



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم  
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2021

## MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

### MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Par

Nom et Prénom : TABTI Bessaifi

Nom et Prénom : BEZAIM Larbi

### Intitulé du Sujet

**Etude et Simulation d'un Système de Régulation,  
Cas de fabrication du Chlore Usine ADWANE - FORNAKA**

Soutenu le / / 2021 devant le jury composé de :

Président :	BENTOUNES Hadj Adda	Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	BCHERI Fatiha	M.C.B	Université de Mostaganem
Rapporteur :	HADRI Bagdad	Professeur	Université de Mostaganem
	FATTAH Abdelkader	Enseignant associé	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2020/2021

# Remerciements

*Louange à dieu le tout puissant pour la volonté, La santé, la patience et les biens innombrables qu'il a bénis et accordés à son humble mortel pour qu'il puisse arriver à ce stade.*

*Je tiens à remercier mes encadreur Mr FATAH Abdelkader et Mr HADRI Baghdad pour avoir assuré la direction scientifique et technique de ce travail. Je remercie également les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de lire et d'évaluer ce modeste travail.*

*Je tiens enfin à remercier l'ensemble des enseignants du département de génie électrique pour leur patience et pour les efforts fournis durant toute notre formation.*

*Merci à toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à la réussite de ce travail.*

# Dédicace

*D'abord et avant tout, je dédie ce travail à mes très chers parents à qui je ne rendrais jamais assez. Je leur témoigne ici ma profonde reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.*

*Je dédie ce travail :*

*A ma chère femme et à mes chères enfants.*

*A mes chers frères et sœurs.*

*A toute l'équipe de l'ONML de Mostaganem*

*À tous ceux qui me sont chers.*

*TABTI Bessaïfi.*

# Dédicace

*Je dédie ce travail à :*

*Ma famille*

*Mes amis(es)*

*Et à tous ceux et celles qui m'ont soutenu*

*BEZAIM Larbi.*

## Sommaire

---

Listes des figures .....	I
Abréviations et Symboles .....	IV
Introduction Générale .....	VI

### CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'USINE

I.1. Introduction.....	02
I.2. Historique .....	03
I.3. Les activités de l'établissement .....	04
I.3.1. Usine de sable .....	04
I.3.2. Usine de chlore et dérivés .....	05
I.4. Importance économique de la société Adwan.....	07
I.5. Les produits fabriqués par l'usine de chlore .....	07
I.5.1. Le chlore .....	07
I.5.2. La soude caustique .....	07
I.5.3. Production de l'hypochlorite de sodium .....	08
I.5.3.1. Historique de la fabrication de l'eau de javel .....	08
I.5.3.2. Procédé de fabrication d'hypochlorite de sodium .....	09
I.6. L'électrolyse .....	09
I.6.1. Principe de fonctionnement de l'électrolyse et son rôle .....	09
I.6.2. Différents types d'électrolyseurs et application .....	10
I.6.2.1. Electrolyseur à membrane .....	10
I.6.2.2. Electrolyseur à mercure .....	12
I.7. Conclusion .....	14

### CHAPITRE II : CIRCUITS ELECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES POUR LE REDRESSEMENT

II.1. Introduction .....	16
II.2. Transformateur de puissance .....	17
II.2.1. Définition .....	17
II.2.2. Principe de fonctionnement .....	17
II.2.3. Le transformateur monophasé .....	18
II.2.3.1. Transformateur parfait .....	18
II.2.3.2. Transformateur monophasé réel .....	19
II.2.4. Transformateur triphasé .....	20
II.2.4.1. Nécessité d'utilisation .....	20
II.2.4.2. Constitution .....	20
II.2.4.3. Principe de Fonctionnement .....	21
II.2.4.4. Caractéristiques du transformateur triphasé .....	21
II.2.4.4.1. Couplage des enroulements .....	21
II.2.4.4.2. Couplage étoile –étoile .....	21
II.2.4.4.3. Couplage triangle –étoile .....	22
II.3. Redressement .....	23
II.3.1. Composants à semi-conducteurs utilisés pour le redressement .....	23
II.3.1.1. Diode .....	23
- Caractéristique d'une diode de redressement .....	23

## Sommaire

---

II.3.1.2. Thyristor .....	23
- Fonctionnement .....	24
II.3.2. Redressement Triphasé non commandé - PD3 .....	24
- Explications .....	25
II.3.3. Redressement triphasé commandé avec pont tout thyristors .....	26
II.4. Redresseur hémiphase .....	28
II.4.1. Les Harmoniques .....	30
- Pont redresseur hémiphase 12 phase .....	30
II.4.2. Compensation des harmoniques de courant du réseau .....	32
II.5. Conclusion .....	33

### CHAPITRE III : SYSTEME DE REGULATION

III.1. Introduction .....	35
III.2. La régulation .....	36
III.2.1. Historique .....	36
III.2.2. Régulation manuelle (commande manuelle) .....	36
III.2.3. Régulation automatique (commande automatique) .....	36
III.3. Types de régulations industrielles .....	36
III.3.1. Régulation analogique et numérique .....	37
III.3.1.1. Régulation analogique .....	37
III.3.1.2. Régulation numérique .....	38
• Fonctionnement général .....	38
• FRIEM Régulateur Numérique de l'usine AdwanChemicals (fig.III.3) .....	38
III.4. Le régulateur PID .....	39
III.4.1. Les notions de bases d'un régulateur PID .....	39
III.4.2. Généralités sur le Correcteur PID .....	40
III.4.3. Les différentes actions du régulateur PID .....	41
III.4.3.1. L'action proportionnelle (P) .....	41
III.4.3.2. L'action intégrale (I) .....	41
III.4.3.3. L'action dérivée (D) .....	41
III.4.4. Réglage des paramètres des actions PID .....	42
• Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN) .....	42
III.4.5. Qualités attendues d'une régulation .....	43
III.4.5.1. La stabilité .....	43
III.4.5.2. III.4.6.2 La précision .....	43
a. Précision statique .....	43
b. Précision dynamique .....	44
III.4.5.3. La rapidité .....	44
III.5. La régulation du courant redressé .....	44
III.5.1. Introduction .....	44
III.5.2. La régulation de température du transformateur .....	47
III.5.3. Refroidissement du transformateur .....	47
III.6. Conclusion .....	48

### Chapitre IV : SIMULATIONS, RESULTATS ET INTERPRETATIONS

IV.1. Introduction .....	50
IV.2. Simulation de chaque étage .....	50
IV.2.1. Réseau triphasé étage de l'alimentation (1er étage) .....	50
▪ Interprétation .....	52
▪ Interprétation .....	58
▪ Interprétation .....	62
▪ Commentaire .....	62
IV.2.2. Transformateur triphasé en charge alimenté par un réseau triphasé (2ème étage) .....	63
1- Graphe de la tension et courant de primaire (D) de transfo .....	64
2- Graphe de la tension et courant de secondaire1 (D) de transfo .....	65
3- Graphe de la tension et courant de secondaire2 (Y) de transfo .....	66
▪ Interprétation .....	67
▪ Commentaire .....	67
IV.2.3. Schéma de redresseur triphasé commandé et alimenté par un reséau triphasé (3ème étage) .....	67
1- Capture d'écran du redressement du tension et courant avec $\alpha=20$ .....	70
▪ Interprétation .....	70
▪ Commentaire .....	70
IV.2.4. Schéma de simulation de redresseur hexaphasé (4ème étage) .....	71
1- Capture d'écran des impulsions des thyristors .....	74
▪ Interprétation .....	74
IV.2.5. Schéma de simulation global (5ème étage) .....	74
1- Graphes de simulation (schéma global) .....	75
a) Graphe1 : tension redressée .....	75
b) Graphe2 : courant redressé .....	76
c) Graphe 2 Capture d'écran courant redressé .....	76
d) Graphe3 : tensions hexaphasées et tension redressée .....	77
e) Graphe capture d'écran l'héxaphasé .....	77
f) Capture d'écran des impulsions du thyristor .....	78
▪ Interprétation .....	78
▪ Analyse harmonique par FFT .....	79
▪ Interprétation .....	82
▪ Commentaire .....	83
IV.3. Conclusion .....	84
Conclusion Générale .....	85
Références bibliographiques .....	86
Annexe .....	88

**CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'USINE**

Figure I.1 : Présentation géographique des zones par domaine .....	03
Figure I.2: Administration ADWAN Chemicals-FORNAKA .....	04
Figure I.3: Unité de silicate de sodium .....	05
Figure I.4 : Usine de chlore (vue générale).....	06
Figure I.5 : Electrolyseur à membrane.....	10
Figure I.6 : Schéma de principe de l'électrolyseur à membrane .....	11
Figure I.7 : Schéma de l'électrolyseur à mercure.....	12
Figure I.8 : Electrolyseur à mercure .....	13

**CHAPITRE II : CIRCUITSELECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES POUR LE REDRESSEMENT**

Figure II.1 : Schémas de principe d'un transformateur .....	18
Figure II.2 : Transformateur parfait .....	18
Figure II.3 : Transformateur monophasé réel .....	19
Figure II.4 : Transformateur Triphasé .....	20
Figure II.5 : Couplage Etoile –Etoile .....	22
Figure II.6 : Couplage triangle – étoile .....	22
Figure II.7 : Symbole de la diode .....	23
Figure II.8 : symbole du thyristor .....	23
Figure II.9 : Redressement triphasé non commandé .....	24
Figure II.10 : La forme d'onde de la tension redressée moyenne (en rouge) .....	25
Figure II.11 : Redressement triphasé commandé .....	26
Figure II.12: la forme d'onde de la tension redressée moyenne avec un angle d'amorçage 30°.....	27
Figure II.13: Schéma du pont redresseur dodécaphasé .....	29
Figure II.14 : Pont Redresseur Dodecaphase.....	29
FigureII.15 : Tension redressée pour redresseur hémaphasé.....	30
FigureII.16 : Forme d'onde du courant redressé .....	30
Figure II.17 : Structure d'un pont hémaphasé .....	31
Figure II.18 : Tension réseau HT U13 et sortie du pont .....	31
Figure II.19 : Tensions U13 HT et sortie du pont .....	31
Figure II.20 : Tension réseau HT U13 et courant ligne .....	32
Figure II.21 : spectre courant ligne Phase1 .....	32

**CHAPITRE III : SYSTEME DE REGULATION**

Figure III.1 : Schéma de Principe d'une boucle de Régulation .....	35
Figure III.2 : Régulateur Analogique .....	37
Figure III.3 : Régulateur numérique de l'usine Adwan(ensemble boîtier et face avant).....	39
Figure III.4 : Schéma de régulation PID .....	40
Figure III.5 : Actions P, I, D .....	42
Figure III.6 : Réponse à un échelon de consigne .....	42
Figure III.7 : Régulateur numérique de température .....	46

