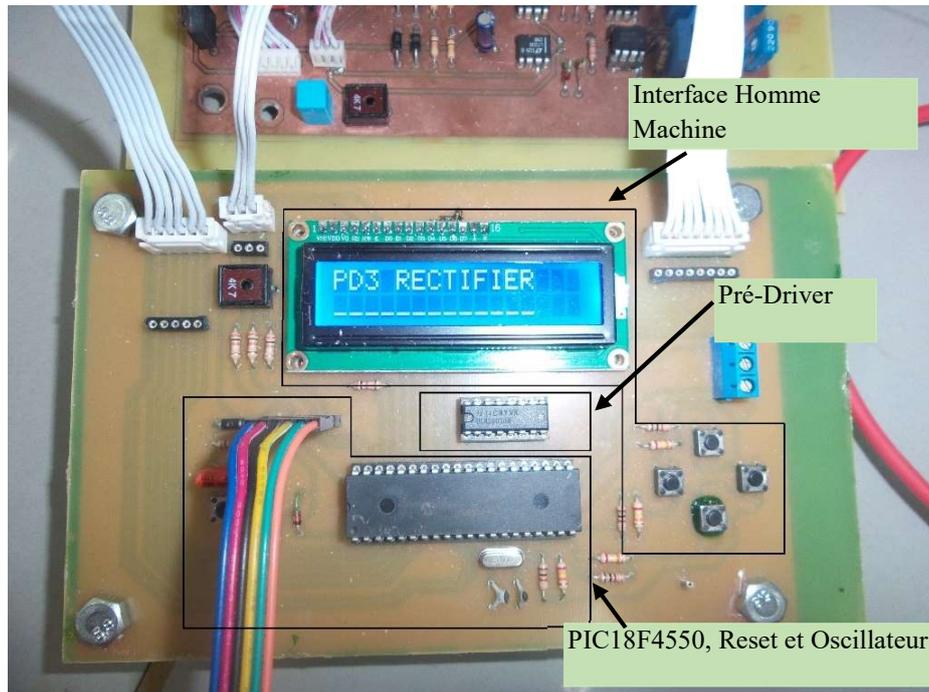
Figure 50-Tension redressée au moment de la fermeture du thyristor



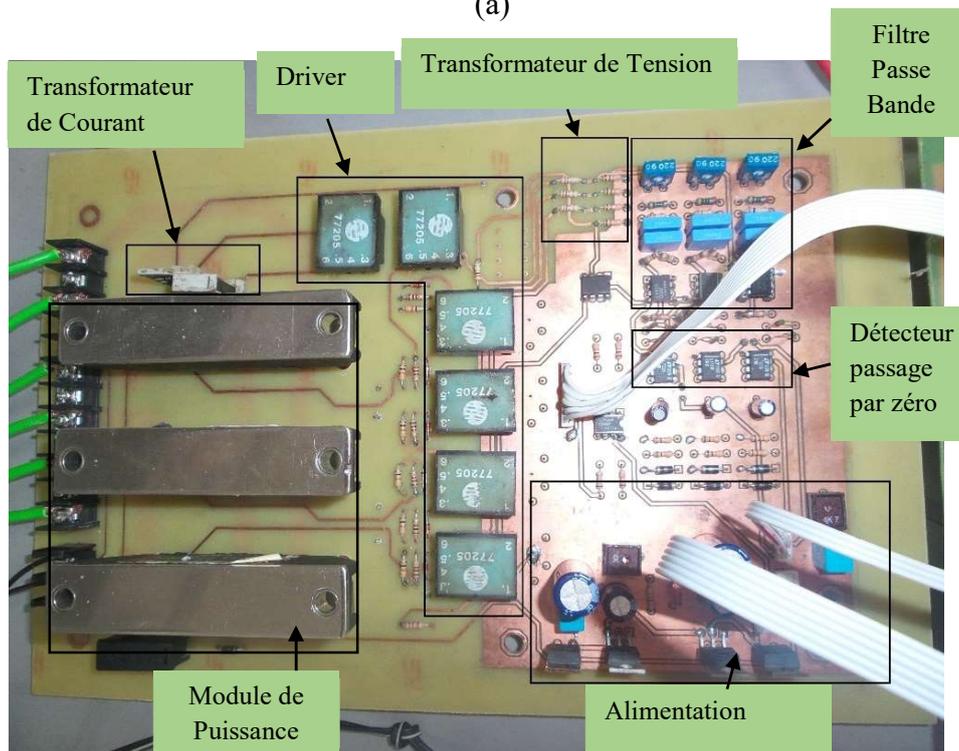
Figure 51-Tension redressée au moment de l'ouverture du thyristor

### 3.4.4. Réalisation redresseur triphasé

Le redresseur triphasé réalisé est présenté sur la figure 52



(a)



(b)

Figure 52-carte Redresseur triphasé : (a) module de commande (b) module de puissance

3.4.5. Résultats expérimentaux du redresseur triphasé PD3

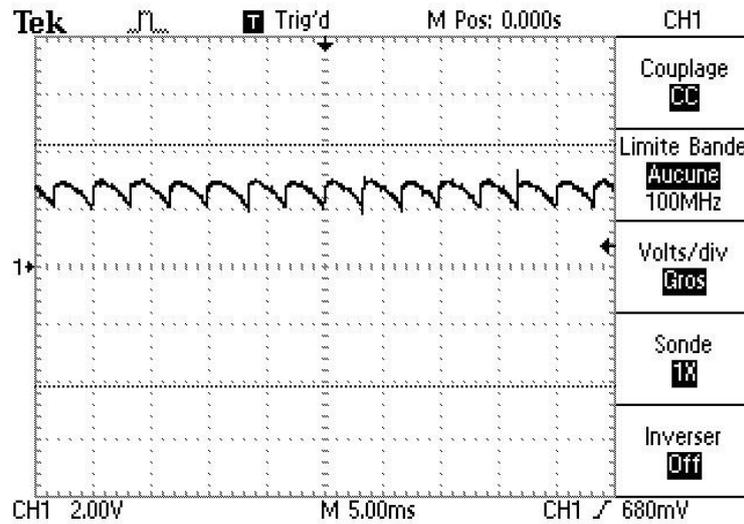


Figure 53-Tension redressée pour un angle d'amorçage  $\alpha = 30^\circ$  (Charge RL)

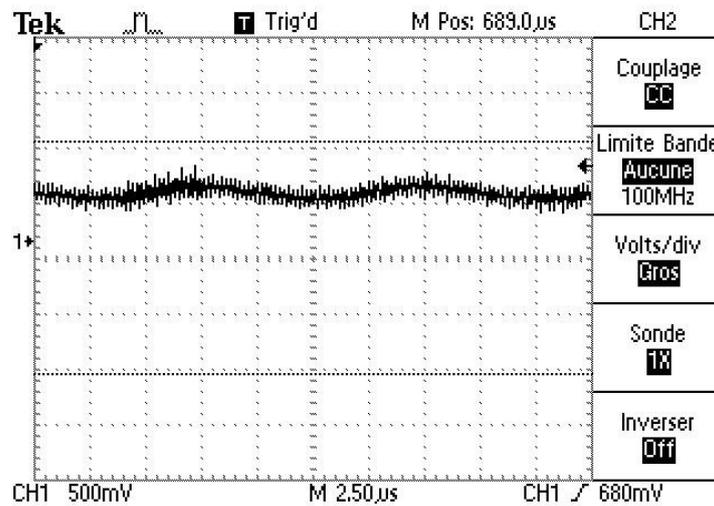


Figure 54-Courant redressé pour un angle d'amorçage  $\alpha = 45^\circ$  (Charge RL)

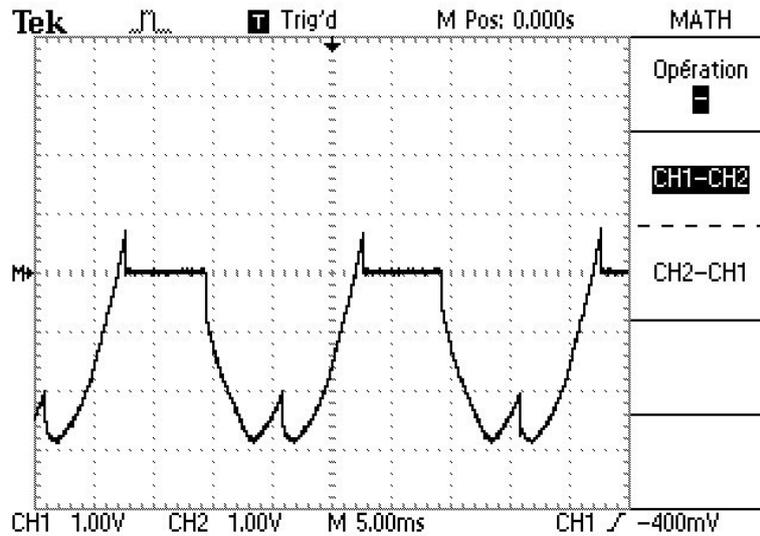


Figure 55-Tension de Commutation aux bornes des thyristors

#### 3.4.6. Analyse des résultats expérimentaux de l'émulateur redresseur

Dans la partie expérimentale, l'essai fonctionnel en monophasé a été établi pour tester le circuit d'amorçage des montages redresseurs en utilisant le redresseur monophasé.

Durant la réalisation expérimentale, nous avons pu constater une grande stabilité lors de la commutation des thyristors de la phase ON vers OFF et OFF vers ON ainsi que la rapidité de réaction qui nous offre la possibilité d'augmenter la fréquence de travail.

Le passage de la simulation vers l'expérimentation pour les redresseurs triphasés, nous a permis de confirmer les résultats théoriques obtenus ainsi que de visualiser les phénomènes qui n'ont pas été démontré dans la simulation.

### 3.5. L'émulateur de laboratoire « onduleur »

#### 3.5.1. Description de l'émulateur de laboratoire « Onduleur »

L'objectif est le même pour la conversion DC/AC. L'émulateur réalisé est un onduleur triphasé à deux niveaux autopiloté par le réseau électrique utilisé pour obtenir des résultats expérimentaux, la commutation est assurée par IGBT, avec une commande MLI sinusoïdale.

Un microcontrôleur est implanté pour la supervision et la communication.

Le schéma synoptique de la carte onduleur est montré sur la figure 56

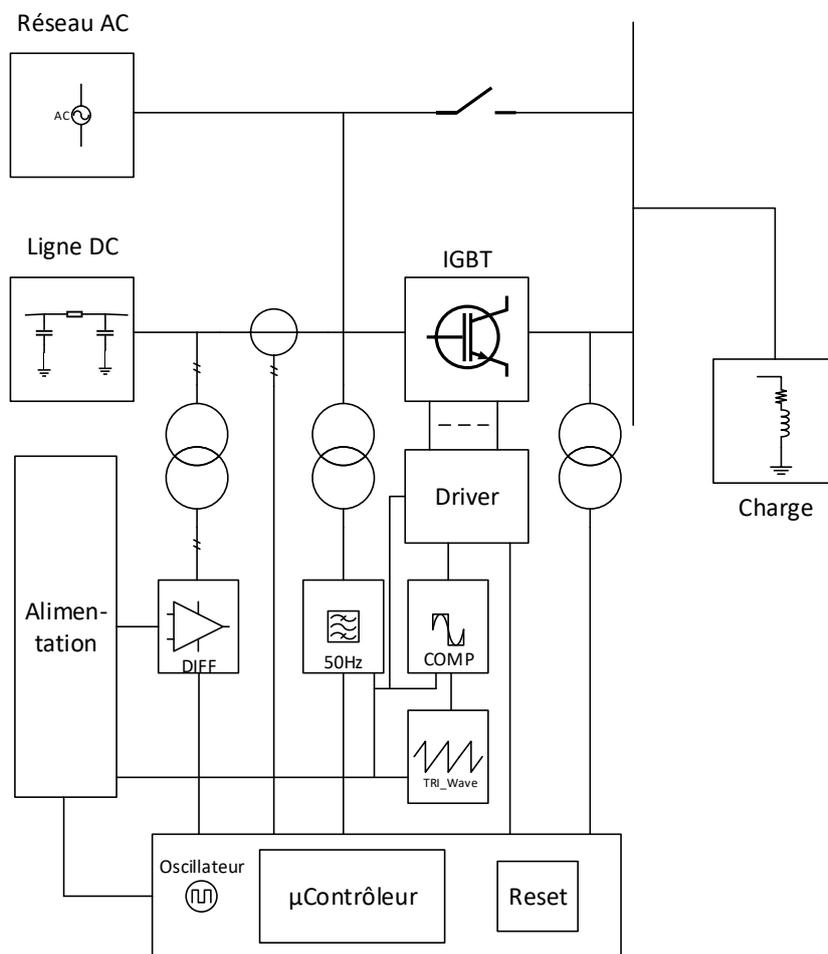
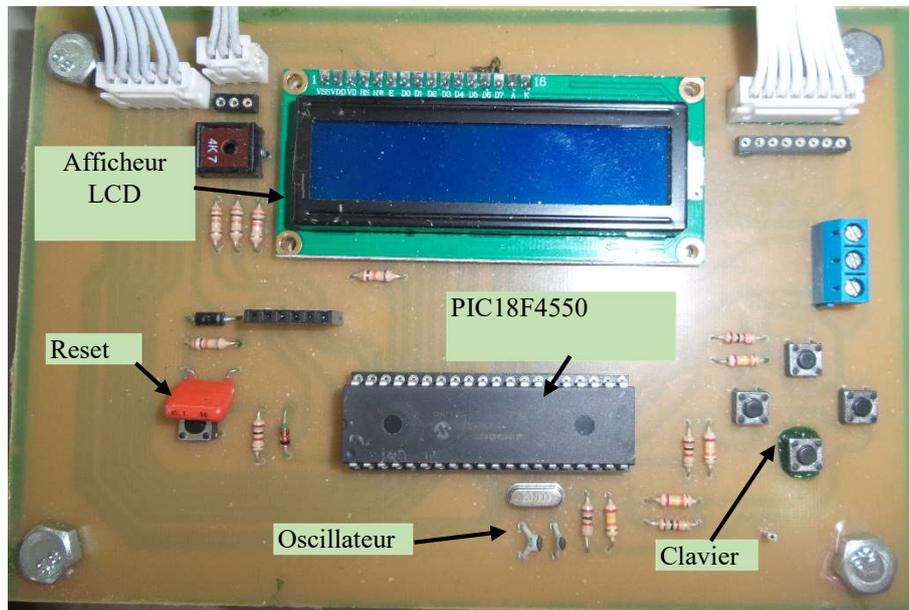