**Chapitre IV : SIMULATIONS, RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

Figure IV.1 : Réseau triphasé pour une charge résistive équilibrée .....	51
Figure IV.2: Les tensions composées du réseau .....	51
Figure IV.3: Les courants de ligne .....	52
Figure IV.4 : Analyse harmonique FFT tension triphasée équilibré charge résistive ..	53
Figure IV.5 : Analyse harmonique courant triphasé équilibré (charge résistive) .....	54
Figure IV.6 : Réseau triphasé pour une charge RL .....	55
Figure IV.7 : Analyse harmonique FFT de la tension .....	56
Figure IV.8 : Analyse harmonique du courant .....	57
Figure IV.9 : La liste des valeurs THD (%) en fonction des fréquences .....	58
Figure IV.10 : Schéma de simulation de reseau avec l'application d'un filtre (RC) ...	59
Figure IV.11 : Analyse harmonique de la tension triphasé charge RL .....	60
Figure IV.12 : Harmonique du courant.analyse .....	61
Figure IV.13 : Liste des harmoniques THD en % .....	62
Figure IV.14 : Simulation du transformateur triphasé alimenté par un réseau triphasé de moyenne tension .....	63
Figure IV.15 : Les tensions triphasées du primaire(D) du transformateur .....	64
Figure IV.16 : Courants triphasés du primaire (D) du transformateur .....	64
Figure IV.17 : Tensions triphasées du secondaire (D) du transformateur .....	65
Figure IV.18 : Courants triphasés du secondaire (D) du transformateur .....	65
Figure IV.19 : Tensions triphasés du secandaire (Y) du transformateur .....	66
Figure IV.20 : Courants triphasés du secondaire (Y) du transformateur .....	66
Figure IV.21 : Simulation de redresseur PD3 Commandé alimenté par une source triphasé .....	67
Figure IV.22 : Résultat de simulation de la tension de source pour alimenter le redresseur PD3 Commandé .....	68
Figure IV.23 : Résultat de simulation de courant de source pour alimenter le redresseur PD3 Commandé .....	68
Figure IV.24 : Résultat de simulation de la tension redressée en DC avec un angle d'amorçage $\alpha = 0$ .....	69
Figure IV.25 : Résultat de simulation du courant redressé de PD3 .....	69
Figure IV.26 : Résultat de simulation concernant le courant et la tension redressé en DC avec un angle d'amorçage $\alpha = 20$ .....	70
Figure IV.27 : Simulation de redresseur hétéphasé Commandé 12 impulsions .....	71
Figure IV.28 : Résultat de simulation de la tension d'entrée .....	71
Figure IV.29 : Simulation du courant d'entrée .....	72
Figure IV.30 : Résultat de simulation des tensions hétéphasées et de la tension redressée .....	72
Figure IV.31 : Résultat de simulation du courant redressé .....	73
Figure IV.32 : Résultat de simulation de la tension redressée .....	73
Figure IV.33 : Les impulsions du gachette des thyristors .....	74
Figure IV.34 : Simulation de redresseur hétéphasé commandé avec la régulation du courant redressé .....	75
Figure IV.35 : Simulation de la tension redressée .....	75
Figure IV.36 : Simulation de la régulation courant redressé .....	76
Figure IV.37 : Régulation du courant redressé .....	76
Figure IV.38 : Simulation de l'hétéphasé et tension redressée .....	77

## Listes des Figures

---

Figure IV.39 : Simulation de l'héxaphasé et tension redressée .....	77
Figure IV.40 : Résultat de simulation des impulsions des thyristors .....	78
Figure IV.41 : Analyse harmonique du courant AC .....	79
Figure IV.42 : Analyse harmonique de la liste THD en % du courant AC .....	80
Figure IV.43 : Schéma de simulation global charge RL avec filtre harmonique .....	80
Figure IV.44 : Analyse harmonique du courant AC .....	81
Figure IV.45 : Analyse harmonique de liste de THD en % courant AC.....	82

# Abréviations et Symboles

---

## Chapitre I

CL	Chlore
Cl <sub>2</sub>	Chlore liquide
Na <sup>+</sup>	les ions sodium
OH <sup>-</sup>	les ions hydroxyde
NaOCl	l'hypochlorite de sodium
H <sub>2</sub>	Hydrogène
HCl	l'acide chlorhydrique
NaOH	La saude caustique
NaCl	Saumure
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	l'acide sulfurique
Fe	Fer
FeCl <sub>3</sub>	Chlorure ferrique
H <sub>2</sub> O	Eau
Hg	Mercure
NaHg	Amalgame

## Chapitre II

B	Champ magnétique
$\phi$	Flux magnétique
N1	Nombre des spires primaire
I1	Courant primaire
U1	Tension primaire
N2	Nombre des spires secondaire
I2	Courant secondaire
U2	Tension secondaire
M	Rapport de transformation
R	Résistance de noyau
r	Résistance de bobine
fem	force électromotrice
Y	Couplage étoile
D	couplage triangle
K	Cathode
A	ANODE
G	Gachette
D	Diode
TH	Thyristor
V <sub>SMOY</sub>	Tension moyenne
V <sub>max</sub>	Tension maxium

## Abréviations et Symboles

---

$U_{\text{eff}}$	Tension efficace
PD3	pont redresseur triphasé
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion

### Chapitre III

C	Consigne
M	Mesure
e	erreur
P	Proportionnel
I	Intégrale
D	Dérivée
$K_p$	Action Proportionnel
$K_i$	Action Intégral
t	le temps
$T_i$	la constante de temps intégral
$T_d$	la constante de temps dérivée
$K_d$	Action Dérivée
X	l'axe des abscisses
TOR	Tout Ou Rien
PI	Proportionnelle Intégrale
DRP -6T	Régulateur numérique
H(S)	Fonction de transfert

**INTRODUCTION**

**GÉNÉRALE**

### Introduction Générale :

L'industrie du chlore est un facteur important de l'économie mondiale avec une production de 44 millions de tonnes par an.

Le chlore provient du sel, une matière première quasiment inépuisable. Il possède des propriétés particulières et se trouve à la base – directement ou indirectement – d'une multitude d'applications allant du traitement de l'eau, à des applications médicales jusqu'à une importante palette de matières plastiques, avec pour principale le PVC.

Le chlore et ses dérivés ne sont pas seulement employés pour la désinfection de l'eau à titre préventif. Ils servent également au traitement des eaux usées et des effluents industriels. En outre, sous forme d'agents de blanchiment ménagers et industriels, le chlore contribue au maintien et à l'amélioration de l'hygiène.

Le chlore ( $\text{Cl}_2$ ) gazeux est obtenu par un procédé industriel basé sur l'électrolyse de la saumure. Le phénomène d'électrolyse nécessite du courant continu de très forte intensité. Ce courant est obtenu à l'aide d'un redressement hexasphasé et par le biais d'un réseau triphasé moyen tension et d'un transformateur triphasé. Pour garantir les résultats des réactions de l'électrolyse il devient nécessaire et les redresseurs hexasphasés sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion AC/DC, Plusieurs application industrielles exigent l'alimentation des charge non linéaires par une source alternative triphasée. Parmi ces charges on trouve les convertisseurs (AC/DC), qui sont largement utilisés en industrie.

Cette conversion d'énergie ne se préforme guère sans effets secondaire, tel que :

- Grand demande de puissance réactive par le convertisseur.
- Apparition d'un grand contenu harmonique dans le courant de ligne.
- Détérioration de la forme d'onde sinusoïdale de la tension d'entrée par phase.
- Provoque la perturbation de réseau et influe sur les consommateurs reliés au même nœud.
- L'ouverture automatique des thyristors utilisés dans les stations de conversion AC-DC est appelée commutation naturelle, elle est causée par la caractéristique naturelle de la tension de la source alternative, l'instant d'ouverture arrive quand le courant à travers le thyristor passe par zéro, et sa tension inverse

Pour minimiser les harmoniques dans le système alternatif en provenance du convertisseur et régler tension de sortie du convertisseur (AC/DC), plusieurs techniques ont été proposées. En générale ces techniques peuvent être classées comme suit :

Filtrage passif. Filtrage actif.

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir

## Introduction Générale

---

L'objectif global de la régulation peut se résumer par ces trois mots clefs : **mesurer, comparer, corriger.**

Régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) C'est un système d'auto régulation (boucle fermée), qui cherche à réduire l'erreur entre la consigne et la mesure.

L'objectif de notre travail est étudier le système de redressement hexaphasé et régulation pour alimenter l'électrolyseur et la fabrication du chlore, et de simuler quelques étages de système. Pour ce faire, notre manuscrit est divisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous décrivons la présentation de l'usine et les différents types de production des produits.

Dans le second chapitre, nous présentons les circuits électriques et électroniques de système de redressement et les effets harmoniques avec des remèdes.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de système de régulation et les différents types de régulateur PID.

Enfin le quatrième chapitre comporte les schémas de simulation et modélisation et les résultats obtenu par Matlab/Simulink de cinq étages sont analysés et interprétés.

On terminera ce mémoire par une conclusion générale.

# **CHAPITRE I**

## **PRESENTATION DE L'USINE**

### **I.1. Introduction :**

L'industrie du chlore joue un rôle très important dans le développement industriel et économique mondial. Aujourd'hui, plus de 50 % du chiffre d'affaires, plus de 30% des investissements et environ 25% des emplois de l'industrie chimique mondiale reposent sur les activités chlore, soude et dérivés. [1]

La soude (Na) et le chlore (Cl) nous donnent l'hypochlorite de sodium (NaOCl) qui est une solution claire légèrement jaune (eau de javel). Ce composé est utilisé efficacement dans le cadre de la purification de l'eau et dans de nombreuses autres applications telles que l'élimination des bactéries, le blanchiment et l'élimination d'odeurs. [2]

L'eau de javel reste l'un des produits les plus incontournables pour nettoyer efficacement le sol, les poubelles, les sanitaires ou encore les toilettes. Lorsqu'elle est associée à d'autres solutions détergentes, elle a des propriétés désodorisantes, blanchissantes et détachantes. Toutes ces propriétés rendent ce produit indispensable et sa production ne cesse d'augmenter à cause de la demande croissante.

Le chlore (Cl<sub>2</sub>) gazeux est obtenu par un procédé industriel basé sur l'électrolyse de la saumure qui est un mélange d'eau et de sel. Le phénomène d'électrolyse nécessite du courant continu de très forte intensité. Ce courant est obtenu à l'aide d'un redressement triphasé et par le biais d'un réseau triphasé moyen tension et d'un transformateur triphasé. Pour garantir les résultats des réactions de l'électrolyse il devient nécessaire de réguler ce courant redressé. L'usine de production Adwan chemical qui est spécialisée dans le domaine de production du chlore et de ses dérivés possède toute une infrastructure électrique et électronique pour l'électrolyse de la saumure. Dans ce premier chapitre nous allons procéder à l'historique et à une description de l'usine de production Adwan chemical.



La figure I.2 montre la façade de l'administration de l'usine.



**Figure I.2 :** Administration ADWAN Chemicals-FORNAKA.

### **I.3. Les activités de l'établissement**

La société Adwan a mis en place deux investissements, le premier pour la production de sable et dérivés et le deuxième pour la production de chlore et dérivés.

#### **I.3.1. Usine de sable :**

L'usine de production de sable industriel et dérivés a été mise en service en Février 2008. Depuis, elle produit 300000 T/an de sable traité, 45 000 T/an de farine de silice et 45 000 T/an de silicate de sodium. [2]

Le traitement du sable se fait en trois étapes : le lavage, le séchage et le tamisage

Le lavage : dans cette unité on procède au lavage et au tri du sable brut.

Le séchage : dans cette unité le sable humide est séché dans un four rotatif.

Le tamisage : pour que le sable puisse être séparé en fractions de différentes tailles selon la granulométrie désirée par les clients.

La farine de silice fine avec des tailles de particules allant de 8 à 100 microns est conditionnée dans des emballages différents.

Le silicate de sodium est fait à partir de la silice du sable lessivés sous une pression donnée, on lui ajoute ensuite une solution de soude caustique concentrée. [1]

La figure I.3 montre l'unité de silicate de sodium et le conditionnement du produit dans les sacs.



**Figure I.3 :** Unité de silicate de sodium

Le sable et ses dérivés sont utilisés dans la production du verre, de PIPE GRP, et de céramique ainsi que dans les fonderies (moulage de pièces métalliques).

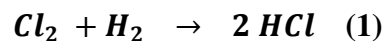
### **I.3.2. Usine de chlore et dérivés :**

Cette usine a été mise en service un peu plus tard que l'unité de sable, en décembre 2012, elle produit le chlore liquide, la soude caustique, l'hypochlorite de sodium, l'acide chlorhydrique et le chlorure ferrique. La figure I.4 montre une vue générale de l'usine de chlore.