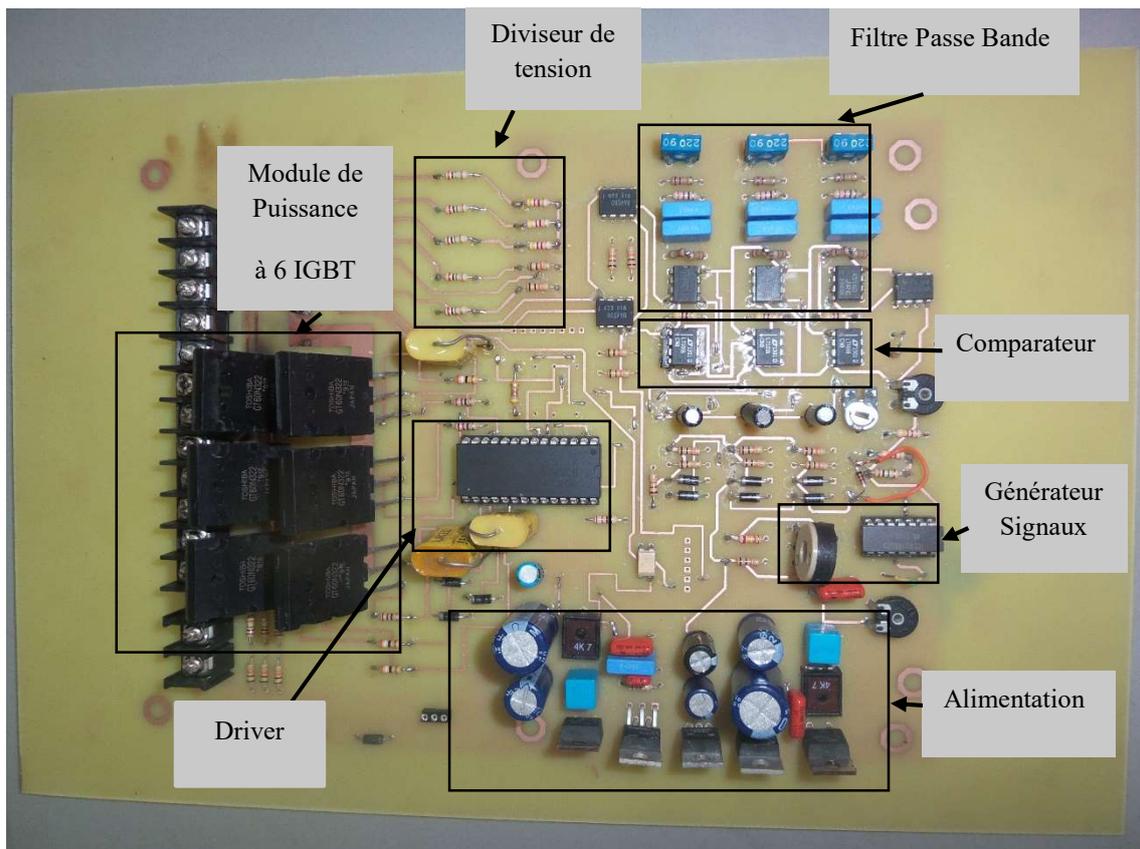
Figure 56-Schéma Synoptique de la carte onduleur

### 3.5.2. Réalisation de l'onduleur

L'onduleur réalisé est présenté sur la figure 57



(a)



(b)

Figure 57-carte onduleur (a) module microcontrôleur (b) module onduleur

Il est constitué de :

- *Module de monitoring et de Communication* : ce module mesure les tensions et le courant présents sur l'onduleur, afin de les communiquer au redresseur pour réguler la puissance et les afficher sur l'afficheur LCD, il se compose des circuits suivants (Annexe C) :
  - Microcontrôleur PIC18F4550 et ses circuits annexes : Reset et Oscillateur.
  - Interface Homme Machine : se définit par un clavier et un afficheur LCD.
- *Module Onduleur* : consiste principalement des circuits de la commande MLI, circuit de mesure, circuit driver et les IGBT
  - Circuit de la commande MLI constitué de :
    - Filtre actif passe-bande centré à 50Hz : destiné pour éliminer les harmoniques du réseau à l'entrée de la commande pour avoir un signal de référence composé uniquement de la fondamentale. Le filtre implanté a la particularité d'introduire un déphasage de  $180^\circ$  ( $\pi$ ) qui sera récupéré au niveau de l'étage de comparateur MLI.
    - Comparateur MLI : Un comparateur à temps de réponse ultra-rapide (12ns) est utilisé pour obtenir avec précision les instants d'ouverture et de fermeture des IGBT.
    - Générateur des signaux triangulaires : est un circuit intégré usuel (ICL8038) implanté pour fournir la porteuse de la commande MLI, la fréquence de la porteuse est variable et ajustable manuellement.
  - Circuit de mesure : constitué de diviseurs de tension : de rapport de 1/200 pour avoir les images des tensions à l'entrée de l'onduleur (différentielle), de référence (réseau) et à la sortie de l'onduleur ; et diviseur de courant : est un capteur à effet hall (un transducteur) pour obtenir l'image du courant à l'entrée de l'onduleur (DC).
  - Driver : le driver utilisé est un driver triphasé, le IR2235.
  - IGBT : les IGBT implantés sont identiques (TOSHIBA 60N322) dont les principales caractéristiques (à 25 °C) sont représentées dans le Tableau 8.

Tableau 8- Caractéristique de L'IGBT

Symbol	Rating	unit
Tf	0.11	μs
VCES	1000	V
VCE(sat)	2.4	V
VGES	±25	V
IC	60	A
Pc	200	W

### 3.5.3. Résultats expérimentaux obtenus de l'onduleur

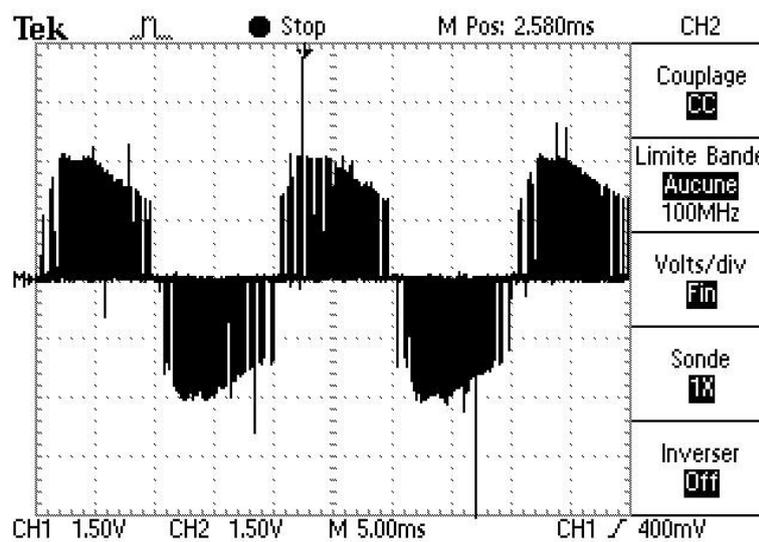


Figure 58- Tension composée à la sortie de l'onduleur

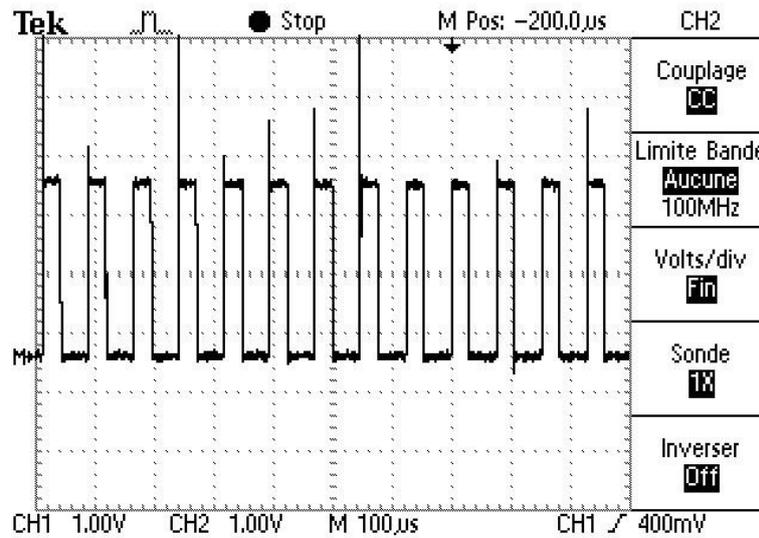


Figure 59-Tension simple à la sortie de l'onduleur

### 3.5.4. Analyse des résultats expérimentaux de l'émulateur onduleur

Le passage de la simulation vers l'expérimentation nous a permis en premier lieu de confirmer les résultats théoriques obtenus dans le chapitre précédent ainsi de visualiser les formes d'ondes à la sortie de l'onduleur (tension composée et simple) pour l'émulateur de laboratoire « onduleur ».

### 3.6. Conclusion

Pour valider les modèles étudiés dans le chapitre précédent, les émulateurs de laboratoire réalisés dans cette partie expérimentale nous a permis d'obtenir des courbes réelles. Les ondes expérimentales sont en concordance avec les ondes obtenues pendant la simulation de chapitre précédent. La réalisation du circuit de commande nous a fourni de plusieurs avantages ; d'un point il n'est pas coûteux, et d'un autre sa conception est de faible volume en consommant une faible énergie et cela tout en utilisant des composants simples, D'autre part, il possède une grande flexibilité ainsi que des performances très acceptables.

Donc, l'émulateur de laboratoire proposé nous a permis de commander en temps réel, on a la possibilité de s'adapter à des différents types et modes de fonctionnement avec un temps de réponse très confortable et une possibilité de communication entre le redresseur et l'onduleur comme le cas pour le transport de l'énergie électrique à grande distance HVDC.

## CHAPITRE IV. Effet de phénomène de bifurcation sur la qualité de l'énergie électrique transportée

### 4.1. Introduction

L'évolution des technologies de l'électronique de puissance a donné naissance aux systèmes de transmission HVDC permettant de faire face aux différentes difficultés de l'HVAC. Ces systèmes permettent d'interconnecter facilement des réseaux où la tension et la fréquence ne sont pas compatibles, de transmettre l'énergie sur de longues distances, que ce soit en aérien ou souterrain [44].

Pour un certain nombre de raisons techniques, économiques et environnementales, le transport de l'énergie électrique à courant continu possède des propriétés qui le rend beaucoup plus pratique et plus efficace en comparant au transport de l'énergie électrique à courant alternatif, principalement dans le domaine de la transmission de puissance sur des longues distances, par exemple [44] :

- Câble sous-marin, où la capacité élevée cause des pertes additionnelles à CA ;
- L'installation des capacités dans les situations où les fils sont additionnels est coûteuse ;
- Permettre le transport d'énergie entre les systèmes de distribution à CA non synchronisé (différentes fréquences) ;
- Utilisation de la totalité de la section, l'effet pelliculaire (Kyung Suk, 2000) (effet de peau) n'existant pas en courant continu ; d'où la possibilité d'utiliser une intensité plus élevée pour une même section utilisée en courant alternatif ;
- Meilleure utilisation de l'isolation, le gradient de potentiel pouvant être plus élevé en courant continu qu'en courant alternatif. D'autre part, l'isolation est prévue pour la tension nominale et non pour la tension crête ; d'où la possibilité de choisir une tension plus élevée pour une même ligne. L'intensité et la tension étant plus élevées, la puissance transportée par la même ligne (en CA) sera plus importante en courant continu ;
- La conduite de la puissance du régime continue peut se faire indépendamment de la puissance installée dans deux réseaux non liés ;
- Possibilité de supporter la puissance rapidement en cas de perturbations ;
- Optimisation de conducteurs : Deux conducteurs pour le système bipolaire et un conducteur pour le système mono-polaire (Corsi, Danelli et Pozzi, 2002) ;

- La liaison CCHT (HVDC) dans une interconnexion constitue une barrière contre la propagation du défaut en cascade, à travers un réseau en courant alternatif (la puissance réactive n'est pas transmissible en CCHT).

La transmission de l'énergie électrique par courant continu a été le premier type de liaison utilisé lors des premiers temps de l'industrie électrique. La transmission en AC viendra plus tard et sera majoritairement utilisée principalement pour des raisons économiques ; le coût d'une ligne aérienne AC était inférieur à celle d'une ligne DC.

Actuellement, cet argument est dépassé ; des études récentes ont démontré que le coût d'une ligne souterraine DC est de 10 à 15 fois inférieur à celui d'une ligne AC aérienne traditionnelle.

Outre la raison économique citée plus haut, il existe d'autres avantages importants pour l'utilisation d'une transmission HVDC: interconnexion de deux systèmes non synchronisés et une meilleure contrôlabilité: l'écoulement de puissance peut être contrôlé d'une manière précise et rapide quelle que soit sa direction, non seulement pour transmettre de l'énergie, mais aussi pour le contrôle des deux systèmes ZC. Et en contrôlant le transfert de puissance, le lien continu peut aider l'opérateur à coordonner l'écoulement de puissance même dans les lignes AC adjacentes.

Le bénéfice majeur d'une transmission HVDC comparée à une transmission en AC, est la robustesse de l'interconnexion face à des conditions de fonctionnement difficiles du système AC, et sa capacité à isoler l'autre système des pires effets des perturbations transitoires apparues dans le premier.

## **4.2. Historique**

C'est en 1882, que le premier HVDC a été installé sur un tronçon de 57 km entre Miesbach et Munich avec une tension de 1.4kV. Puis, c'est entre 1890 et 1910, que l'utilisation de HVDC est devenue prospère et a été installée sur différentes installations de 70 à 200 km avec des tensions de 6 à 60kV et des puissances inférieures ou égales à 4.5MW. Son utilisation servait surtout pour l'alimentation des machines tournantes.

On assiste toujours à l'évolution du HVDC et entre 1935 et 1944, sont placées différentes installations D2D&LDT sur des tronçons de 30km à proximité de Hanover à Henningsdorf, Wettingen-Zurich et Berlin ; avec des tensions de 50 à 100kV avec des puissances de l'ordre de 1.5 – 40MW.

Le premier câble HVDC commercial a été installée en 1945 sur une distance de 115km, power station Elbe/Elektrowerke AG-Bewag/Berlin, avec des tensions  $\pm 200\text{kV}$  et des puissances avoisinantes les 60MW. Après la fin de la deuxième guerre mondiale, la technologie a été transférée en URSS. C'est en 1951, qu'été conçu la première installation prototype entre kashira et Moscou avec une tension de 200kV et une puissance de 30MW.

C'est en 1970, que l'installation Pacific Intertie entre Columbia River et Los Angeles a été réalisée sur une distance de 1350km, une tension de  $\pm 400\text{kV}$  et une puissance de 1440MW. C'est des installations à thyristors : c'est la première ligne HVDC conçue pour être intégrée dans un réseau AC. Le problème majeur a été de trouver comment protéger les stations de conversion DC des surtensions. Une nouvelle génération de disjoncteurs adaptés aux applications DC a vu le jour grâce à une équipe de General Electric. L'autre nouveauté a été l'utilisation pour la première fois du contrôle digital par ordinateurs. La même année, des groupes convertisseurs à base de thyristors ont renforcé la liaison de suède-gotland de tension 150kV et de puissance de 30MW.

Vers la fin des années 70, a été réalisé des systèmes dos à dos pour les connexions entre le Texas et les états adjacents pour des puissances de 100 à 200MW. En 1977, le premier thyristor LDT dans le monde avec OHL a été utilisé des connexions entre le mozambique- la république sud afrique (songo- johannesburg) sur une distance 1500km avec des tensions de  $\pm 533\text{kV}$  et des puissances de 1920MW.

Dans les années 80, une nouvelle technologie a été réalisée, utilisant la transmission des systèmes à terminaux multiples, comme pour par exemple, le câble sous-marin reliant l'Italie à la sardaigne [47].

### **4.3. Les rôles de L'HVDC**

Le rôle de l'HVDC dans le 21ème siècle est le mieux décrit avec référence particulière, les rôles supplémentaires et nouveaux que cette technologie est supposée jouer par suite des forces motrices de marché susmentionnées. Fondamentalement, HVDC contribuera à améliorer l'économie d'exploitation de ressources d'énergie, en particulier pour sources renouvelables d'énergie ; elle aidera aussi à réduire l'impact de conversion d'énergie sur l'environnement et elle est supposée stimuler l'intégration d'économie à travers les frontières régionales et nationales [45].

#### 4.3.1. Le rôle traditionnel

Les additions de la capacité massive dans la génération prévue dans le 21<sup>ème</sup> siècle, vont sans aucun doute nécessiter la transmission d'énergie en vrac d'électricité à travers terre et/ou eaux. La libération du secteur de l'électricité qui caractérise l'ouverture de marchés de l'électricité et investissements privés contribuera à augmenter l'interconnexion des réseaux pour profiter pleinement des avantages économiques offerts par l'échange d'électricité. Dans ce contexte, le contrôle du courant d'énergie exposera les mérites d'un point de vue technique et économique à la fois.