**Figure I.4 :** Usine de chlore (vue générale).

La capacité de production de l'acide chlorhydrique est de 22300 T/an. Le chlorure d'hydrogène (HCl) est produit par synthèse directe entre le dichlore (Cl<sub>2</sub>) et le dihydrogène (H<sub>2</sub>). La synthèse est réalisée par combustion du dichlore avec le dihydrogène, la température atteinte est de 5000°C. [1]

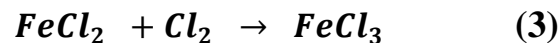
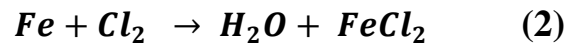


La réaction (1) a lieu en présence d'un excès de dihydrogène afin d'être sûre que tout le dichlore a réagi. [2]

Quant à la soude caustique, la capacité de production arrive à 24 000 T/an. L'hydroxyde de sodium (NaOH) est fabriqué par électrolyse d'une solution de chlorure de sodium (NaCl). [1]

Par ailleurs, une quantité de 42 000T d'hypochlorite de sodium est produite chaque année par la même usine : les solutions d'hypochlorite de sodium sont fabriquées par barbotage de chlore (à l'état gazeux) dans de la soude caustique diluée. Le chlore et la soude utilisés sont obtenus par électrolyse de la saumure (NaCl + eau).

On compte également une production de chlore liquide de 35 600T/j. Le chlore liquide est fabriqué par l'ajout du chlore gazeux (97%) à l'acide sulfurique(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) afin d'absorber l'eau du chlore, puis il est comprimé par un compresseur et refroidi à l'aide d'un échangeur de chaleur. Sans oublier le chlorure ferrique qui est obtenu à partir des réactions (2) et (3) du fer avec le chlore en présence de l'eau. [5]



#### **I.4. Importance économique de la société Adwan :**

L'existence d'une société d'une telle envergure contribue activement au développement économique de la région. La vocation principale de l'entreprise est de garantir aux clients locaux et étrangers une gamme de produits très variés et de bonne qualité.

Les produits fabriqués dans ce secteur sont utilisés dans le traitement des eaux, dans la production des détergents et du gasoil, dans la fabrication de pâte à papier et du savon ainsi que pour la fabrication des fibres textiles. Ils sont aussi utilisés pour le nettoyage des bouteilles à boissons et des citernes, et pour le lavage des gaz de fumée des centrales thermiques. [1]

#### **I.5. Les produits fabriqués par l'usine de chlore :**

##### **I.5.1. Le chlore :**

Le chlore (symbole Cl, numéro atomique 17) est un élément chimique de la famille des halogènes. Sa molécule Cl<sub>2</sub> (le dichlore) est un gaz verdâtre plus lourd que l'air. Irritant et suffocant, il fut employé comme gaz de combat pendant la première +la nature, dans les eaux salées et les gisements de sel notamment, à l'état d'halogénures. Il est aussi un constituant important de la matière vivante : le sérum sanguin renferme environ 7 grammes de chlorure de sodium par litre. Le chlore, comme élément chimique se situe dans la septième colonne du tableau périodique de Mendeleïev. Il possède sept électrons périphériques et sa pression de vapeur à 20 °C est de 6,5 bars. Le chlore est aisément liquéfiable, soit par refroidissement au-dessous de - 35 °C, soit par compression sous 7 à10 bars. [1]

##### **I.5.2. La soude caustique :**

L'hydroxyde de sodium (NaOH) est une base forte, aisément soluble dans l'eau. Elle est obtenue, lors de la phase de production du chlore, comme coproduit en même temps que l'hydrogène. L'hydroxyde de sodium ou lessive de soude possède, tout comme le chlore, un large champ d'application.

- Elle intervient dans la fabrication de la pâte à papier, du savon et des fibres textiles.

- Elle sert à la neutralisation des eaux acides dans les stations d'épuration, au nettoyage des bouteilles à boissons et des citernes, à l'élimination des colorants lors du recyclage du papier, au lavage des gaz de fumées des centrales thermiques, à la fabrication de l'aluminium.
- Elle fournit l'ion sodium, nécessaire à la synthèse de dérivés de sodium exigeant un milieu basique (silicates, perborates, phosphates, ...).
- Elle garantit un milieu très réactif, nécessaire dans les mécanismes de substitution et de condensation, qui permet la production d'agents chimiques intermédiaires purs et solubles. [2]

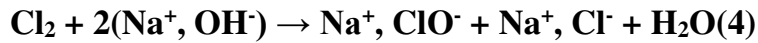
### **I.5.3. Production de l'hypochlorite de sodium :**

#### **I.5.3.1. Historique de la fabrication de l'eau de javel :**

C'est dans les années 1770 que le suédois Scheele découvre un gaz verdâtre par action de l'acide chlorhydrique sur le dioxyde de manganèse. Quarante ans plus tard les travaux de Gay-Lussac en France et de Davy en Angleterre montrent qu'il s'agit d'une nouvelle molécule : le dichlore (du grec chloros : vert). L'observation par Berthollet dans les années 1790 des propriétés décolorantes de ce gaz le conduit à préconiser son emploi en solution (c'est-à-dire sous forme d'eau de chlore) pour le blanchiment des textiles en remplacement de l'étendage sur pré, trop long et trop dépendant des conditions climatiques. Mais l'eau de chlore qui libère facilement du dichlore toxique est d'un emploi délicat et sa concentration en chlore est limitée par la solubilité réduite du dichlore dans l'eau (2,2 litres de dichlore par litre de solution à 25°C, sous 1 bar). Pour remédier à ces inconvénients, le dichlore a d'abord été dissous dans une solution alcaline d'hydroxyde de potassium. Cette solution de «chlorure décolorant», contenant des ions hypochlorites, reçut le nom d'eau de Javel. L'hydroxyde de sodium, meilleur marché a depuis remplacé l'hydroxyde de potassium dans la réaction chimique qui reste à la base de la fabrication industrielle des extraits et eau de Javel. Un procédé électrochimique peut être adopté pour des utilisations locales particulières. [1]

### I.5.3.2. Procédé de fabrication d'hypochlorite de sodium

La fabrication de l'hypochlorite de sodium ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{ClO}^-$ ) se fait selon la réaction(4) :



Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, l'industrie du chlore et de la soude qui s'est développée rapidement a modifié les procédés traditionnels. L'hypochlorite de sodium est fabriqué par l'absorption de chlore sur une solution de soude à plus de 18%. Le chlore et la soude sont obtenus par l'électrolyse de la saumure ( $\text{NaCl} + \text{eau}$ ). Le chlore est ajouté ensuite sous forme gazeuse à la soude. Dans la fabrication par le procédé standard de l'hypochlorite de sodium à 13% de chlore actif (50° chl.), la quantité de chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) est maintenue telle quelle. Dans le cas de la fabrication de l'hypochlorite de sodium à 24% de chlore actif (100° chl), une grande partie du sel est éliminée par précipitation et filtration. Un excès de soude est maintenu dans les solutions d'hypochlorite de sodium afin de stabiliser le Ph à au moins 12 et afin de limiter la vitesse de décomposition. [4]

## I.6. L'électrolyse :

### I.6.1. Principe de fonctionnement de l'électrolyse et son rôle :

L'électrolyse est une méthode qui permet de réaliser des réactions chimiques grâce à une activation électrique. C'est le processus de conversion de l'énergie électrique en énergie chimique. Elle permet par ailleurs, dans l'industrie chimique, de contribuer à la séparation d'éléments ou à la synthèse de composés chimiques. Elle intervient aussi dans la classification des corps purs.

La matière à décomposer ou à transférer est dissoute dans un solvant approprié, ou fondue, de sorte que ses ions constitutifs soient disponibles dans la solution.

- Une différence de potentiel électrique est appliquée entre deux électrodes (cathode et anode) immergées dans cette solution.
- La cathode est le siège d'une réduction et l'anode le siège d'une oxydation. Le potentiel de l'anode étant supérieur au potentiel de la cathode on peut dire que l'anode est la borne positive et que la cathode est la borne négative.
- Lors du passage d'un courant électrique continu, les électrodes attirent à elles les ions de charge opposée à leur signe. Les anions (-) migrent vers l'anode (+) tandis que les cations (+) migrent vers la cathode (-). [4]

Cependant, il serait faux de dire que l'électrolyse se résume à l'oxydation des anions à l'anode et à la réduction des cations à la cathode. En effet, il est aussi possible d'oxyder des cations à l'anode. [2] Cela est possible car le transport des espèces à l'électrode peut se faire par trois mécanismes différents : par migration qui entraîne le déplacement des espèces chimiques chargées (ions) dans le champ électrique au sein de la cellule d'électrolyse, par diffusion qui concerne toutes les espèces chimiques pour lesquelles il existe un gradient de concentration et par convection naturelle ou forcée selon que l'agitation de la solution est due à l'agitation thermique ou à une agitation mécanique. [2]

### I.6.2. Différents type d'électrolyseurs et application :

L'électrolyse du chlorure de sodium, en solution, est utilisée à grande échelle pour produire du dichlore et de la soude en utilisant des membranes ou des diaphragmes séparant les compartiments anodique et cathodique ou des cellules à cathode de mercure qui évitent, dans un premier temps, la réduction de l'eau et donc la formation d'hydroxydes. On retrouve alors trois techniques différentes d'électrolyse :

- l'électrolyse à mercure ou procédé à l'amalgame de mercure.
- l'électrolyse à diaphragme.
- l'électrolyse à membrane. [5]

#### I.6.2.1. Electrolyseur à membrane : (fig. I.5)

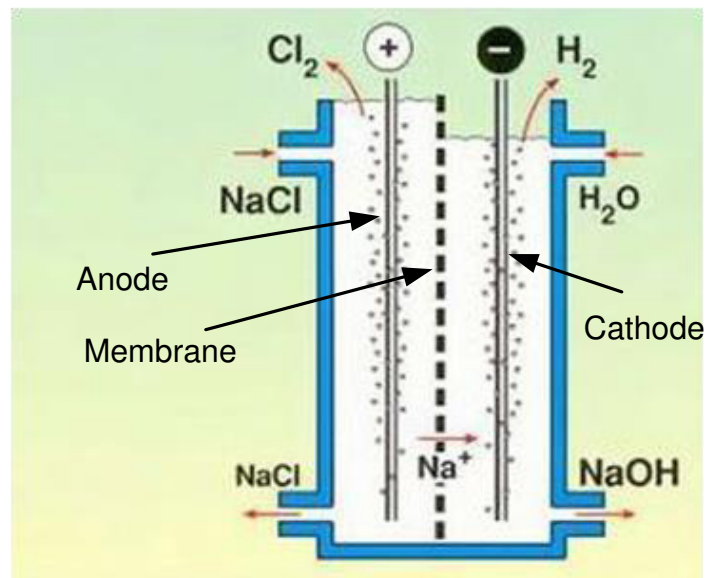


Figure I.5 : Electrolyseur à membrane

- Seuls les ions sodium (Na<sup>+</sup>) vont migrer de l'anode vers la cathode à travers la membrane pour se combiner avec les ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) pour former de la soude caustique (NaOH) de 31% à 32% selon la réaction (5). [1]



- La soude caustique produite sera collectée dans un réservoir de stockage. Cette soude sera diluée à une concentration de l'ordre de 20% afin de l'utiliser dans la production de l'hypochlorite de sodium. Le chlore gaz recueilli au niveau de l'anode sera acheminé vers le réacteur pour la production de l'hypochlorite de sodium (eau de Javel) ou pour la production d'autres produits comme l'acide chlorhydrique HCl, le chlorure ferrique  $\text{FeCl}_3$  et le chlore liquide  $\text{Cl}_2$ . L'hydrogène formé lors de la réduction de l'eau au niveau de la cathode sera dissipé dans l'atmosphère (air libre) (fig.I.6). [5]