Un exemple récent de ceci, est le 180 MVA "HVDC light interconnector de transmission qui a relié le Queensland aux marchés d'énergie du New South Wales en l'an 2000, permettant ainsi à deux états australiens d'intercommercialiser l'énergie électrique pour la première fois.

#### 4.3.2. Nouveaux rôles pour HVDC

La nouvelle technologie HVDC naissante permettra aux investisseurs et les opérateurs du système de subvenir aux exigences régulatrices, financières et des ingénieurs (technique, écologique et économique) requises de la façon la plus efficace jusqu'ici. Cela contribuera évidemment à agrandir plus le marché des solutions HVDC. Par conséquent, les rôles suivants peuvent être discernés pour la nouvelle technologie HVDC :

- L'intégration de générations de dimension petite à moyenne dans du plus grand système d'énergie ;
- Elle représente une alternative économique et écologique à des générations locales.

#### 4.3.3. Types des liaisons HVDC

Un système de transport à courant continu est conçu pour acheminer la puissance d'un réseau A vers un réseau B et vice versa en utilisant une liaison continue. Les convertisseurs constituent la partie principale d'un système HVDC. Ceux-ci assurent la conversion de la puissance AC en puissance DC au niveau du réseau émetteur et de la puissance DC en puissance AC au niveau du réseau récepteur. Les transmissions DC entre deux terminaux peuvent être bipolaires ou monopolaires ou bipolaire.

Une configuration monopolaire est montrée dans la figure 60. Elle utilise un seul conducteur et le chemin de retour est assuré par la terre ou l'eau. Les considérations économiques conduisent souvent à privilégier ces systèmes dans le cadre de transmission par câble. Cette configuration peut aussi être la première étape dans la conception d'un

système bipolaire. A la place d'un retour par la terre, un conducteur métallique à basse tension peut être utilisé lorsque la résistivité de la terre est très importante, ou encore, lorsque les interférences avec des structures métalliques sous-terraines/sous-marines sont préjudiciables [41].



Figure 60-Configuration monopolaire

La configuration bipolaire est généralement utilisée pour une transmission de puissance par voie aérienne. Dans ces systèmes, nous trouvons deux conducteurs, un par polarité (positive ou négative), et chaque terminal possède deux convertisseurs connectés en série du côté DC et fonctionnant à la même tension nominale. Les jonctions entre les convertisseurs sont réalisées par la terre. Normalement, les courants qui traversent les conducteurs sont égaux et il n'y a pas de courants qui s'écoulent dans la terre. Les deux pôles peuvent fonctionner indépendamment et par conséquent si un pôle est isolé à cause d'un défaut sur son conducteur, l'autre pôle peut transporter la moitié de la puissance nominale voire plus en considérant les possibilités de surcharge des convertisseurs et de la ligne. Du point de vue des performances, une configuration bipolaire est considérée comme étant l'équivalent d'une transmission AC utilisant deux lignes

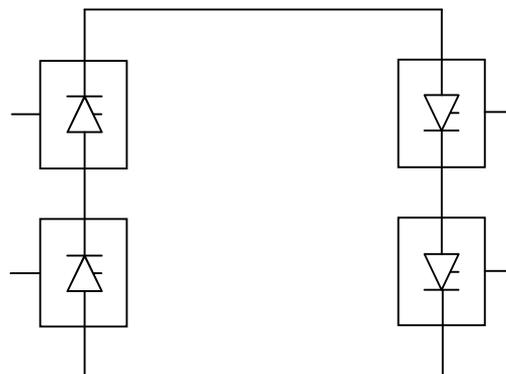


Figure 61-Configuration bipolaire

- Systèmes DC "back-to-back"

Dans un système de transmission de puissance "back-to-back", le redresseur (convertisseur AC - DC) et l'onduleur (convertisseur DC - AC) sont d'une part localisés dans une même station, c'est-à-dire un même bâtiment, et d'autre part reliés par l'intermédiaire d'une inductance en série pour les convertisseurs CSC ou d'un condensateur en parallèle pour les convertisseurs VSC. Cette catégorie de système est couramment utilisée pour interconnecter deux systèmes AC asynchrones qui peuvent soit opérer à des fréquences nominales différentes, soit le faire sans être synchronisés [48].

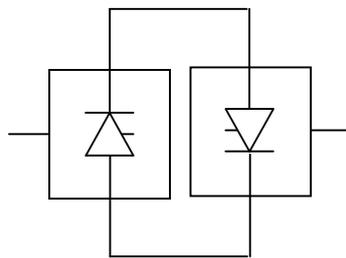


Figure 62-Système  
back to back

#### 4.4. La télécommunication entre les stations de conversion

La télécommunication et les systèmes de contrôle jouent un rôle important dans la performance des systèmes de transport HVDC. Dans le cas d'une liaison HVDC sous-marine, deux types des systèmes de communication sont utilisés. Le premier système utilisé est par fibre optique, qui est fiable et cohérent avec une commande HVDC optimale grâce à sa vitesse de transmission, mais cette technologie reste toujours coûteuse et non robuste vis-à-vis de l'environnement sous-marin. Le deuxième système est la communication courant porteur de ligne (CPL), une technologie économique, robuste sous l'environnement sous-marin, mais non fiable pour les grandes distances en tenant compte du retard important de la transmission de données causé par ce support et qui conduit à un impact négatif sur la performance du contrôle HVDC.

Les stations de conversion d'un système HVDC sont localisées à des grandes distances de l'ordre de quelques centaines de kilomètres et dans des cas dépassant les milles kilomètres. Comme toutes les stations de conversion sont impliquées dans les fonctions de contrôle du système HVDC, un système de télécommunication entre ces stations est requis.

Plusieurs types de télécommunication peuvent être utilisés pour le contrôle et l'exploitation du transport HVDC : téléphonie, courant porteur de ligne (CPL), liaison radio et la fibre optique [33].

Plus de 500km, une communication rapide entre deux stations de conversion est nécessaire pour renforcer les performances des système HVDC.

#### **4.5. Fonctionnement des liaisons HVDC**

Aujourd'hui, les technologies les plus utilisées pour le transport HVDC sont les convertisseurs LCC (Line Commutated Converters) à base de valves à thyristors et les convertisseurs VSC (Voltage Source Converter) à base de valves à Transistor Bipolaire à Grille Isolée ou IGBT. Les valves à vapeur de mercure ont été supplantées par les systèmes LCC au début des années 1970 [46-48-47].

##### **4.5.1. Fonctionnement des convertisseurs LCC**

Dans la technologie LCC, le courant de ligne circule dans un même sens quel que soit le flux de puissance (de par les caractéristiques des thyristors qui sont des interrupteurs unidirectionnels en courant). Des bobines de forte inductance, appelées "bobines de lissage", disposées de part et d'autre de la ligne de transmission, permettent d'éliminer les composantes harmoniques du courant générées par les commutations successives des thyristors. Dans cette technologie, le courant de ligne est déterminé par la chute de tension entre les deux stations et par la résistance de la ligne. [46-48-52]

##### **4.5.2. Fonctionnement des convertisseurs VSC**

Le fonctionnement d'un convertisseur VSC HVDC peut être expliqué en considérant chaque terminal en tant que source de tension connectée en série à un réseau AC par l'intermédiaire de réactances de phase.

Dans une connexion VSC-HVDC, la puissance active du côté AC est égale à la puissance active transmise du côté DC (pertes négligeables). En pratique, l'un des deux convertisseurs contrôle la transmission de puissance active tandis que l'autre commande la tension DC. La génération de la puissance réactive et la consommation peuvent être utilisées pour commander la tension alternative du réseau. L'inversion rapide du flux de puissance est un aspect important des systèmes HVDC. Le système LCC effectue cette inversion de puissance par inversion de la polarité de la ligne HVDC.

#### 4.6. Modélisation d'une ligne de transmission HT

Il est possible de modéliser une ligne d'un réseau électrique de transport selon un modèle en «  $\pi$  » qui est une approximation du modèle fréquentiel en régime permanent. Il s'agit d'une représentation à constantes réparties pour un tronçon de ligne de longueur élémentaire [33-41-47].

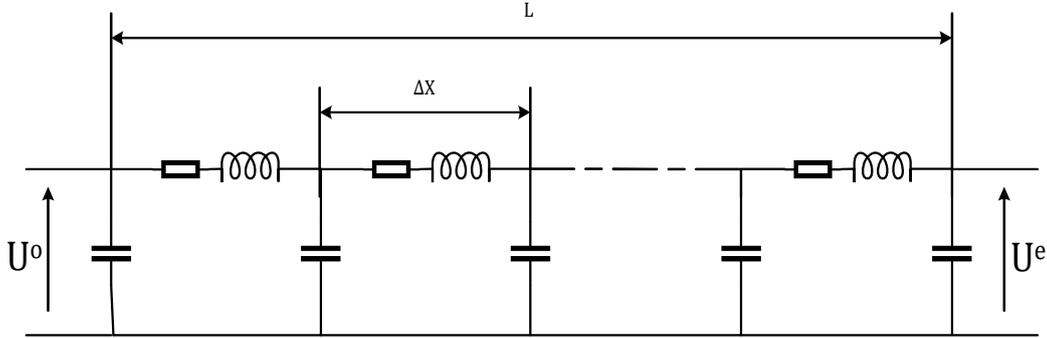


Figure 63-schéma équivalent d'une ligne de transmission HT

Les équations:

$$\begin{cases} U - (U + \Delta U) = IZ_0\Delta x \\ I - (I + \Delta I) = (U + \Delta U)\Delta x Y_0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} -\Delta U = IZ_0\Delta x \\ -\Delta I = UY_0\Delta x + \Delta UY_0\Delta x \end{cases}$$

$$, \Delta UY_0\Delta x \approx 0$$

$$\begin{cases} \frac{\Delta U}{\Delta x} = -IZ_0 \\ \frac{\Delta I}{\Delta x} = -UY_0 \end{cases}$$

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = -Z_0 \frac{dI}{dx} = Z_0 Y_0 U P^2 U - Z_0 Y_0 U = 0$$

On a:

$$P_{1,2} = \pm \sqrt{Z_0 Y_0} = \pm \gamma_0$$

$$U_x = A_1 e^{-\gamma_0 x} + A_2 e^{+\gamma_0 x}$$

$$I_x = -\frac{1}{Z_0} (-\gamma_0 A_1 e^{-\gamma_0 x} + \gamma_0 A_2 e^{+\gamma_0 x})$$

avec:

$$\gamma_0 = \sqrt{Z_0 Y_0}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}}$$

Détermination des constants :  $A_1$  et  $A_2$ :

On suppose que  $U_1$  et  $I_1$  sont donnés comme suit:

$$x = 0; U_x = U_1, I_x = I_1$$

Alors:

$$U_1 = A_1 + A_2$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_c} (A_1 - A_2)$$

$$A_1 = (U_1 + I_1 Z_c) / 2$$

$$A_2 = (U_1 - I_1 Z_c) / 2$$

On remplace par  $A_1$  et  $A_2$ , on a:

$$\begin{aligned} U_x &= ((U_1 + I_1 Z_c) / 2) e^{-\gamma_0 x} + ((U_1 - I_1 Z_c) / 2) e^{+\gamma_0 x} \\ &= U_1 \cosh(\gamma_0 x) - I_1 Z_c \sinh(\gamma_0 x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_x &= (1/Z_c) [((U_1 + I_1 Z_c) / 2) e^{-\gamma_0 x} - ((U_1 - I_1 Z_c) / 2) e^{+\gamma_0 x}] \\ &= -(U_1 / Z_c) \sinh(\gamma_0 x) + I_1 \cosh(\gamma_0 x) \end{aligned}$$

Finalement on obtient:

$$\begin{aligned} U_x &= U_1 \cosh(\gamma_0 x) - \sqrt{3} Z_c I_1 \sinh(\gamma_0 x) \\ I_x &= -(U_1 / \sqrt{3} Z_c) \sinh(\gamma_0 x) + I_1 \cosh(\gamma_0 x) \end{aligned}$$

#### 4.7. Comparaison entre le transport HVDC et HVAC

Une comparaison technico-économique entre les solutions de transport en CC ou/et CA est rendue difficile par la complexité et le grand nombre de facteurs intervenants ainsi que par les paramètres qui influencent les coûts (la puissance transportée et la distance, les pertes de puissance et d'énergie, la sécurité du fonctionnement, le niveau de tension, la structure du conducteur de phase, l'espace affecté aux installations, les perturbations radio et TV, d'autres effets électriques, etc.). Les nouveaux progrès technologiques obtenus dans le domaine de l'électronique de puissance, de transmission des signaux par fibres optiques, le développement des microprocesseurs, etc., ont eu un impact important ces dernières années sur le transport de l'énergie électrique, en influençant favorablement l'utilisation des installations en HVDC [33-47].

#### 4.7.1. Comparaison de transit de puissance dans les câbles AC et DC

Pour le transport à grande distance, soit par liaisons aériennes ou par câbles sous-marins, un indicateur d'efficacité ou « point d'équilibre », est établi : une distance limite au-delà de laquelle l'utilisation du courant continu est plus avantageuse du point de vue économique. Il y a 15 ans, ces distances économiques pour les liaisons en HVDC étaient de 800-900 km (aériennes) et de 60 km (câbles), actuellement elles ont baissé à environ 750 km et 40 km.[46]

Les pertes de puissance dans chaque cas sont :

$$\Delta P_{CA} = 3i_{CA}^2 R ; \Delta P_{CC} = 2i_{DC}^2 R$$

#### 4.7.2. Comparaison des capacités de transport des lignes en CA et en CC

Pour une même tension nominale les lignes en CC conduisent à des investissements plus faibles, et à des constructions plus légères qu'en CA. Mais le coût des stations de conversion terminales étant élevé, les coûts totaux deviennent comparables pour la distance d'équilibre (650...800 km). Les liaisons en CC seront plus efficaces lorsque la distance de transport point à point augmente et auront de plus, pour un même couloir occupé, une capacité de transport plus grande [48].

#### 4.7.3. Comparaison de la section utile dans les conducteurs AC et DC

Ce phénomène appelé « effet de peau » d'origine électromagnétique existe pour les conducteurs parcourus par un courant alternatif plus la fréquence du courant est élevée, moins le courant pénètre au cœur du conducteur. La section utile de conduction étant réduite, il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur [40].

L'épaisseur de peau  $\delta$  est la largeur caractéristique de la zone où se concentre le courant, on a :

$$\delta = \sqrt{2/\omega \cdot \mu \cdot \sigma} = \sqrt{2 \cdot \rho / \omega \cdot \mu} = 1/\sqrt{\sigma \cdot \mu \cdot \pi \cdot f}$$

$\delta$ : l'épaisseur de peau [m].

$\omega$ : la pulsation du courant [rad/s].

$f$ : fréquence [Hz].

$\mu$ : perméabilité magnétique [H/m].

$\rho$ : résistivité [ $\Omega$ /m].

$\sigma$ : conductivité électrique [S/m].

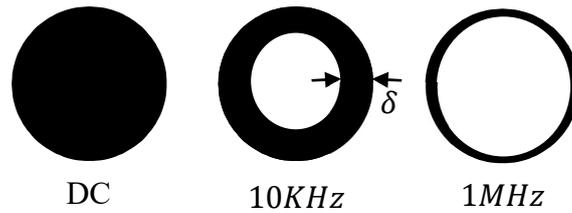


Figure 64-comparaison de la section AC et DC

## 4.8. Mode de transmission HVDC

### 4.8.1. Transmission HVDC par câbles sous-marins

En AC, dès que la distance dépasse une certaine limite, le câble ne peut plus transporter la quantité de puissance active désirée, il faudrait alors introduire des inductances shunt tous les 15-20km. En DC, la distance ne pose pas de problèmes techniques. En outre, le coût des câbles DC est inférieur à celui des câbles AC. En général, la distance entre les deux systèmes varie entre 10 et 800km. On peut donc résumer les avantages de la transmission par câbles sous-marins dans les points suivants [40]:

- Pas de puissance réactive sur la ligne.
- L'écoulement de l'énergie est totalement contrôlable.
- Pas de contribution à la puissance de court-circuit des réseaux AC existants.

### 4.8.2. Transmission HVDC par câbles aériens

Dans ce genre de transmission, il faudrait une assez grande distance (environs 1000km) pour pouvoir amortir l'investissement des équipements. Dans ce cas, l'avènement des FACTS a favorisé les transmissions en AC dans le sens où ces dispositifs peuvent se substituer à la construction de nouvelles lignes, et contribuent à l'amélioration du transit de puissance [40].

### 4.8.3. Transmission HVDC par câbles souterrains

L'avantage majeur est environnemental. Les câbles sont invisibles et ne dégagent pas de champ magnétique. En outre, le contrôle rapide de la tension par HVDC permet de faire fonctionner le système aux limites du maximum de la tension AC permise, d'où une réduction de pertes dans les lignes [47].

## 4.9. Modélisation d'une ligne de transport HVDC

### 4.9.1. Modèle étudié

Le Modèle étudié est présenté sur la figure 65:

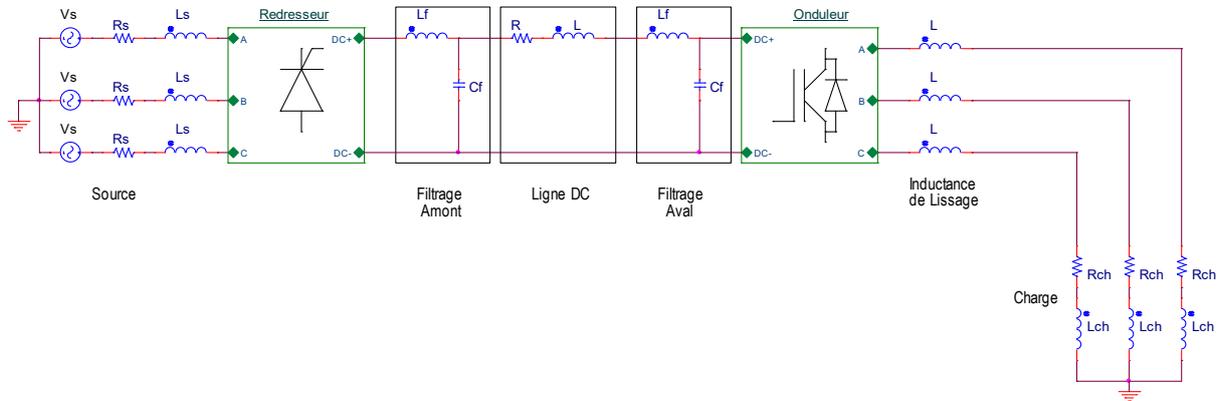


Figure 65-Système de transport HVDC

### 4.9.2. Les résultats obtenus

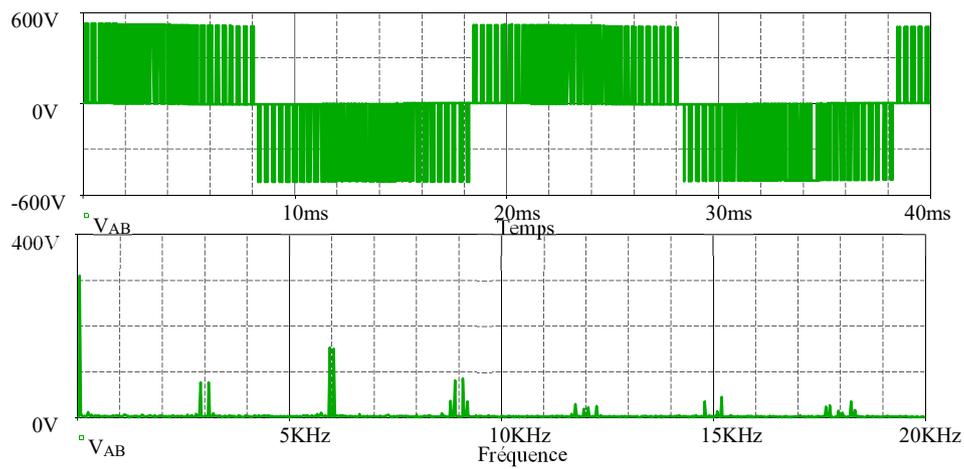


Figure 66-Tension composée à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde  
(b) spectre fréquentiel

$$\text{THD}(\text{extrémité}) = 36.84\%$$

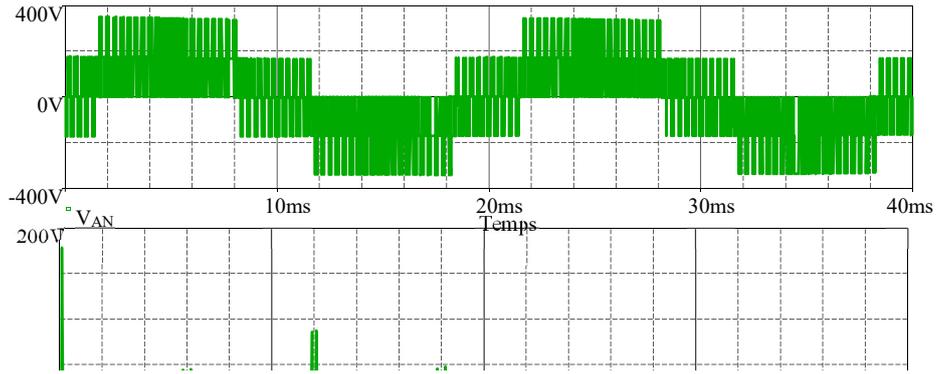


Figure 67-Tension simple à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

$$\text{THD}(\text{extrémité}) = 38.88 \%$$

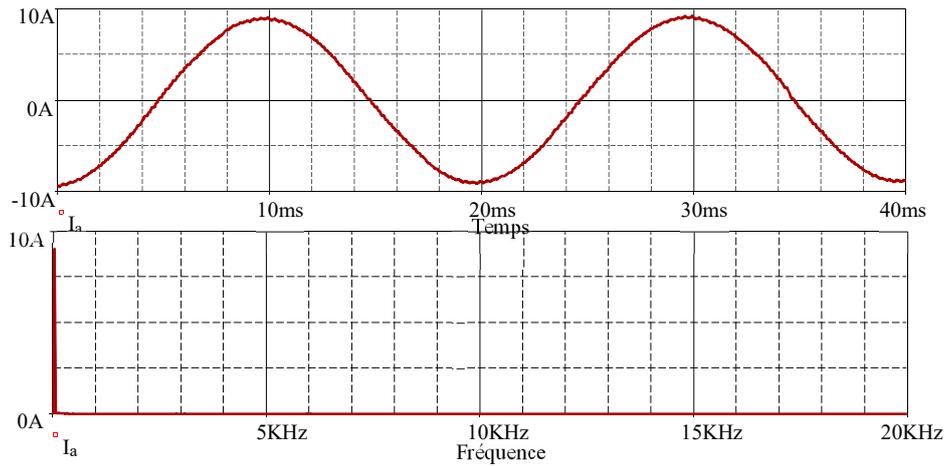


Figure 68-Courant de phase à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

$$\text{THD}(\text{extrémité}) = 1.36 \%$$

## 4.10. Effet du phénomène de bifurcation sur la qualité de l'énergie électrique transportée

### 4.10.1. Transport hybride HVAC/HVDC

Le principe de fonctionnement est basé sur la modulation de la puissance transmise via le lien HVDC en fonction de la déviation de fréquence de la zone perturbée et en fonction de la puissance transmise sur la ligne AC.

La puissance qui s'écoule dans une liaison hybride HVAC/HVDC est contrôlable contrairement à un système de transmission HVAC, ce facteur a un impact positif sur la qualité de l'énergie transmise, car avec les convertisseurs statiques, la puissance est contrôlée et la ligne peut être utilisée jusqu'à la limite de sa capacité [47-52].

Model étudié :

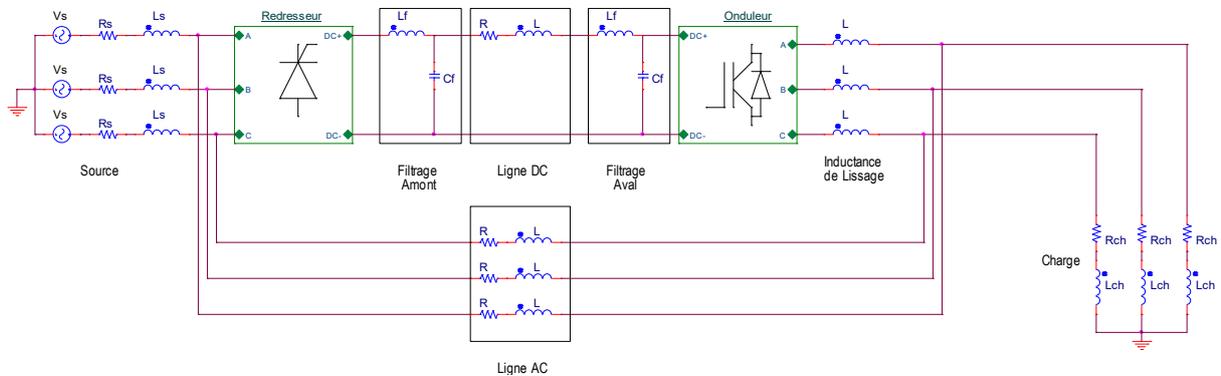


Figure 69-système de transport HVAC/HVDC

4.10.2. Les résultats obtenus

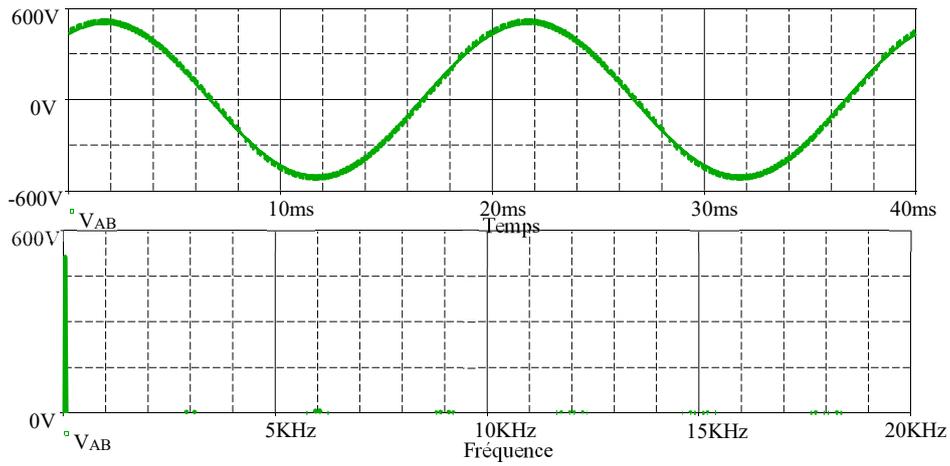


Figure 70-Tension composée à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

$$\text{THD}(\text{extrémité}) = 02,27\%$$

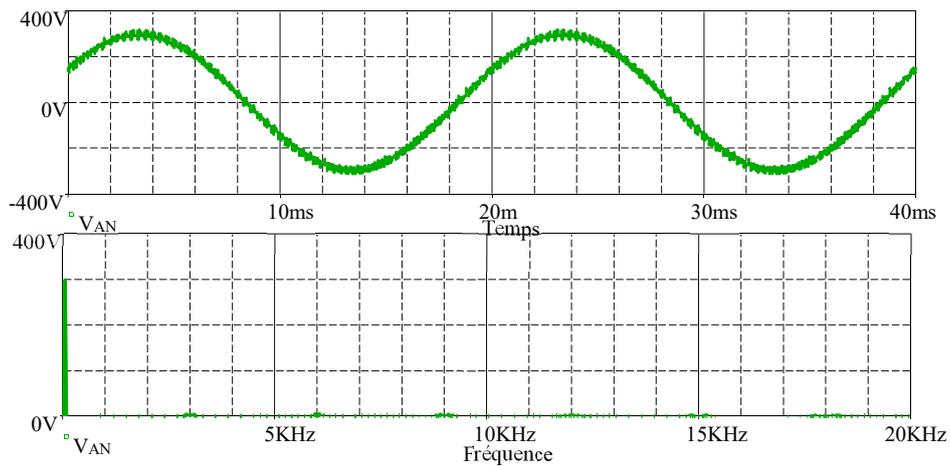


Figure 71-Tension simple à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde (b) spectre fréquentiel

$$\text{THD}(\text{extrémité}) = 02,74\%$$

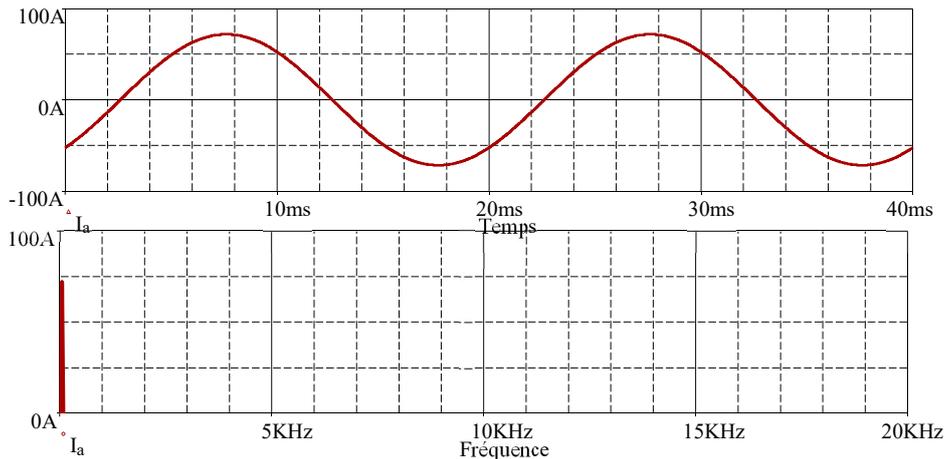


Figure 72-Courant de phase à la sortie de l'onduleur (a) forme d'onde  
(b) spectre fréquentiel

$$\text{THD}(\text{extrémité}) = 0,31\%$$

#### 4.10.3. Analyse des résultats

Dans ce chapitre notre premier objectif est de modéliser une ligne HVDC, les formes d'ondes et les spectres fréquentiels des tensions et le courant de phase à la sortie de l'onduleur ont été présentés dans les figures 66, 67 et 68.

Notre second objectif est de modéliser une ligne HVDC avec une ligne HVAC afin de pouvoir analyser les phénomènes de bifurcation liés à l'association HVAC / HVDC, les formes d'ondes et les spectres fréquentiels des tensions et le courant de phase à la sortie de l'onduleur ont été présentés dans les figures 70, 71 et 72.

L'association en bifurcation des deux types de transport courant continu et alternatif, a permis d'augmenter la distance tolérable de transport de l'énergie offerte par la ligne HVDC et d'améliorer la qualité de l'énergie convertie par la ligne HVDC et cela grâce à l'association du transport HVAC.

#### 4.11. Conclusion

Les convertisseurs de l'électronique de puissance constituent l'une des principales sources d'harmoniques dans le transport HVDC.

Le transport HVAC/HVDC nous a permis de maintenir la stabilité du système.

L'effet du phénomène de bifurcation du transport HVAC/HVDC sur la qualité de l'énergie électrique est bien visualisé en comparant les spectres d'harmoniques.

Une ligne HVDC peut aider la ligne parallèle de transmission AC à amortir les oscillations de la puissance transmise entre deux systèmes AC afin de maintenir la stabilité.

## **Conclusion Générale et Perspectives**

La qualité de l'énergie électrique est devenue un pôle attracteur de chercheurs, expérimentateurs, vu le grand rôle qu'elle joue sur tous les plans.