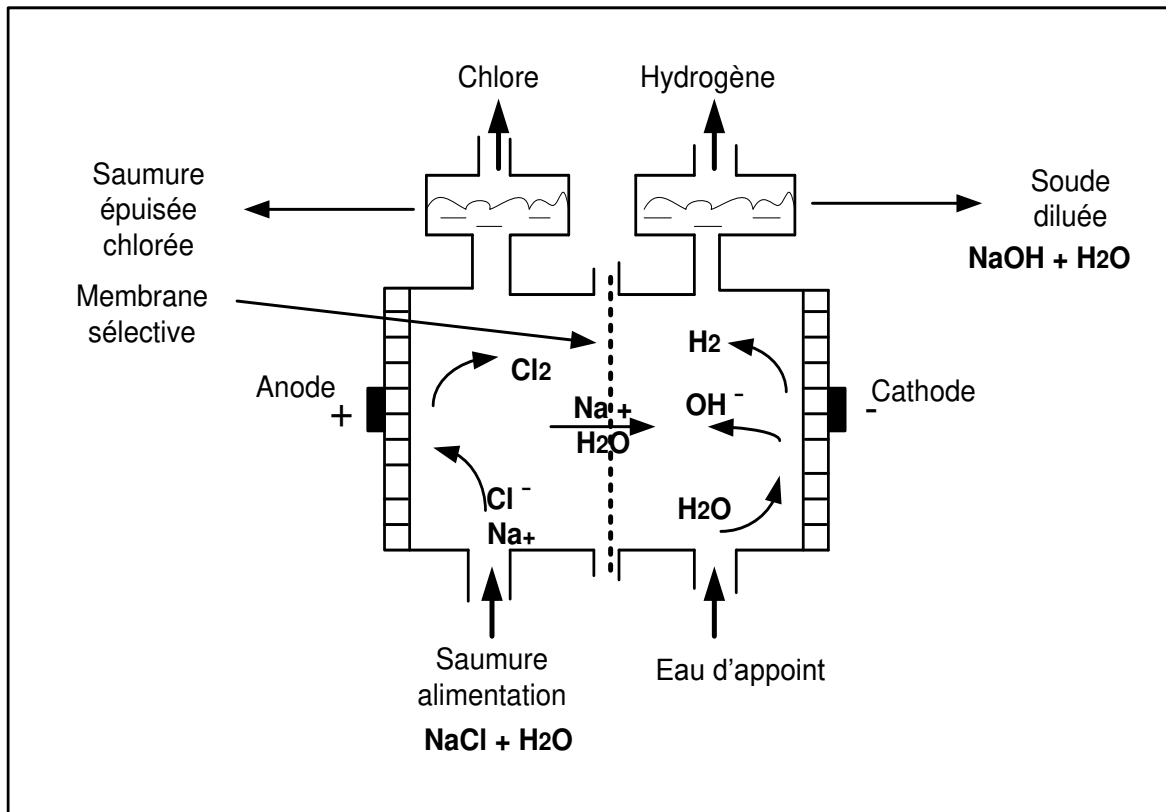
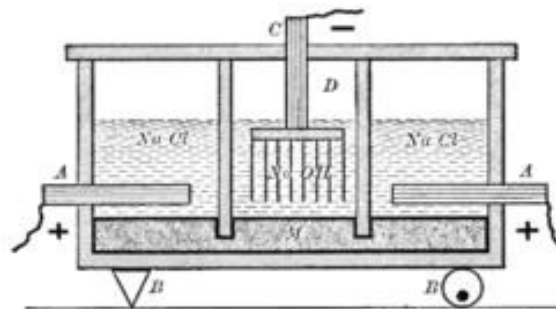


Figure I.6 : Schéma de principe de l'électrolyseur à membrane.

Schéma de procès de l'électrolyseur donné dans l'annexe A Figure 1.

### I.6.2.2. Electrolyseur à mercure (fig. I.7 et I.8)

Le procédé Castner–Kellner est une méthode d'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure alcalin pour produire l'hydroxyde alcalin correspondant. Cette méthode fut inventée par l'américain Hamilton Castner et l'autrichien Karl Kellner en 1890.



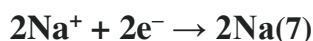
**Figure I.7 :** Schéma de l'électrolyseur à mercure

L'appareil original (fig.I.7) est constitué de 3 compartiments (ou cellules) séparés par des parois en ardoise. Les 2 compartiments à droite et à gauche du schéma utilisent un électrolyte de chlorure de sodium en solution, une anode en graphite (A), et une cathode en mercure (M). Celui du milieu utilise un électrolyte d'hydroxyde de sodium en solution, une anode de mercure (M), et une cathode en fer (D). À noter que l'électrode de mercure est partagée entre les trois compartiments. [3]

La réaction à l'anode (A) est :

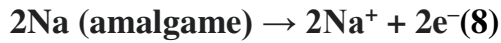


Le chlore gazeux qui en résulte s'accumule au sommet des cellules extérieures où il est recueilli comme sous-produit du processus. La réaction à la cathode de mercure extérieure est :

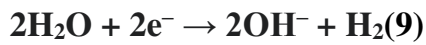


Le sodium métallique formé est dissous dans le mercure sous la forme d'un amalgame. Le mercure conduit le courant des cellules extérieures vers la cellule centrale. Par ailleurs, un mécanisme à bascule (B), représenté par le point d'appui à gauche et le rotateur excentrique à droite, agite le mercure pour transporter le sodium métallique dissous des cellules externes vers la cellule interne. [3]

La réaction (8) à l'anode de la cellule centrale se déroule à l'interface entre le mercure et la solution d'hydroxyde de sodium.



Finalement, la réaction(9) à la cathode de fer (D) est :



Le résultat est que la concentration de chlorure de sodium dans les cellules externes diminue tandis que celle de la cellule centrale augmente. Au fur et à mesure du processus la solution d'hydroxyde de sodium est retirée de la cellule centrale en tant que produit final et est remplacée par de l'eau salée (fig.I.8). Du chlorure de sodium est ajouté aux cellules externes pour remplacer ce qui a été hydrolysé. [3]

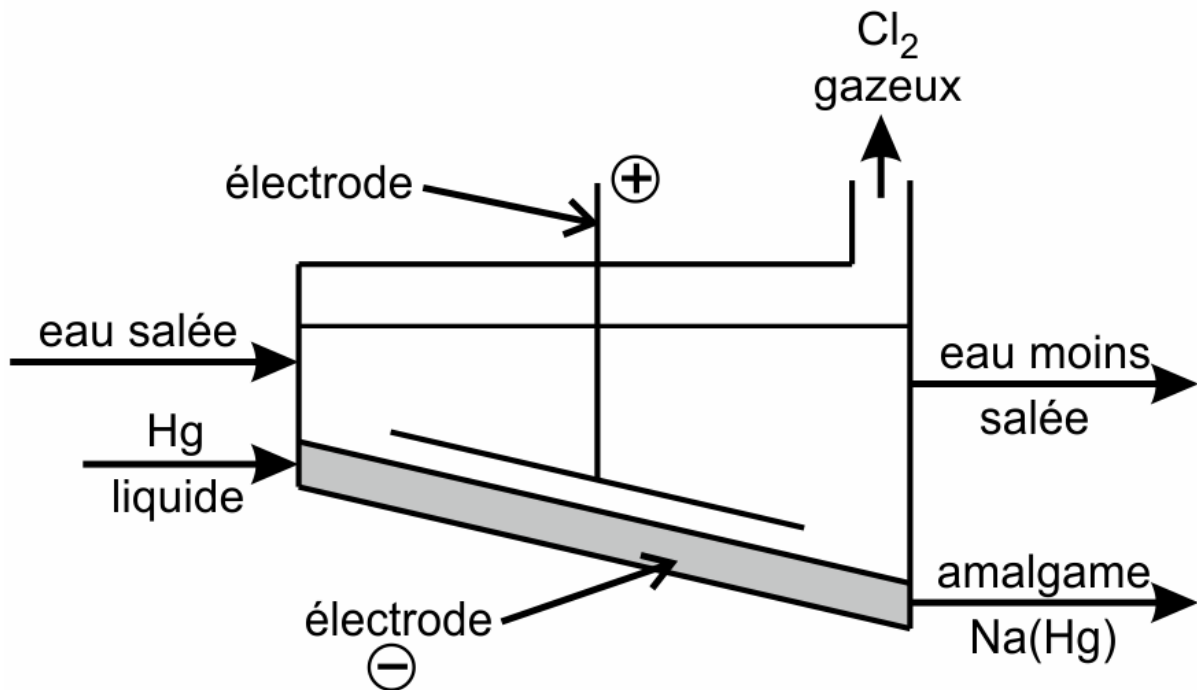


Figure I.8 : Electrolyseur à mercure

**I.7. Conclusion :**

Dans ce premier chapitre, nous avons procédé à une brève description de l'usine Adwan chemicals et des produits chimiques obtenus selon un process d'électrolyse industriel. Parmi ces produits chimiques le chlore est à la base de toute l'activité industrielle et commerciale de la société et de sa répercussion sur l'économie de la région de Fornaka. Le chlore est ainsi la matière principale qui permet de produire les autres produits dérivés.

Nous avons mentionné aussi certains types d'électrolyseurs utilisés dans l'industrie sachant que l'objectif de notre travail est l'étude et la simulation des systèmes électriques et électroniques de puissance qui permettent de réaliser une électrolyse industrielle à courant continu redressé et régulé.

## **CHAPITRE II**

# **CIRCUITS ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES POUR LE REDRESSEMENT**

## II.1. Introduction :

Depuis son apparition il y'a quelques décennies, l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel. Cet avènement s'est produit par l'arrivée de différents composants d'électronique de puissance sur le marché de la technologie tels que les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou transistors statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique. Ces convertisseurs ont apporté un progrès considérable au niveau des procédés industriels. Toutefois il faut savoir que l'introduction de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion de l'énergie électrique comme elle peut contribuer à améliorer le rendement du système peut aussi contribuer à détériorer la qualité du courant et de la tension étant donné que les paramètres de ces composants ne sont pas linéaires.

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation des différents étages des redresseurs de courants dans l'objectif d'obtenir une solution à notre problème.

Le transformateur est très important dans un réseau électrique car c'est une machine électrique de base pour le transport de l'énergie électrique. Le transformateur permet de modifier les valeurs (ou rapports) de la tension et du courant dans un circuit. Grâce à lui, l'énergie électrique peut être transportée à grande distance de façon économique et distribuée dans les usines et les maisons.

Pour les besoins énergétiques des industries spécialisées dans les produits à base d'électrolyse, l'énergie électrique continue de forte puissance est privilégiée. L'accroissement de la consommation de l'énergie électrique continue exige l'utilisation des convertisseurs AC/DC et en particulier les redresseurs triphasés à base de diodes ou de thyristors pour alimenter les équipements d'électrolyse. L'utilisation de ce type de convertisseurs donne de bons résultats du point de vue industriel et économique vu que les performances des procédés sont nettement améliorées et le coût de fonctionnement des équipements est clairement diminué, ce qui explique la grande utilisation de ces convertisseurs.

Le redressement que nous avons choisi pour alimenter l'électrolyseur est de type hémiphase commandé par thyristors. Ces derniers étant eux même commandés par système MLI (Modulation de la largeur d'impulsions).

Dans la suite, nous détaillerons le principe de fonctionnement du redresseur hémiphase de tension.

## II.2. Transformateur de puissance :

### II.2.1. Définition :

Un transformateur électrique est un convertisseur permettant de modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un système de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme.

Dans un transformateur statique, l'énergie est transférée du primaire au secondaire par l'intermédiaire du circuit magnétique du transformateur. Ces deux circuits (primaire et secondaire) sont alors magnétiquement couplés. Ceci permet de réaliser un isolement galvanique entre les deux circuits. [7]

### II.2.2. Principe de fonctionnement :

Le transformateur est constitué de deux enroulements (ou plus) avec couplages sur un noyau magnétique, comme à la figure II.1. Le côté de la source est appelé le primaire, et à  $N_1$  spires. Le côté de la charge est appelé le secondaire et à  $N_2$  spires. Le flux  $\phi$  est le flux mutuel. Le “•” indique la polarité des tensions. Par convention, un courant qui entre dans un “•” indique un flux positif.

L'un des deux bobinages jouant le rôle de primaire du transformateur, est alimenté sous tension variable et donne naissance à un flux variable dans le circuit magnétique. A son tour, ce flux induit une force électromotrice dans le deuxième bobinage appelé secondaire du transformateur. Les deux bobinages étant électriquement indépendants, le transformateur réalise l'isolation galvanique entre les circuits primaire et secondaire. [8]

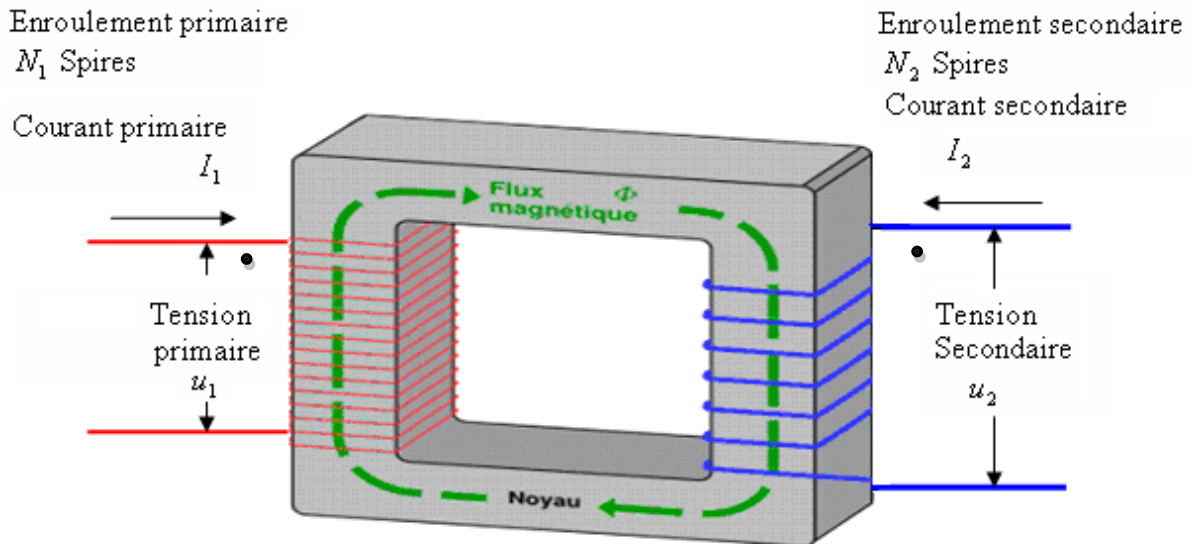


Figure II.1 : Schémas de principe d'un transformateur

### II.2.3. Le transformateur monophasé :

#### II.2.3.1. Transformateur parfait :

Le transformateur idéal (fig. II.2) vérifie les trois hypothèses de simplification suivantes et il peut représenter une bonne approximation d'un transformateur réel :

- Réluctance du noyau magnétique nulle :  $R_m = 0$ , cela revient à considérer que le courant de magnétisation est nul.
- Résistances des 2 enroulements nulles :  $r_1 = r_2 = 0 \Rightarrow$  les pertes joules dans les enroulements sont nulles.
- Aucune fuite magnétique, le flux qui traverse les 2 enroulements est le même. [6]

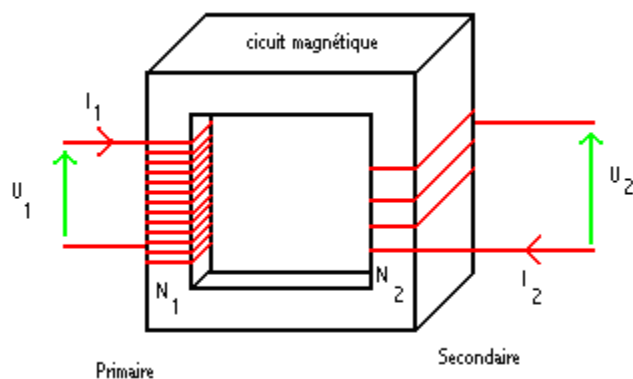


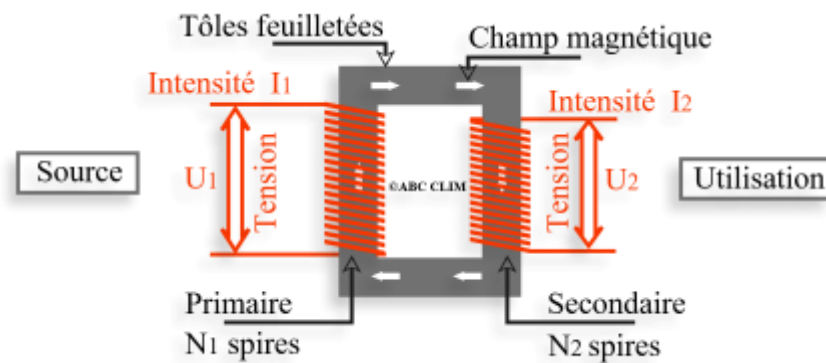
Figure. II.2 : Transformateur parfait.

### II.2.3.2. Transformateur monophasé réel :

Le transformateur permet de transférer de l'énergie (sous forme alternative) d'une source à une charge, tout en modifiant la valeur de la tension. La tension peut être soit élevée ou abaissée selon l'utilisation voulue. Le changement d'un niveau de tension à un autre se fait par l'effet d'un champ magnétique. Dans un transformateur réel les approximations citées précédemment ne sont plus valables.

Le transformateur monophasé réel (figure II.3) doit tenir compte de toutes les imperfections de montage et de matériaux utilisés et par conséquent :

- Réluctance du noyau magnétique non nulle. Cela revient à considérer que le courant de magnétisation n'est pas nul.
- Résistances des bobinages non nulles  $\Rightarrow$  Pertes joules dans les enroulements.
- Existence de fuites magnétiques à travers les tôles du circuit magnétique et possible effet de saturation. [9]



**Figure II.3 :** Transformateur monophasé réel.

Parmi les applications des transformateurs nous pouvons citer les domaines suivants :

- **Electronique :**
  - alimentation à basse tension
  - adaptation d'impédance
- **Electrotechnique :**
  - transformation de la tension pour le transport et la distribution d'électricité
  - alimentation à basse tension.
- **Mesure :**
  - transformateurs d'intensité de courant
  - transformateurs de potentiel.

## II.2.4. Transformateur triphasé :

### II.2.4.1. Nécessité d'utilisation :

Les transformateurs triphasés sont présents à différents niveaux dans les réseaux électriques pour adapter les valeurs efficaces des tensions à des valeurs qui permettent soit le transport soit la distribution de l'énergie électrique sachant que celle-ci est produite dans les centrales sous forme de tensions moyennes. Le transport à longue distance exige des hautes tensions afin de limiter les pertes par effet joule et réduire le dimensionnement des conducteurs, et l'utilisation demande des tensions basses ou moyennes. Des transformateurs triphasés élévateurs sont nécessaires au départ, et des transformateurs triphasés abaisseurs sont indispensables à l'arrivée côté consommateurs. [9]

La figure II.4 montre la photo d'une transformatrice triphasée moyenne/basse tension.



**Figure II. 4 :** Transformateur Triphasé.

### II.2.4.2. Constitution :

Pour réaliser un transformateur triphasé on associe 3 transformateurs monophasés sur un même circuit magnétique constitué de 3 ou 4 colonnes reliées entre elles. Les 3 bobinages primaires sont identiques tout comme les 3 bobinages secondaires. Il peut y avoir un secondaire ou plusieurs sur le même transformateur.

Chaque colonne portera un enroulement primaire et le ou les enroulements secondaires.

### II.2.4.3. Principe de Fonctionnement :

Lorsqu'on applique un système équilibré de tensions triphasées aux enroulements primaires du transformateur, les courants triphasés qui vont circuler dans ces enroulements créent des champs magnétiques variables dans le noyau métallique. Par passage des flux magnétiques à travers les enroulements secondaires, il y a création de fem induites et on obtient un système équilibré de tensions triphasées aux bornes des enroulements secondaires. Pour le choix du rapport entre les tensions primaires et secondaires, on joue sur le rapport du nombre de spires entre les enroulements primaire et secondaire. Pour un bon fonctionnement, on cherche :

- à ne pas saturer les colonnes magnétiquement.
- à avoir les mêmes intensités de flux dans chaque colonne pour avoir des courants de magnétisation équilibrés.

Pour 3 colonnes le transformateur est à flux liés et pour 4 colonnes le transformateur est à flux libres. [9]

### II.2.4.4. Caractéristiques du transformateur triphasé :

#### II.2.4.4.1. Couplage des enroulements :

Le groupe de couplage désigne l'association des couplages des enroulements choisis pour la moyenne tension et pour la basse tension. L'enroulement moyenne tension d'un transformateur triphasé de nombre de spires  $N_1$  peut être connecté en étoile (symbole Y) ou en triangle (symbole D). L'enroulement basse tension avec le nombre de spires  $N_2$  peut être connecté en étoile (symbole y), en triangle (symbole d) ou en zigzag (symbole z).

Les systèmes de tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont en général déphasés d'un angle  $\theta$  qui est multiple de  $\pi/6$  rd.

#### II.2.4.4.2. Couplage étoile –étoile :

Pour le couplage étoile-étoile les tensions aux bornes des bobines au primaire est au secondaire de la même colonne sont des tensions simples (fig. II.5 a et b). Ce qui permet de construire le diagramme vectoriel (fig. II.5 c). Le rapport de transformation est  $m=V_2/V_1$ . [9]

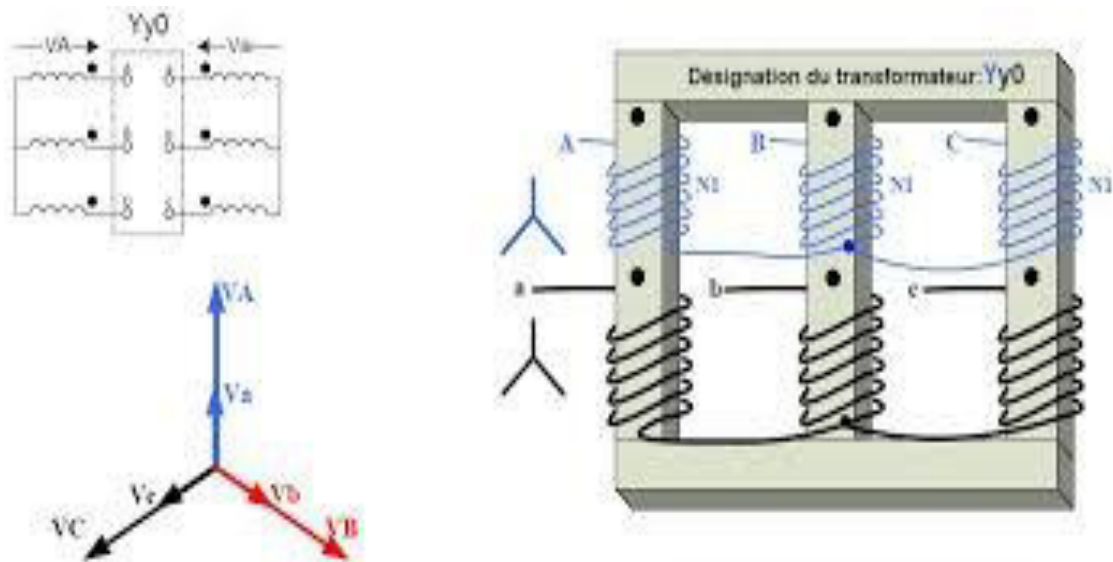


Figure II.5 : Couplage Etoile –Etoile.