Le développement des semi-conducteurs et la demande croissante de convertisseurs en électronique de puissance dans les différents domaines de l'énergie électrique notamment pour des applications dans les réseaux électriques de transport à courant continu, imposent de nouvelles plateformes de commande à base de microcontrôleur.

La modélisation et la simulation des différents types de redresseurs et des onduleurs sont présentés et discutés dans ce travail.

Les modèles théoriques du redresseur triphasé PD3 et de l'onduleur triphasé à deux niveaux sont également validés expérimentalement moyennant des prototypes réalisés dans un environnement similaire à celui de la simulation. Les résultats sont également analysés et comparés avec les résultats de la simulation, où l'efficacité des émulateurs de laboratoires est approuvée.

Dans ce projet, la conception et la réalisation des prototypes de laboratoire d'un redresseur triphasé PD3 et de l'onduleur triphasé à deux niveaux basé sur un microcontrôleur PIC18F4550 destiné pour le transport de l'énergie électrique HVDC est effectuée.

L'effet du phénomène de bifurcation du transport HVAC/HVDC sur la qualité de l'énergie électrique est bien visualisé en comparant les spectres d'harmoniques. Le transport HVAC/HVDC nous a permis de maintenir la stabilité du système qui dépend du niveau de contrôle.

En fin nous pouvons conclure que ce travail nous a permis de mieux enrichir notre connaissance vis-à-vis le transport de l'énergie électrique aussi bien pour l'HVDC que l'HVAC/HVDC tout en ajoutant que leur association paraît plus bénéfique sur le plan capacité de transport.

En perspectives nous comptons, réaliser des tests expérimentaux sur le système hybride HVAC/HVDC en utilisant les émulateurs de laboratoire. Il est recommandé aussi d'étudier et réaliser le redresseur dodécaphasé comme convertisseur AC/DC.

Les émulateurs réalisés sont dotés d'une interface de communication et des routines de régulation de puissance pour l'étendre dans le future vers l'étude du phénomène de bifurcation.

## Bibliographie

- [1] B. Gattal, K. Chikhi, C. Fetha, “Amélioration de la qualité de l’énergie électrique, identification des creux de tension”, *Revue des énergies renouvelables*, Vol. 17, n 4, 2014, PP. 651-661
- [2] Belhaouchet Nouri, “Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées”, thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2011
- [3] Kessal Abdelhalim, “Correction du facteur de puissance à l’entrée d’un convertisseur AC/DC”, thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif, Algérie, 2012
- [4] Vanya Ignatova, “Méthode d’analyse de la qualité de l’énergie électrique, Application aux creux de tension et à la pollution harmonique”, thèse de doctorat, université Joseph Fourier Grenoble, France, 2006
- [5] Thierry Deflandre, Philippe Mauras, “Les harmoniques sur les réseaux électriques”, Paris - Eyrolles, France, 1998
- [6] Su Chen, Géza Joos, “Analysis and comparison of passive and active harmonic suppression filters in distribution systems”, *International Conference on Electrical and Computer Engineering*, Vol. 2, 7- 10 March 2000, Canada, PP. 615-619
- [7] M. J. Bridgeman, Norman MacLeod, S.B. Tennakoon, R.E. Morrison, “the resonance damping effect associated with linear shunt loads and single-phase converters”, 9<sup>th</sup> *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Vol. 2, Proceedings, 1- 4 October 2000, PP. 535-540
- [8] Evan J. Currence, John E. Plizga, Howard, N. Nelson, “Harmonic resonance at medium-sized industrial plant”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, NO. 4, 1995, 682- 690
- [9] Fang Z. Peng, Gui-Jia Su, George Farquharson, “A series LC filter for harmonic compensation of ac drives”, *IEEE international Conference on Power Electronics Specialists*, Vol. 1, 1999, PP. 213-218
- [10] R. Li, T. Johns, M. M. Elkateb, F. V. P. Robinson, “Comparative study of parallel hybrid filters in resonance damping”, *international Conference on Electric Power Engineering*, Budapest, 1999
- [11] Haddad Salim, “Gestion de la qualité d’énergie électrique dans un réseau de transmission”, these de doctorat, université Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2010
- [12] S. Akkari, M. Petit, X. Guillaud et J. Dai, “Modélisation, Simulation et Commande des systèmes VSC-HVDC multi-terminaux”, *Symposium de Génie Electrique 2014*, Cachan, Juillet 2014
- [13] K. Meah, S. Ula, “Comparative Evaluation of HVDC and HVAC Transmission Systems”, *IEEE, Power Engineering Society General Meeting*, 2007
- [14] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics Handbook 3<sup>rd</sup> Edition*, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2011
- [15] Ali M. Eltamaly, *Fundamental of Power Electronic*, 2010
- [16] Casoria, S. (Hydro-Quebec). *HVDC Transmission system (Thyristor-based). imPowerSystems 4.0 Release Notes*. Mathworks

- [17] M. Rajasekaran, M. Venkata Kirthiga, “Investigations on Modern Self-defined Extinction Advance Angle Controller for CCC Based HVDC Systems”, Springer, Mobile Communication and Power Engineering 2012, pp. 317–323, 2013.
  - [18] Muhammad H. Rashid, Power Electronics Circuits, Devices, and Applications, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993
  - [19] R. Kumar, T. Leibfried, “Analytical Modelling of HVDC Transmission System Converter Using Matlab/Simulink”, IEEE Systems, Technical Conference on Industrial and Commercial Power pp. 140-146, 2005
  - [20] A. Hernadi, Taufik and M. Anwari “Modelling and simulation of 6-pulse and 12-pulse rectifiers under balanced and unbalanced conditions with impacts to input current harmonics”, IEEE, Second Asia International Conference on Modelling & Simulation (AMS), pp.1034-1038, June 2008
  - [21] Umar Farooq “Microcontroller Based Low Cost Controlled Rectifiers Training Module for Power Electronics Laboratory”, IEEE International Conference on Signal Acquisition and Processing, Bangalore, India, February 2010, PP. 220-223
  - [22] Kevin Cano-Pulido “Simulation and Real-Time Emulation of a three-level and a Seven-level Active Rectifiers”, IEEE, International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2014, PP. 1-6
  - [23] Srinidhi Bheesette “A Microcontroller based Control and Monitoring System on an SPI interface for a DC-HVDC Power Supply Module”, IEEE Students’ Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECs), 2014, PP. 1-6
  - [24] M. B. Ortiz-Moctezuma “A nonlinear control microcontroller implementation for a MPPT algorithm for a small photovoltaic facility”, IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2012, PP. 99-102
  - [25] Shamsul Aizam Zulkifli “Investigation on various Voltage Controllers for 3 phase rectifier using Arduino as a Low Cost Microcontroller”, Trans Tech Publications, Switzerland, Applied Mechanics and Materials, Vol. 793, 2015, PP. 257-261
  - [26] Muhammad H. Rashid, Hasan M. Rashid, Spice for Power Electronics and Electric Power 2<sup>nd</sup> Edition, CRC Taylor & Francis, 2006
  - [27] Hakim Tahir, “Conception et réalisation de structures IGBTs bidirectionnelles en courant et en tension”, thèse de doctorat, Université de Toulouse, France, 2011
  - [28] Kevin Cano-Pulido, Ismael Araujo-Vargas, Andrew Forsyth, Sergio Salas-Duarte “Simulation and Real-Time Emulation of a Three-level and a Seven-level Active Rectifiers”, IEEE, Power, electronics and Computing (ROPEC), 2014 IEEE International Autumn Meeting on, Ixtapa, Mexico, 5-7 November 2014
  - [29] Pat Wheeler, Alan Watson, Jon Clare, Emmanuel Amankwah, Ralph Feldman, “Power Electronic Converters for HVDC Renewable Energy Applications”, IEEE International Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Santiago, Chile, 28-30 October 2015
  - [30] Christophe Gombert, “Simulation temps-réel des dispositifs d’Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d’Energie Electrique”, thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 2005
  - [31] Keyue Ma Smedley, “control Art of Switching converters”, thèse de doctorat, California Institute of Technology, Pasadena, california, USA, 1991
-

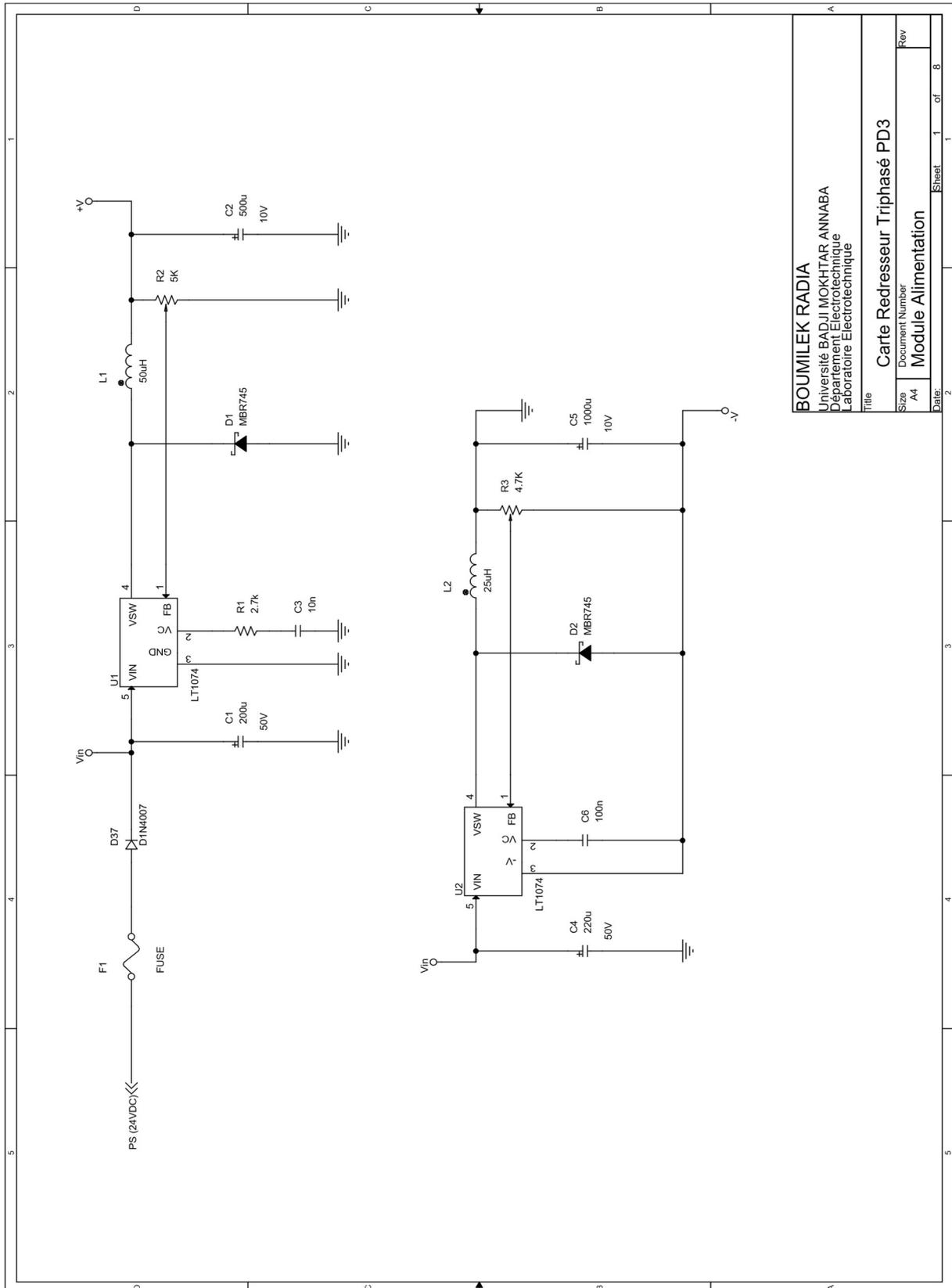
- [32] A. MAHESH KUMAR, Dr. B. ANANTHA REDDY, B. RAMU, M. D. Sukhila, "Design of fast switching IGBT gate driver for high rated modules", American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics, 2013, PP. 144-148
- [33] Fabrice D'eustachio, "Les enjeux des systèmes HVDC dans les réseaux de transport d'électricité", thèse UE, Conservatoire national des arts et métiers, Grenoble, France, 2013
- [34] Sraddhanjoli Bhadra, HIRAK Patangia, "Implementation of Real-Time Selective Harmonic Elimination Using Microcontrollers", IEEE 5<sup>th</sup> International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Galway, Ireland, 24-27 June 2014
- [35] Sraddhanjoli Bhadra, HIRAK Patangia "A Microcontroller based SHE Inverter for Maximum Power Point Operation", IEEE PEDS, Sydney, Australia 9-12 June 2015, PP. 427-431
- [36] FZ. Zerhouni, M. Zegrar "Réalisation d'une commande d'un onduleur triphasé à cinq niveaux avec vérification expérimentale", Journal of Science Research, Vol 1, N4, 2012, PP. 30-35
- [37] M. Kohlmann, M. Kleine Jäger, V. Staudt, A. Steimel and M. Gorski "Test-Bench layout emulating a MMC-Based HVDC Transmission System", IEEE MedPower 2014, Athens, Greece, 2-5 November 2014
- [38] Predrag Pejovic "Two Three-Phase High Power Factor Rectifiers that Apply the Third Harmonic Current Injection and Passive Resistance Emulation", IEEE transactions on power electronics, Vol 15, N6, November 2000, PP. 1228-1240
- [39] David brillon, "Etude par simulation des systèmes de transport d'énergie en courant continu à haute tension", thèse de doctorat, Université de Québec, Canada, 1994
- [40] Thi Thu Nga VU, "Etude des phénomènes de charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en Haute Tension continue (HVDC)", thèse de doctorat, Université de Toulouse III, France, 2014
- [41] M. Samy Akkari, "Control of a multi-terminal HVDC (MTDC) system and study of its interactions with the AC grids", thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, France, 2016
- [42] Sahar Pirooz Azad, Reza Iravani, Joseph Euzébe Tate "Dynamic Stability Enhancement of a DC-Segmented AC Power System Via HVDC Operating-Point Adjustment", IEEE Transactions on power delivery, Vol. 30, NO.2, April 2015, PP. 657-665
- [43] Yuhang Liu, Yue Chen, Shaowei Huang, Zhou Lan "Assessment of Electricity Reception Proportion in UHV AC/DC Hybrid System", IEEE International Conference on Power System Technology, Wollongong, NSW, Australia, 28 sept-1 Oct 2016
- [44] Seghir Benhalima, "La conception, la modélisation et la simulation du système VSC-HVDC Offshore", Mémoire de Maîtrise, Université du Québec, Canada, 2012

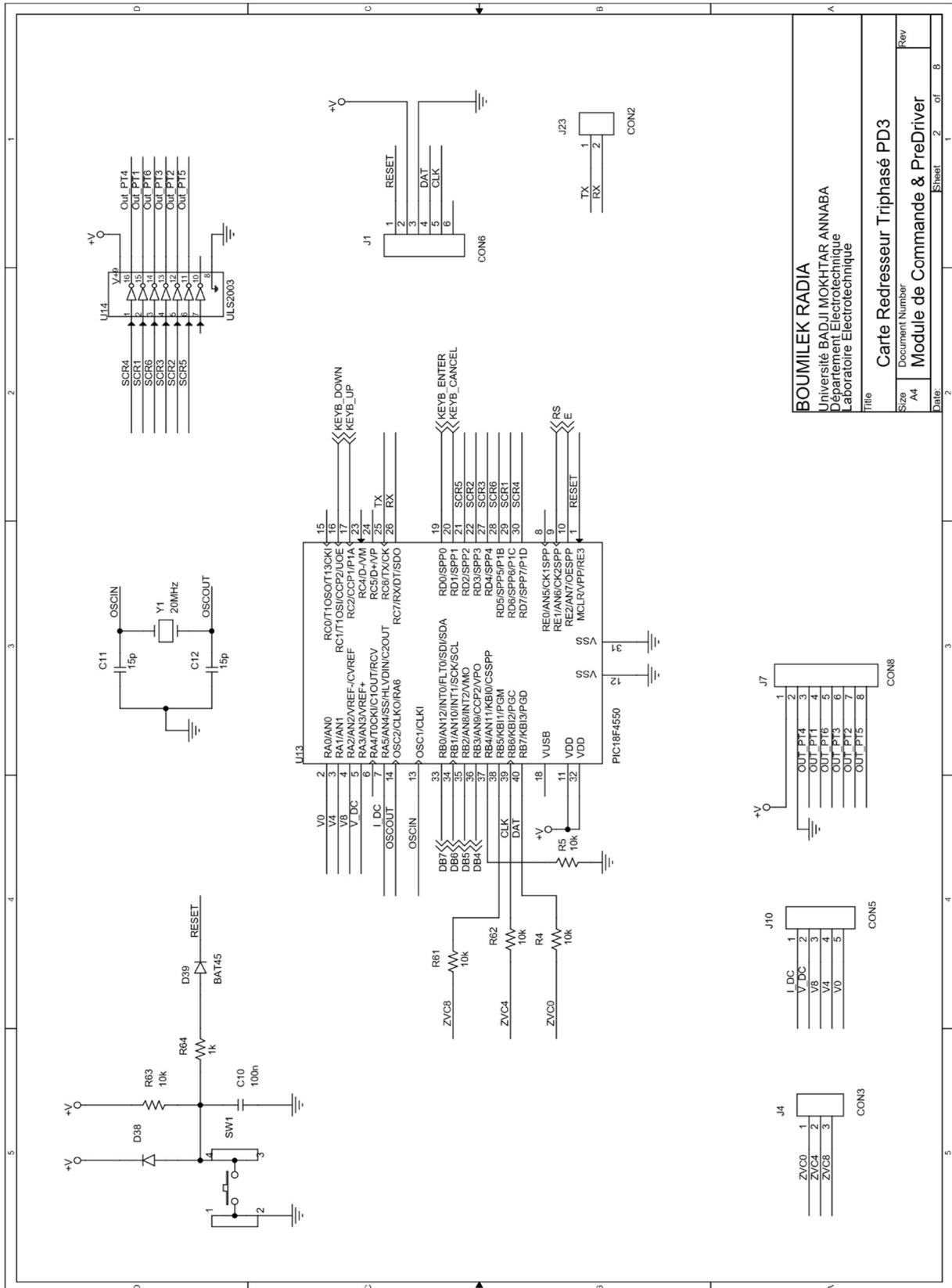
- [45] Leyla Arioua, Bogdan Marinescu, Eric Monmasson “Commande Des Liaisons HVDC Dans Un Contexte Réseau”, Conférence Internationale Francophone d’Automatique, Grenoble, France, 4-6 Juillet 2012, PP. 299-304
- [46] Laurent Teppoz, “Commande d’un système de conversion de type VSC-HVDC. Stabilité – Contrôle des perturbations”, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 2005
- [47] Mme Ghomri Leila, “Contrôle des dispositifs FACTS appliqués au réseau ouest-Algérien”, thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohammed Boudiaf, Algérie, 2009
- [48] Marc Petit, Seddik Bacha, Xavier Guillaud, Hervé Morel, Dominique Planson, Bertrand Raison “Les réseaux HVDC multi-terminaux : des défis multiples en génie électrique”, Symposium de génie électrique (SGE’14), ENS Cachan, France, 8-10 Juillet 2014
- [49] Ziyuan xu, Ruihua Li, Bo Hu, Hao Hu, Jianfei Zhao, “Direct Power Control Based on Renewable Energy Access for VSC-HVDC System”, IEEE 8<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control conference, (IPEMC-ECCE Asia), 2016
- [50] André Bodin, “HVDC Light® - A Preferable Power Transmission System for Renewable Energies”, IEEE 3<sup>rd</sup> International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, Portugal, 7-9 July 2011
- [51] Minxiao Han, Phuchuy Nguyen, Wenli Yan “Inter-harmonics in multi-terminal VSC-based HVDC systems”, Springer, Journal of Modern Power System and Clean Energy, Vol.4, NO.2, 2016, PP. 282-291
- [52] Xui. Yang, Yi-Xiong Jin, Yu. Chen “Stability Analysis of AC/DC Power Transmission System Based on Bifurcation Theory”, IEEE Conference on Power and Energy Engineering, Chengdu, China, 28-31 March 2010
- [53] Pankaj Kumar, A.K. Dahiya “A comparison in THD values of Conventional 3-phase VSI with different conduction angles of Thyristors”, IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Electrical Energy Systems, Chennai, India, 17-19 March 2016
- [54] Pascal monjean, “Optimisation de l’architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu”, thèse de doctorat, Arts et Métiers Paris Tech, France, 2012
- [55] N. M. MacLeod, C. D. Barker, N. M. Kirby “Connection of Renewable Energy Sources through Grid constraint Points using HVDC Power Transmission Systems”, IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, LA, USA, 19-22 April 2010

## Annexe A Caractéristiques générales de PIC18F4550

La Caractéristique	Valeur
Fréquence Horloge Max	48MHz
Mémoire programme FLASH	32Ko
Mémoire données RAM	02Ko
Mémoire EEPROM	256 Octets
Sources d'Interruptions	20
Ports d'entrées/sorties	A(7), B(8), C(8), D(8), E(4)
Timers	4 (3x16bit + 1x8bit)
CAN 10bit	13
Instructions	75
Vitesse du CPU (MIPS)	12
Périphériques de communication	1-A/E/USART, 1-MSSP (SPI/I2C)
Capture/Compare/PWM	1 CCP, 1 ECCP
Comparateurs	2
USB (canaux, vitesse, respect)	1, Full Speed, USB 2.0
Plage de tension de fonctionnement	De 2V à 5.5V
Température (C°)	-40 à 85

## Annexe B Schéma détaillé du Redresseur

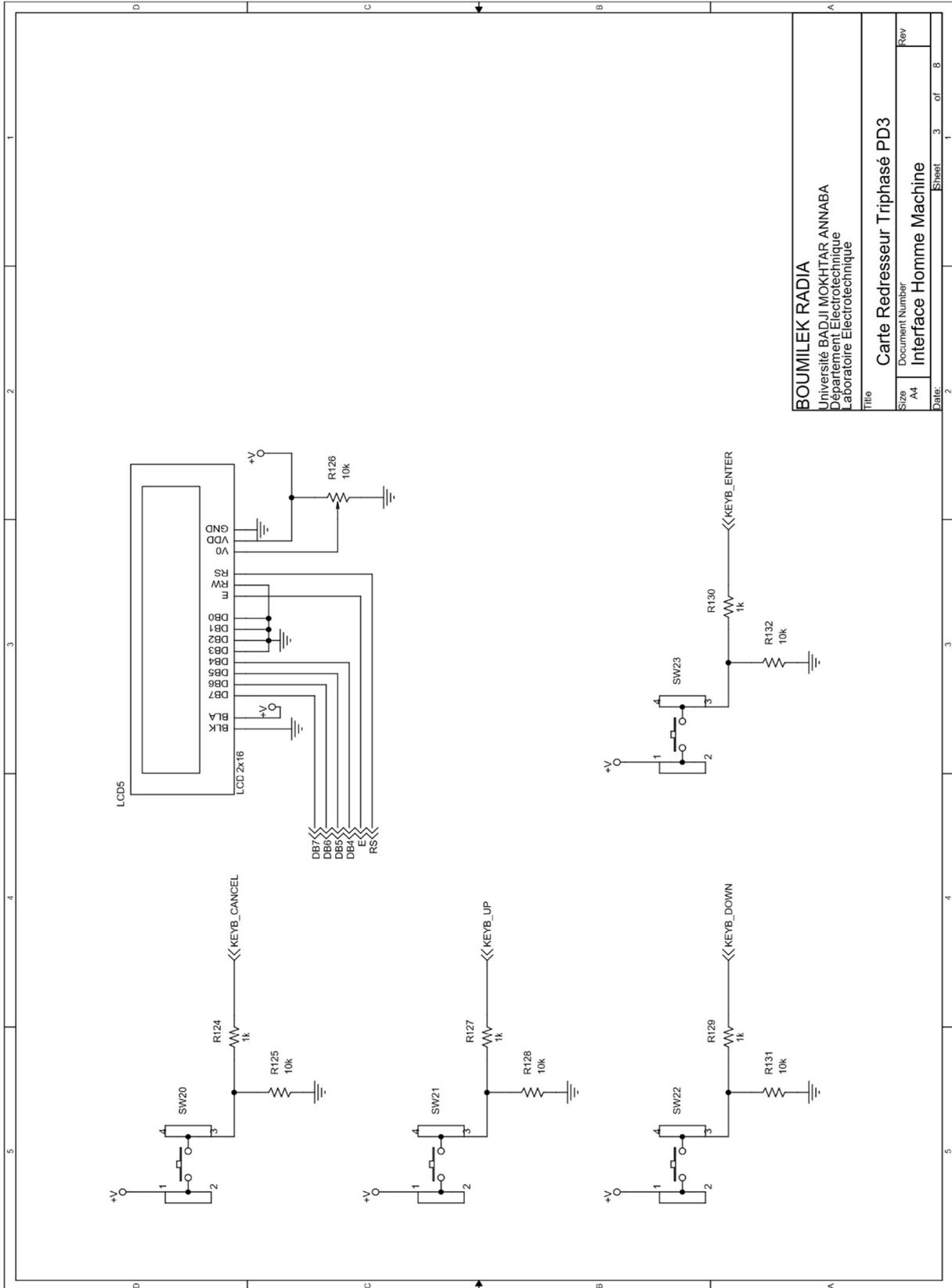




**BOUMILEK RADIA**  
 Université BADJI MOKHTAR ANNABA  
 Département Electrotechnique  
 Laboratoire Electrotechnique

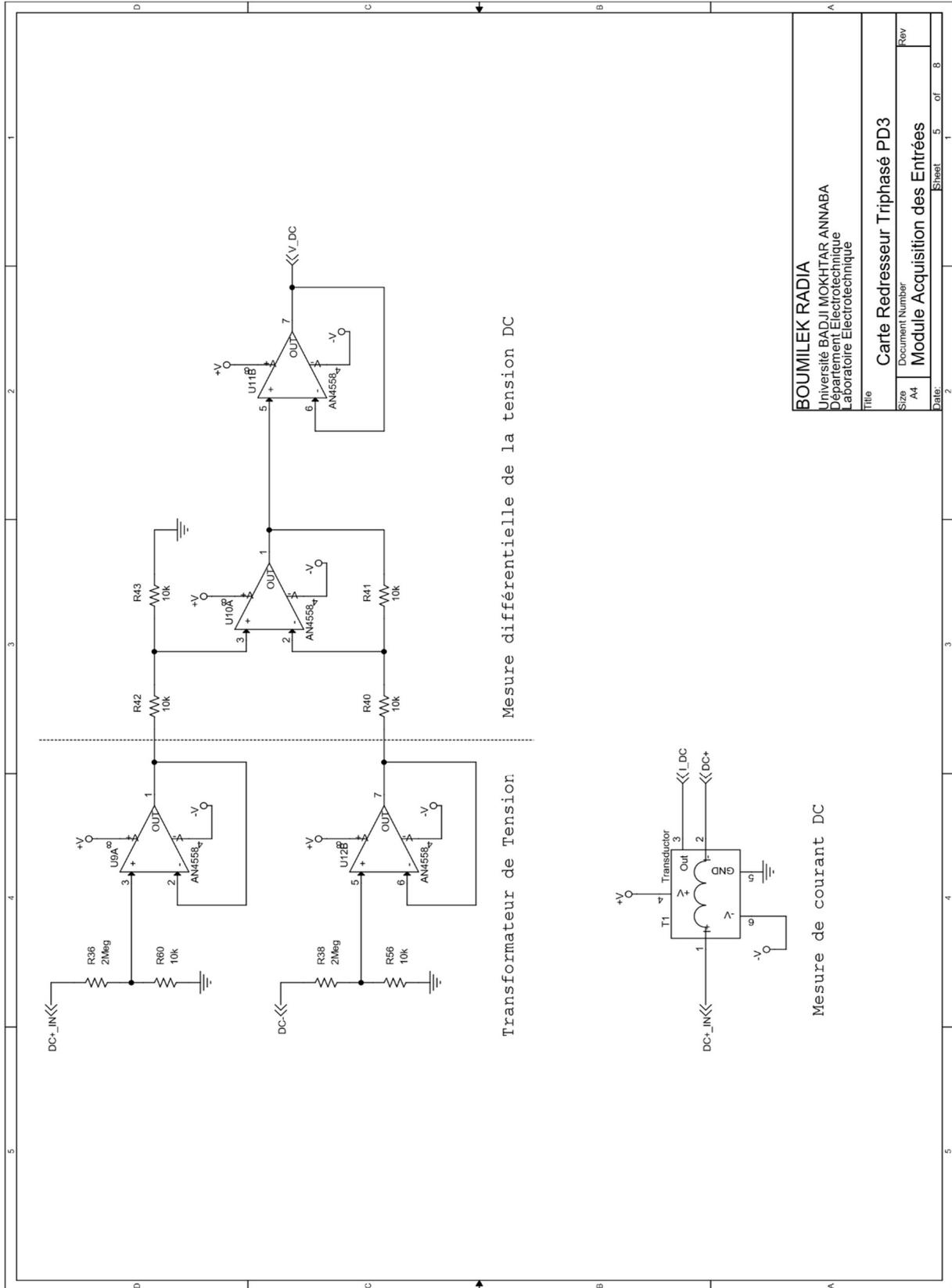
Title: **Carte Redresseur Triphase PD3**  
 Document Number: **Module de Commande & PreDriver**