### II.2.4.4.3. Couplage triangle –étoile :

Pour le couplage triangle –étoile la tension aux bornes d’une phase du primaire est une tension composée. Alors que la tension aux bornes de la phase correspondante du secondaire est une tension simple (fig. II.6 a). Le rapport de transformation est  $m = \sqrt{3} \cdot (U_2/U_1)$ . Le déphasage entre les tensions du primaire et du secondaire est de  $(-\pi/6 \text{ rd})$  d’où un indice horaire I=11 (fig. II.6 b). [9]

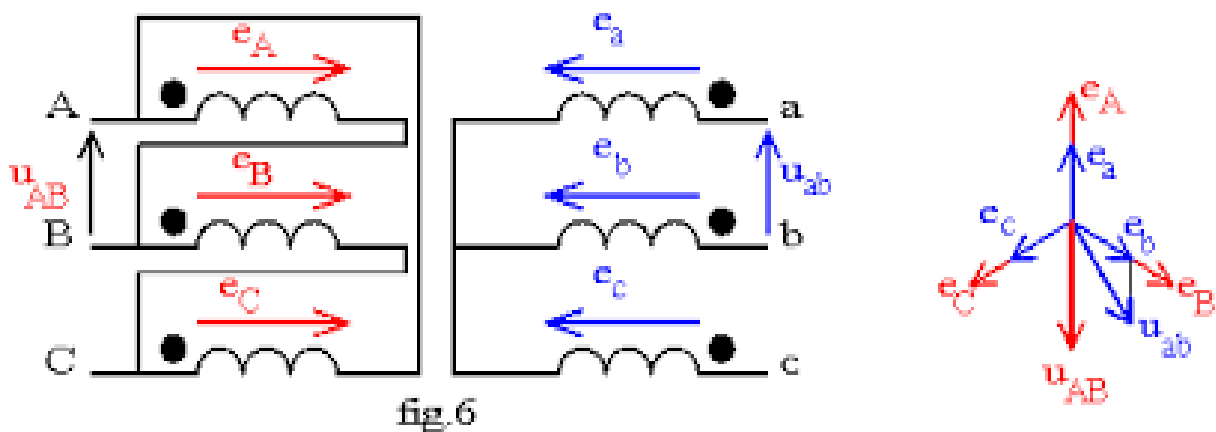


Figure II.6 : Couplage triangle – étoile.

### II.3. Redressement :

#### II.3.1. Composants à semi-conducteurs utilisés pour le redressement :

##### II.3.1.1. Diode :

Le symbole de la diode est donné par la figure II.7.



**Figure II.7 :** Symbole de la diode

On utilise les diodes à semi-conducteur à cause de leur conduction unidirectionnelle :

- En conduction,  $I_A > 0$  alors  $V_{AK} \approx 0$  pour une diode considérée comme idéale. La tension de seuil  $V_{AK}$  pour une diode réelle se situe entre 1 et 2 V.
- En régime bloqué,  $I_A = 0$  et  $V_{AK} < 0$ .

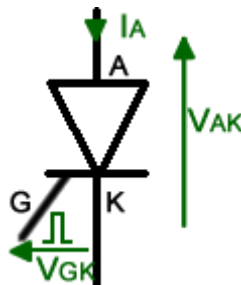
#### - Caractéristique d'une diode de redressement

Une diode de redressement 50 Hz est caractérisée par :

- La tension maximale instantanée qu'elle peut supporter en inverse :  $V_{rrm}$
- Le courant maximal direct moyen ou efficace :  $I_{FAV}$  ou  $I_{FRMS}$ . [11]

##### II.3.1.2. Thyristor :

Le symbole du thyristor est donné par la figure II.8.



**Figure II.8 :** Symbole du thyristor

Le thyristor est une diode dont la conduction est conditionnée par une brève impulsion de quelques volts appliquée entre la gâchette et la cathode.

### - Fonctionnement :

- Le thyristor entre en conduction lorsque la tension  $V_{AK}$  étant positive, on applique entre G et K une impulsion d'environ 1V et de durée égale à quelques  $\mu s$ .
- Le thyristor se bloque, naturellement, lorsque le courant  $I_A$  s'annule.
- A la fin de l'impulsion de commande, le courant  $I_A$  doit être supérieur au courant d'amorçage  $I_t$ , pour que le thyristor reste conducteur. On applique souvent des trains d'impulsions pour assurer la conduction.
- Le thyristor reste conducteur tant qu' $I_A$  est supérieure au courant de maintien  $I_h$ .

L'impulsion de commande est générée par un circuit intégré spécialisé ou un simple réseau déphaseur RC suivi d'un diac.

- Lors du blocage du thyristor et si la tension entre A et K augmente ou diminue trop vite, le thyristor peut se réamorcer intempestivement. Pour limiter ce  $dV/dt$  on place souvent un circuit RC amortisseur entre anode et cathode.
- A la mise en conduction, une augmentation trop rapide du courant d'anode peut entraîner la destruction du thyristor. Pour limiter ce  $dI/dt$  on place souvent une petite inductance en série avec le thyristor. [12]

### II.3.2.Redressement Triphasé non commandé - PD3 (fig. II.9)

Pour les puissances élevées le redressement triphasé déséquilibre moins le réseau triphasé et permet un lissage beaucoup plus efficace que le redressement monophasé.

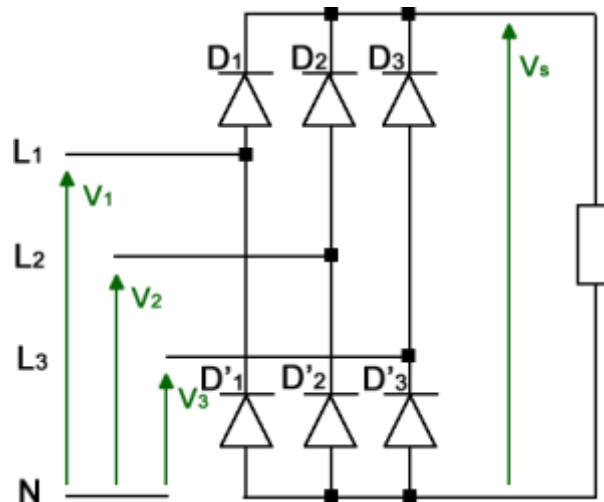


Figure II.9 : Redressement triphasé non commandé.

- **Explications :**

- Parmi les 3 diodes  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  seule une seule peut conduire à la fois : celle dont l'anode est soumise à la tension la plus élevée, les cathodes seront au potentiel de  $\text{Max}(V_1, V_2, V_3)$  en conduction continue.
- Parmi les 3 diodes  $D'_1$ ,  $D'_2$  et  $D'_3$  seule une seule peut conduire à la fois : celle dont la cathode est soumise à la tension la plus faible, les anodes seront au potentiel de  $\text{Min}(V_1, V_2, V_3)$  en conduction continue.

Si le courant de sortie est nul alors  $V_s=0$  ou  $V_s=E$  selon la nature de la charge.

Pour terminer, il suffit de remarquer que si  $D_i$  et  $D'_j$  conduisent alors  $V_s=V_i-V_j$  c'est à dire  $V_s=U_{ij}$ .

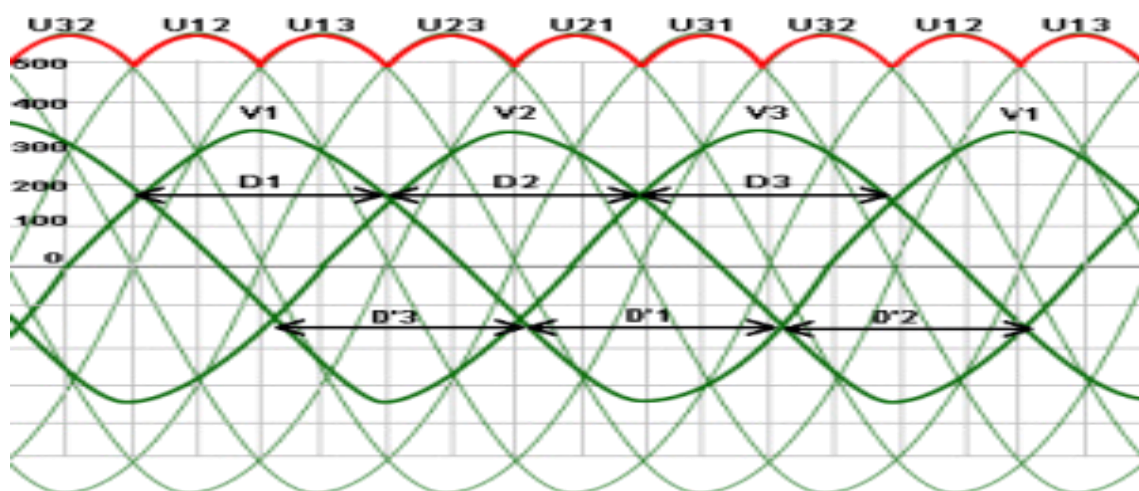
Si la conduction est continue, comme dans la figure II.9, on démontre que :

$$V_{\text{smoy}} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi}\right) V_{\text{max}(1)}$$

Ou encore :

$$V_{\text{smoy}} = \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right) U_{\text{eff}(2)}$$

La figure II.10 montre un exemple de tensions triphasées redressée et les périodes de conduction des 6 diodes, avec  $V_{\text{Eff}}=230\text{V}$ , et  $V_{\text{Smoy}}=540\text{V}$ . [11]