Size: A4  
 Date: 2018-08-02  
 Sheet: 2 of 8

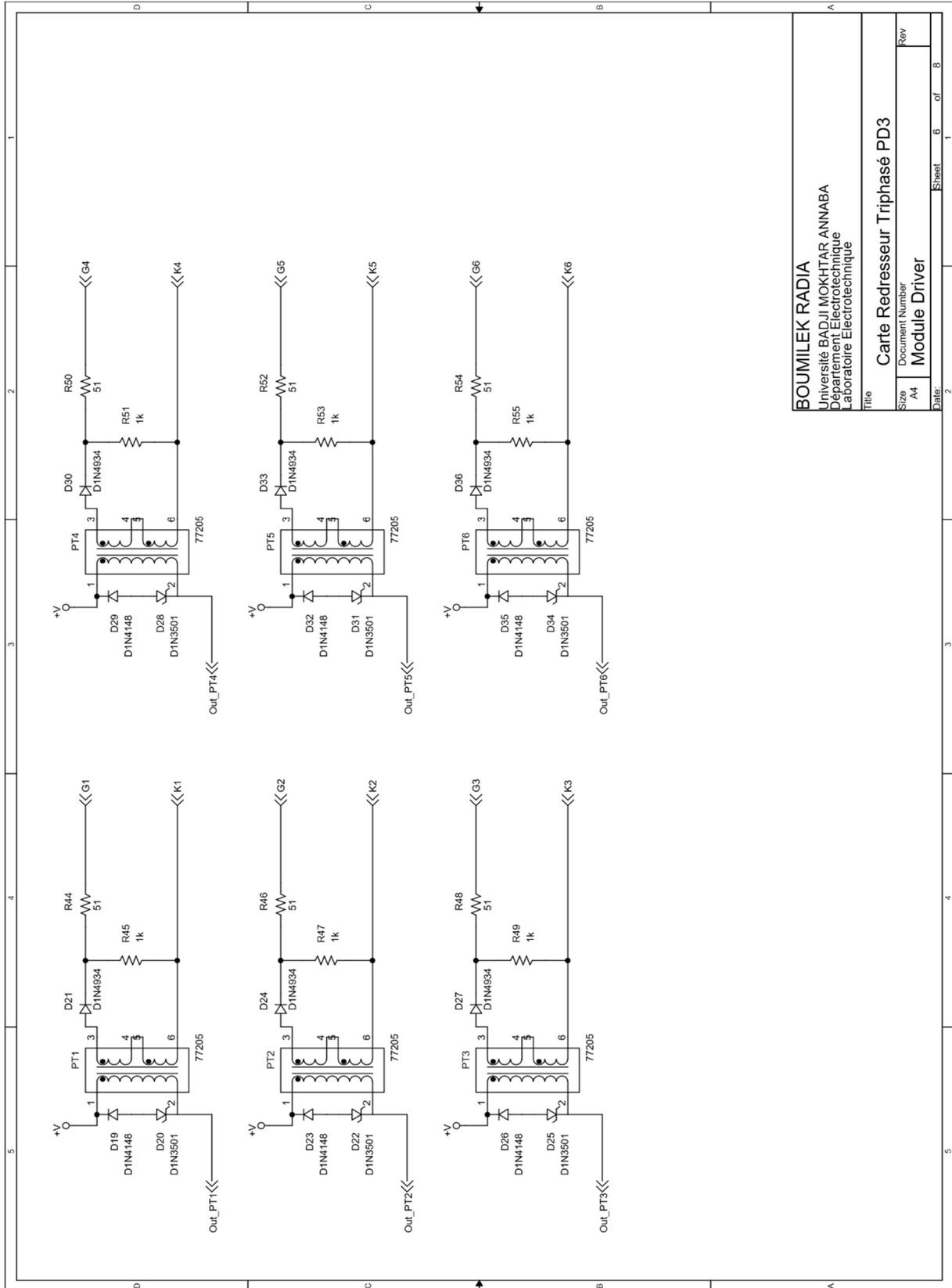


<b>BOUMILEK RADIA</b>	
Université BADJI MOKHTAR ANNABA	
Département Electrotechnique	
Laboratoire Electrotechnique	
Title: <b>Carte Redresseur Triphasé PD3</b>	
Size: A4	Document Number: Rev
Date: 2	Sheet: 3 of 8





<b>BOUMILEK RADIA</b>	
Université BADJI MOKHTAR ANNABA	
Département Electrotechnique	
Laboratoire Electrotechnique	
Title: <b>Carte Redresseur Triphasé PD3</b>	
Size: A4	Document Number: <b>Module Acquisition des Entrées</b>
Date: 2	Sheet: 5 of 8

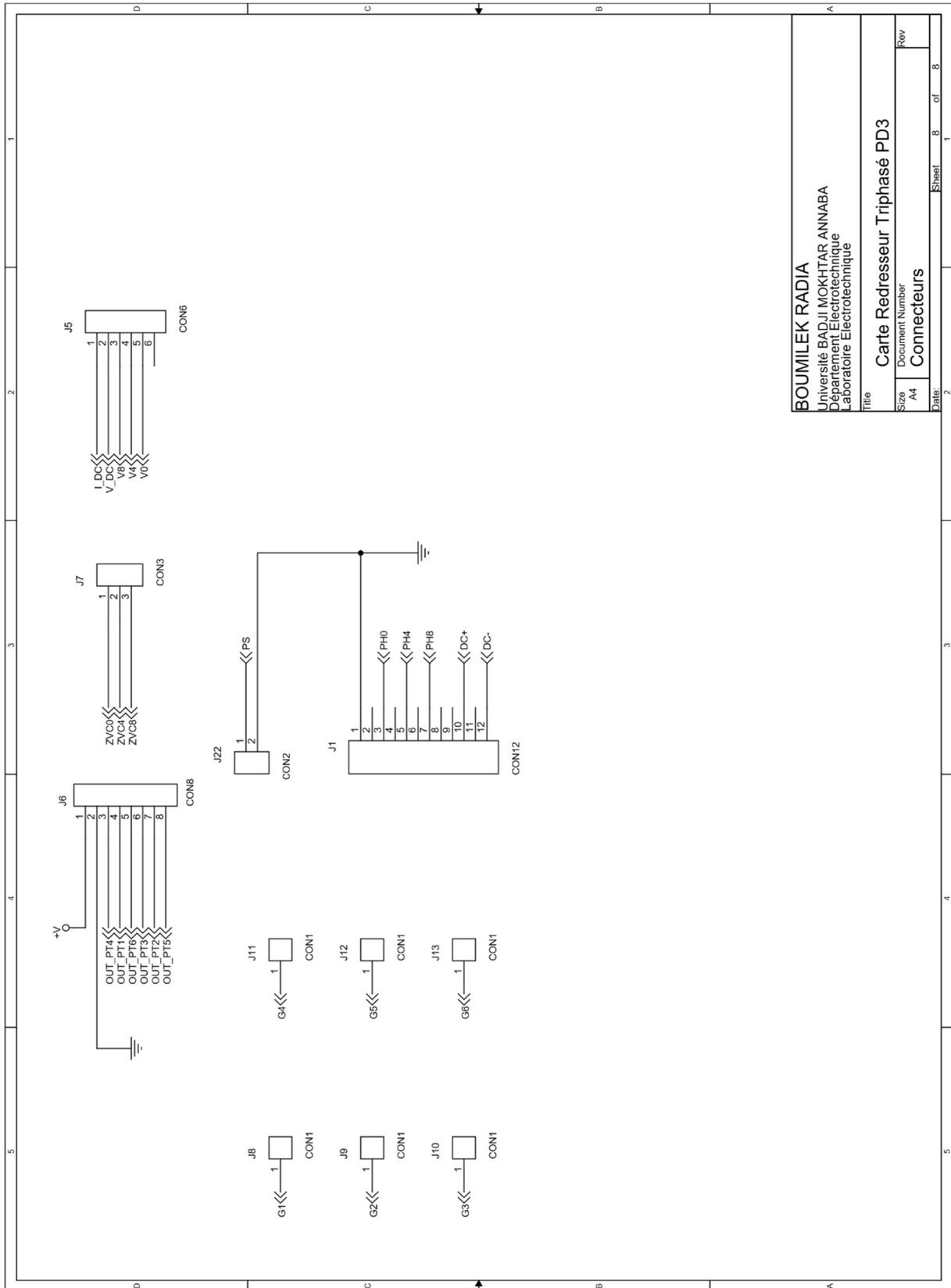


**BOUMILEK RADIA**  
 Université BADJI MOKHTAR ANNABA  
 Département Electrotechnique  
 Laboratoire Electrotechnique

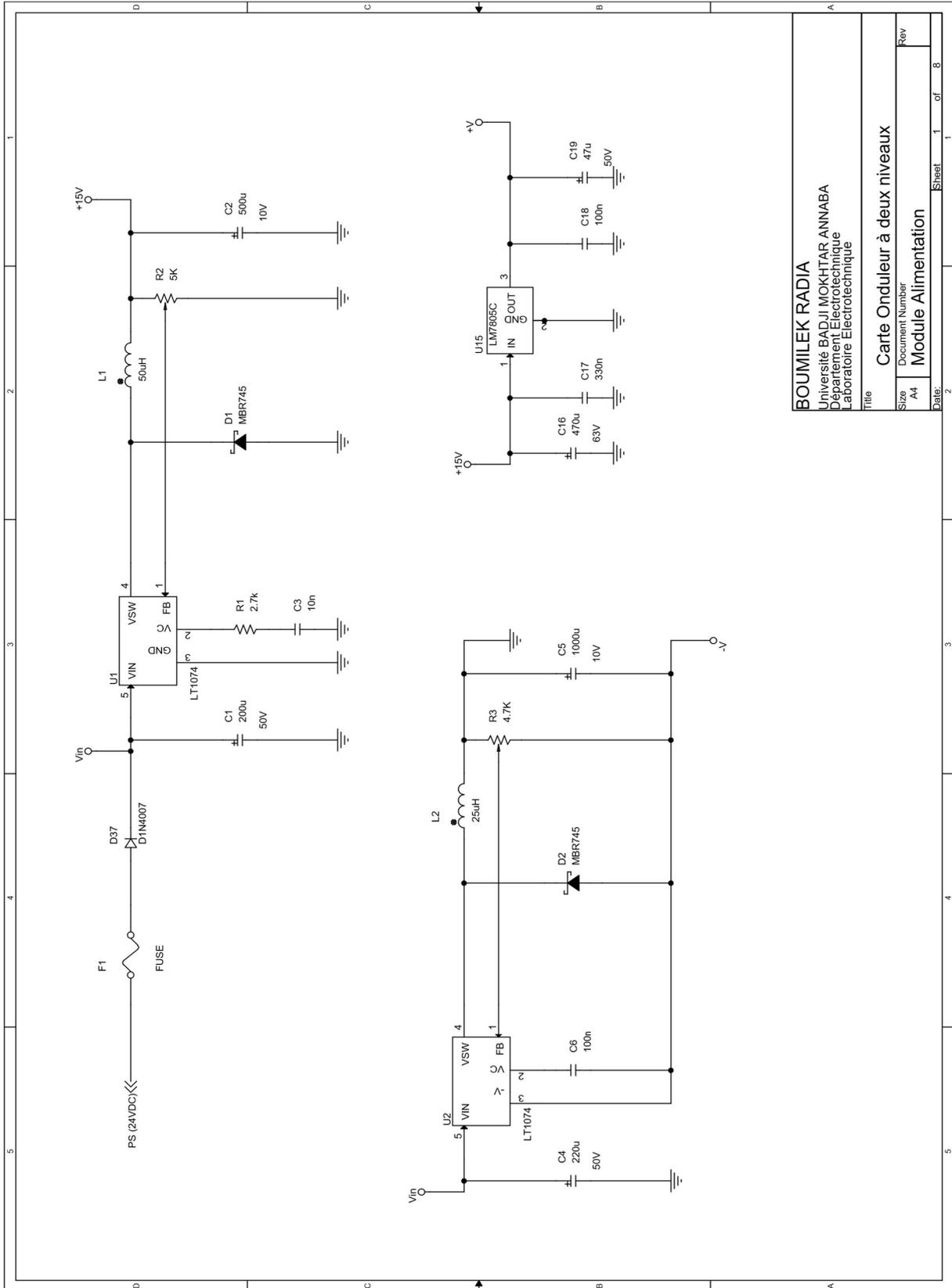
Title: **Carte Redresseur Triphasé PD3**  
 Document Number: **Module Driver**

Size	A4	Sheet	6	of	8
Rev		Date:			





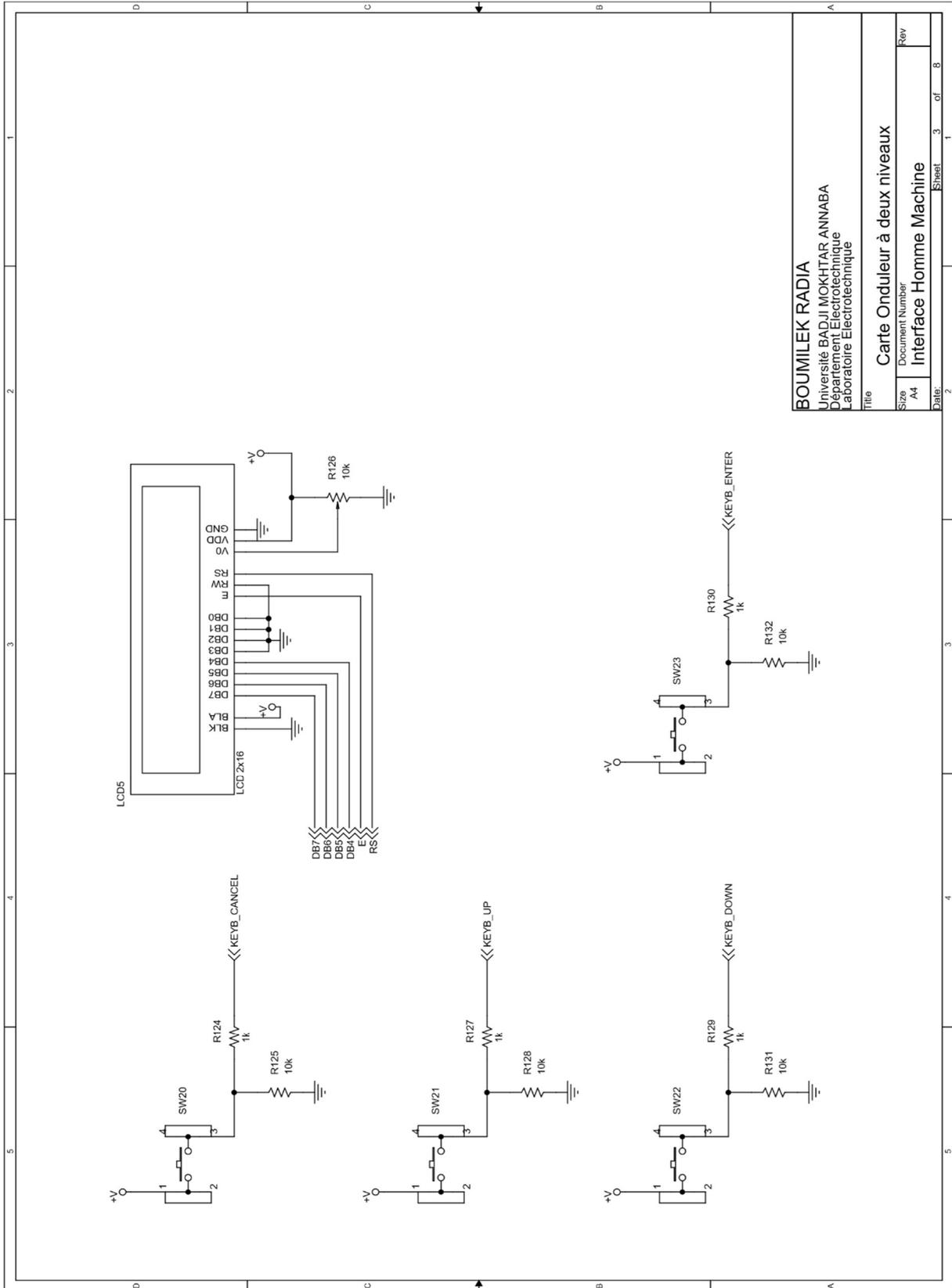
# Annexe C Schéma détaillé du l'Onduleur



**BOUMILEK RADIA**  
 Université BADJI MOKHTAR ANNABA  
 Département Electrotechnique  
 Laboratoire Electrotechnique

Title		Carte Onduleur à deux niveaux	
Document Number		Module Alimentation	
Size	A4	Sheet	1 of 8
Rev		Date:	