**Figure II.10 :** La forme d'onde de la tension redressée moyenne (en rouge).

### II.3.3.Redressement triphasé commandé avec pont tout thyristors(fig.II.11):

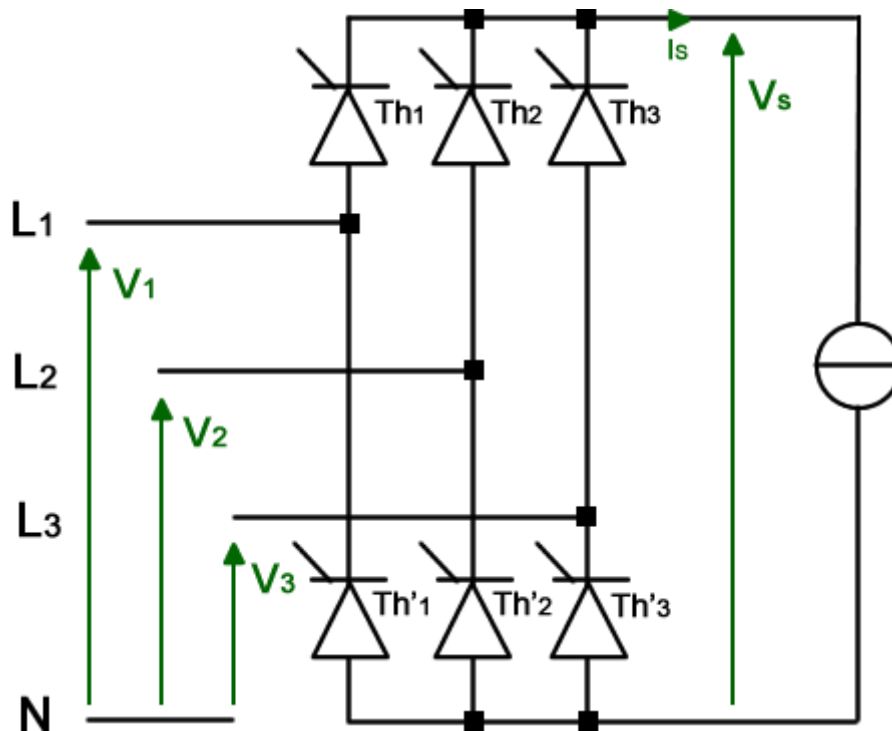


Figure II.11 : Redressement triphasé commandé

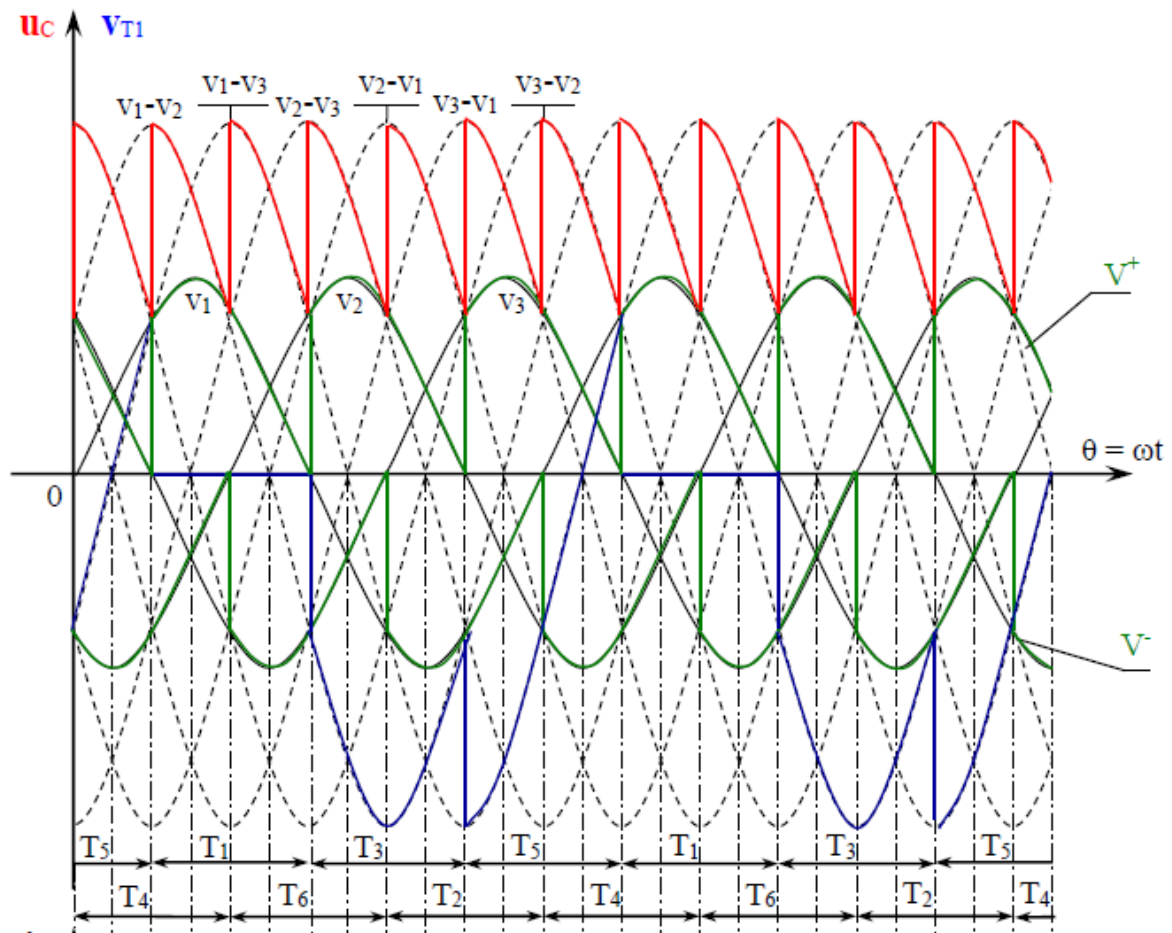
Le pont triphasé permet de ne pas trop déséquilibrer le réseau alternatif.

La particularité de ne comporter que des thyristors permet une réversibilité en puissance et de renvoyer de la puissance au réseau alternatif.

Le courant de sortie est toujours positif mais la tension moyenne peut devenir négative (onduleur assisté) si l'angle d'amorçage est compris entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$ .

Lorsqu'on amorce les thyristors avec un angle de retard à l'amorçage de  $0^\circ$ , la tension de sortie est similaire à celle obtenue avec un pont de diodes (fig.II.12).

Pour un angle d'amorçage non nul, il suffit de décaler les intervalles de conduction du même angle et reconstruire la tension de sortie. [11]



**Figure II.12 :** la forme d'onde de la tension redressée moyenne (courbe rouge) avec un angle d'amorçage  $30^\circ$ .

Le calcul montre que l'expression de la tension moyenne de sortie est :

$$\mathbf{V_{smoy}} = \left(\frac{3\sqrt{3}}{\pi}\right) \mathbf{V_{max}} \cdot \mathbf{cos\alpha(3)}$$

Ou encore, comme le neutre n'étant pas distribué, les tensions simples ne sont pas accessibles :

$$\mathbf{V_{smoy}} = \left(\frac{3\sqrt{2}}{\pi}\right) \mathbf{U_{eff}} \cdot \mathbf{cos\alpha} \quad (4)$$

On peut remarquer que pour  $\alpha > 90^\circ$ , la valeur moyenne de la tension est négative, ce qui correspond au fonctionnement en onduleur assisté. [11]

- **Pont commandé : angle d'amorçage limite des thyristors**

Le temps d'ouverture d'un thyristor « temps de recouvrement » est de l'ordre de 100 $\mu$ s.

Conséquence :

On ne peut pas amorcer les thyristors d'un pont avec des angles trop proches de 180° car sinon on risque d'avoir 2 branches en conduction : celle qui tarde à s'ouvrir (à cause du temps de recouvrement) et celle qui se ferme, donc on crée un court-circuit sur le réseau. En pratique, l'angle d'amorçage limite est de l'ordre de 150°. On ne cherche pas à aller au-delà de cet angle.[14]

#### **II.4. Redresseur hémiphase :**

Pour obtenir un convertisseur à 12 pulsations, il faut connecter deux ponts triphasés à thyristors en série (figure. II.13 et II.14). Le premier est alimenté par un transformateur triphasé couplé Y-Y (ou couplé  $\Delta$ - $\Delta$ ) et le deuxième par un transformateur triphasé couplé Y- $\Delta$  (ou couplé  $\Delta$ -Y). Les 2 transformateurs peuvent être regroupés dans un seul transformateur triphasé à un seul primaire et à 2 secondaires séparés (figure. II.13). Si on veut que les deux ponts en série possèdent les mêmes valeurs de tension, il faut que les tensions des secondaires soient égales.

De nombreuses applications ont besoin de courant continu, soit à basse tension (galvanoplastie), soit à haute tension (émetteurs, commande de moteurs par variateur de fréquence) ou à très haute tension. Dans les exemples cités le courant hémiphase est redressé par un circuit à 12 diodes pour un redressement non commandé ou par un circuit à 12 thyristors pour un redressement commandé. On utilise souvent le terme de pont à 12 impulsions pour le redressement commandé (il y a 12 pics ou impulsions de gâchettes par période et pour une ondulation).

On emploie le terme générique de pont à 12 impulsions (ou à 18 impulsions) car on n'utilise pas nécessairement des diodes dans le circuit : on peut utiliser des thyristors ou des transistors haute tension (IGBT) s'il faut un fonctionnement dans les deux sens (transfert de puissance du réseau alternatif vers le réseau continu et inversement). [15]

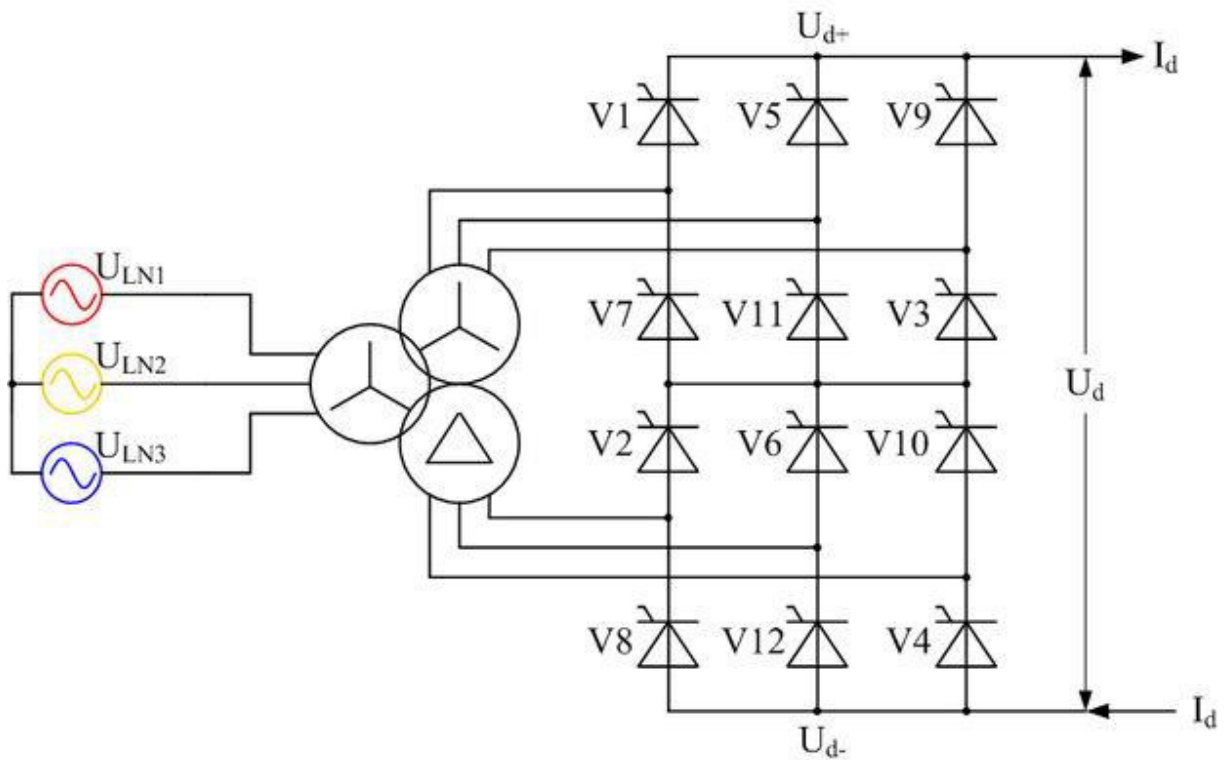


Figure II.13: Schéma du pont redresseur dodécaphasé .