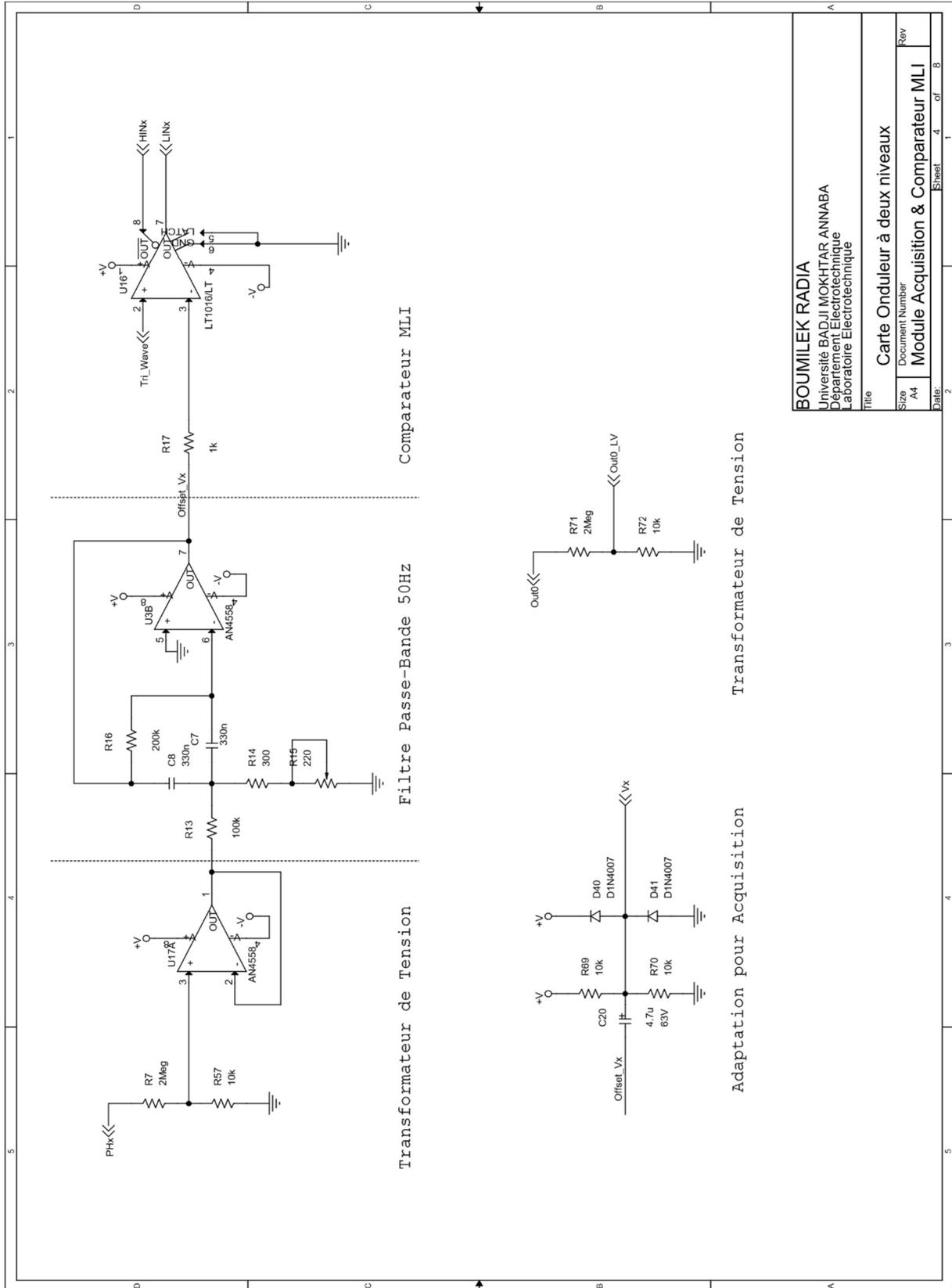


**BOUMILEK RADIA**

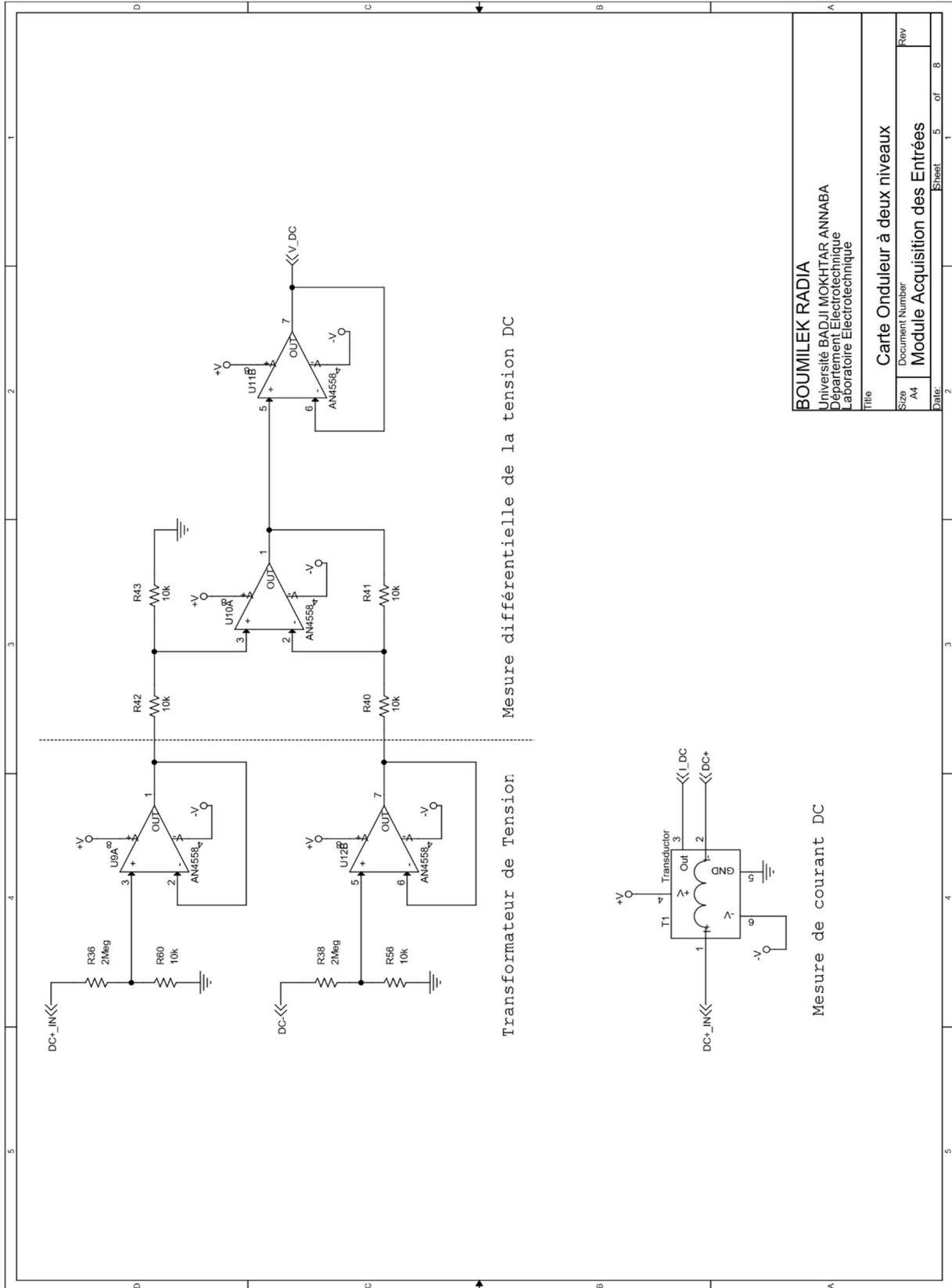
Université BADJI MOKHTAR ANNABA  
 Département Electrotechnique  
 Laboratoire Electrotechnique

Title: **Carte Onduleur à deux niveaux**

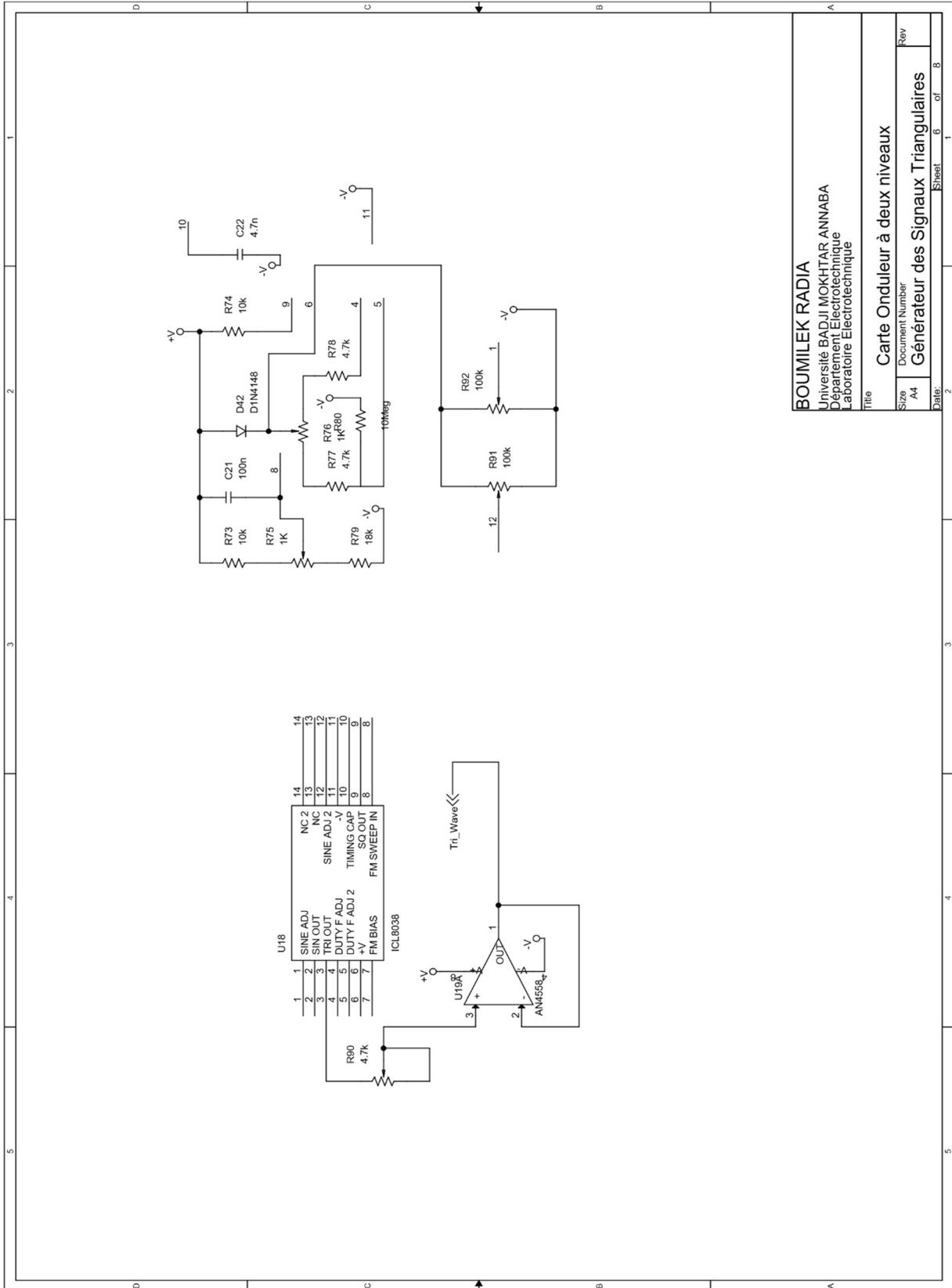
Document Number	Rev
A4	
Date:	Sheet: 3 of 8



BOUMILEK RADIA	
Université BADJI MOKHTAR ANNABA	
Département Electrotechnique	
Laboratoire Electrotechnique	
Title	
Carte Onduleur à deux niveaux	
Size	Document Number
A4	Module Acquisition & Comparateur MLI
Date:	Rev
2	4 of 8
Sheet:	1



<b>BOUMILEK RADIA</b>	
Université BADJI MOKHTAR ANNABA	
Département Electrotechnique	
Laboratoire Electrotechnique	
Title: <b>Carte Onduleur à deux niveaux</b>	
Size: A4	Document Number: 5 of 8
Rev: 1	Module Acquisition des Entrées
Date: 2	Sheet: 1

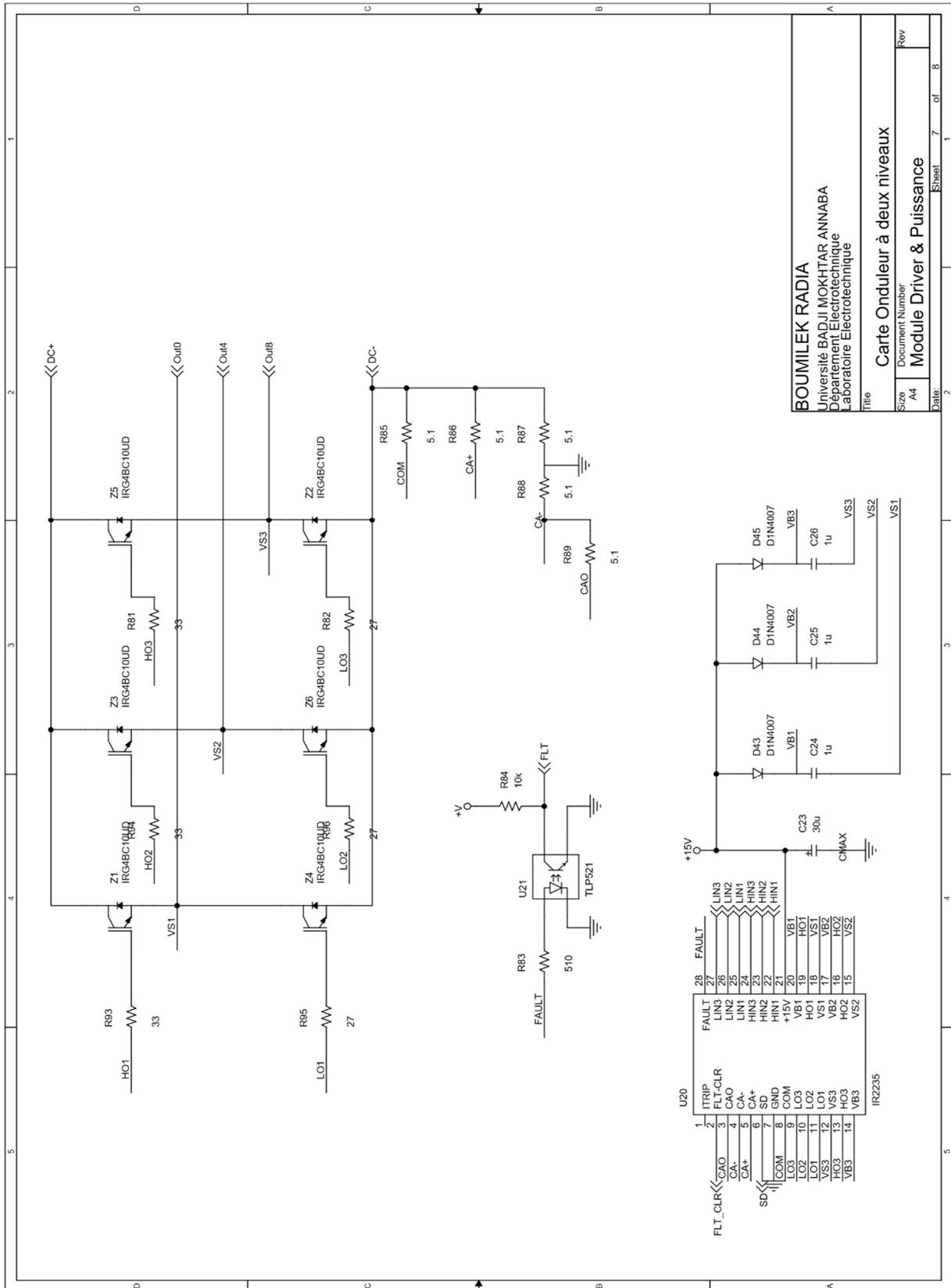


BOUMILEK RADIA

Université BADJI MOKHTAR ANNABA  
 Département Electrotechnique  
 Laboratoire Electrotechnique

Titre  
 Carte Onduleur à deux niveaux

Size	Document Number	Rev
A4		
Date:	Sheet:	6 of 8



**BOUMILEK RADIA**  
 Université BADJI MOKHTAR ANNABA  
 Département Electrotechnique  
 Laboratoire Electrotechnique

Title: **Carte Onduleur à deux niveaux**  
 Document Number: **Module Driver & Puissance**

Size: A4  
 Sheet: 7 of 8