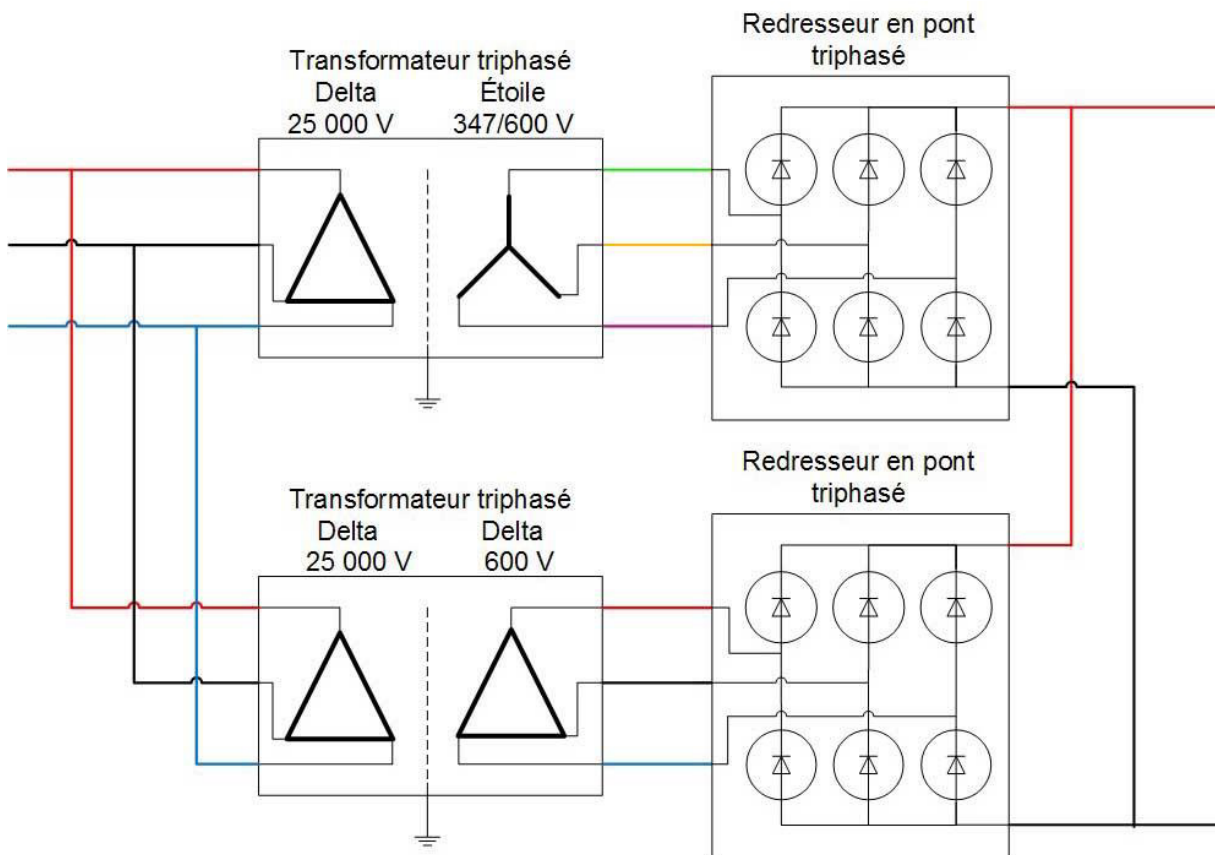
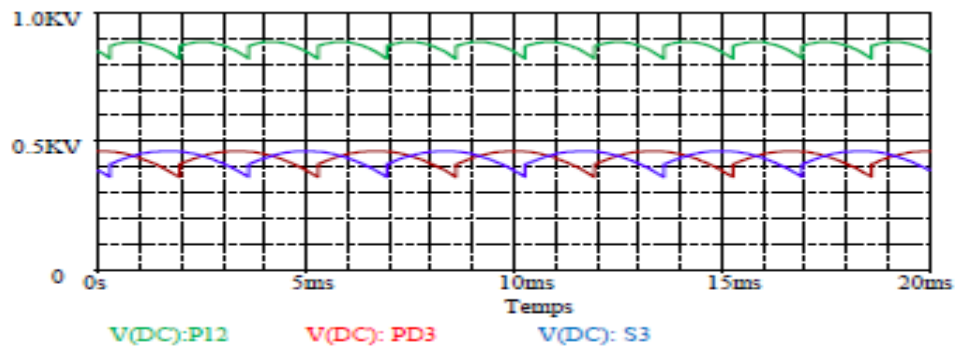
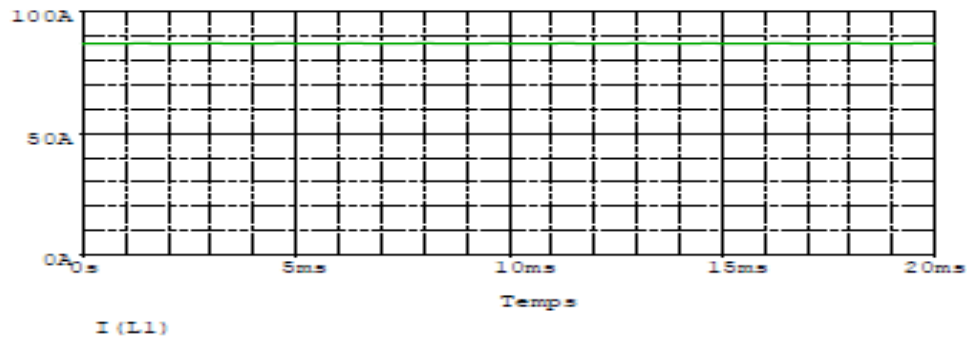


Figure II.14 : Pont Redresseur Dodecaphase .



FigureII.15 : Tension redressée pour redresseur hexasphasé.



FigureII.16 : Forme d'onde du courant redressé.

### II.4.1. Les Harmoniques :

#### - Pont redresseur hexasphasé 12 phase :

Un pont PD2 est un redresseur double alternance ou « biphasé » : la tension de sortie à une fréquence égale à  $2 \times f \Rightarrow$  harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 3 ; 5 -7 ; 9 -11 etc...

Un pont PD3 redresse les tensions composées, c'est un redresseur ' hexphasé ' : fréquence en sortie =  $6 \times f \Rightarrow$  harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 5-7; 11-13 etc..

On s'aperçoit donc qu'en augmentant le nombre de phases de redressement, on diminue l'ondulation de la tension de sortie et les harmoniques du courant réseaux'éloignent du fondamental.

Les ponts « X-phasés » sont réalisés en associant en série des redresseurs PD3 alimentés par différents transformateurs (pour créer un décalage de  $(360 / X)^\circ$  entre les tensions redressées).

Le redresseur « dodécaphasé » est un redresseur à 12 phases(soit  $30^\circ$  par phase).

L'ondulation de la tension de sortie d'un hémaphasé est plus faible (fréquence  $12 \times f$ ), le TDH de son courant réseau est plus faible (harmoniques de rang 1 ; 11-13 ; 23-25 ...), le facteur de puissance est meilleur.

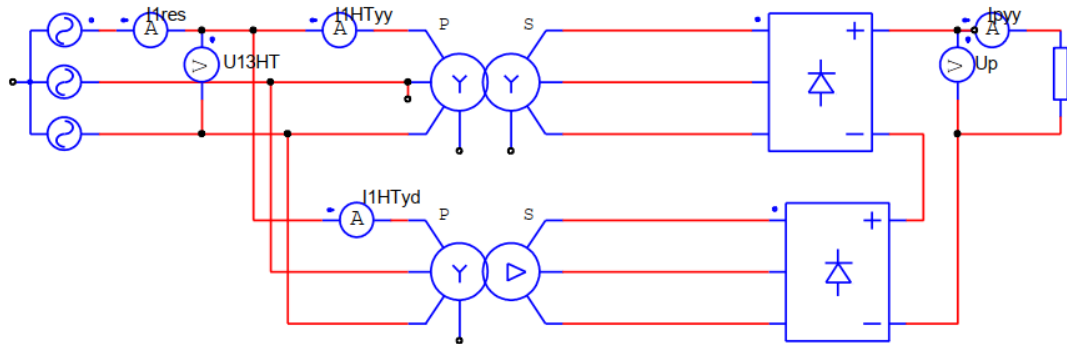


Figure II.17 : Structure d'un pont hémaphasé.

Le transformateur Yd décale les tensions de  $30^\circ$  par rapport à celles du réseau.

Les sorties des redresseurs sont mises en série. La tension  $U_p$  récupérée est la somme d'un pont PD3 « normal » (transformateur Yy) et d'un pont PD3 décalé de  $30^\circ$  (Yd).

La fréquence de l'ondulation de la tension de sortie est donc doublée par rapport à unPD3.

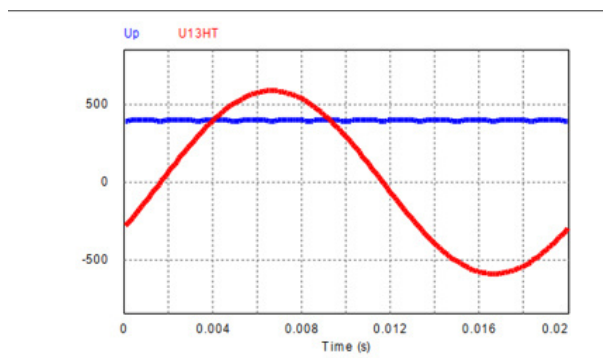


Figure II.18: Tension réseau HT U13 et sortie du pont.

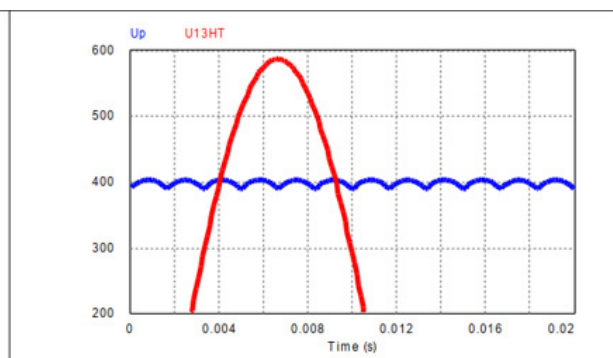
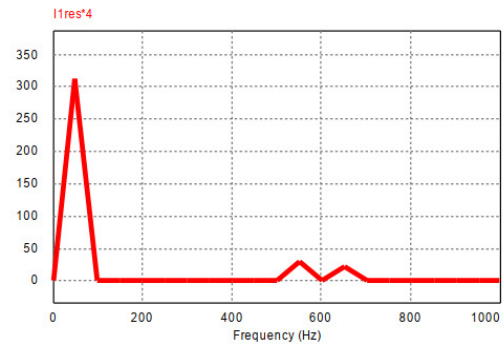
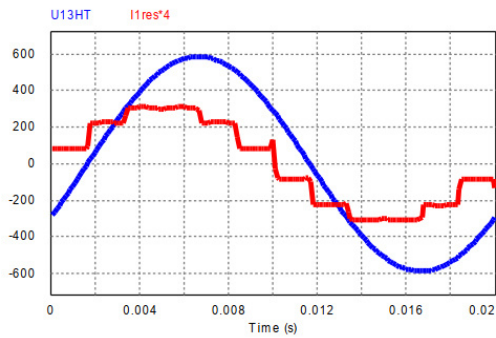


Figure II.19 : Tensions U13 HT et sortie du pont.



**Figure II.20 :** Tension réseau HT U13 et courant ligne  
**Figure II.21 :** spectre courant ligne phase1

#### II.4.2. Compensation des harmoniques de courant du réseau :

La compensation d'harmonique fonctionne sur le même principe que la compensation de réactif : la charge a besoin d'un certain type de courant (déphasé - riche en harmonique) mais le réseau ne veut fournir qu'un courant sinusoïdal 50Hz en phase avec la tension.

Il faut donc placer en parallèle au réseau une installation capable de fournir à la charge ce que ne veut pas le réseau. [14]

Schémas architecture du transformateur et redresseur de la société Adwane est donné dans l'annexe B : Figure (1).

Schémas électrique du transformateur et redresseur de la société Adwane est donné dans l'annexe B : Figure (2).

Les paramètres du transformateur dodécaphasé de la société Adwane est donné dans l'annexe B : Figure (3).

## **II.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les transformateurs monophasés et triphasés, et nous avons donné un aperçu sur les principaux éléments qui les constituent et leurs rôles ainsi que l'importance de la machine statique triphasée dans les réseaux de distributions électriques et dans les systèmes de redressement pour obtenir du courant continu.

Nous avons présenté les notions préliminaires et nécessaires pour la suite de notre projet sur la structure du redresseur commandé à base d'un système de tensions hexaphasées. Nous avons montré l'utilité du redresseur de tension qui est le convertisseur statique le plus répandue actuellement. Ce dernier est intégré dans de nombreuses applications industrielles, dans les systèmes à élimination d'harmoniques et il constitue la topologie du redresseur de tension à commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

## CHAPITRE III

# SYSTÈMES DE REGULATION

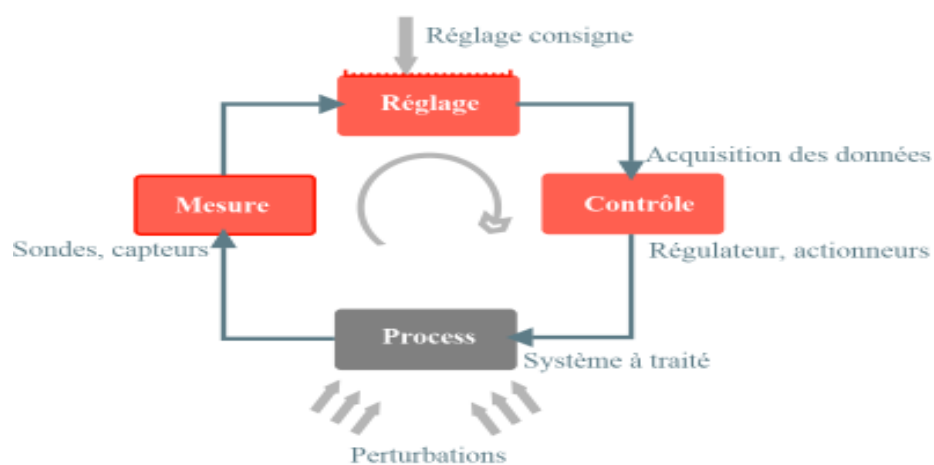
### III.1. Introduction :

La notion de régulation est basée essentiellement sur le principe de rétroaction ; ce sont les variations relatives des variables observées par rapport aux variables de consigne qui provoquent l'évolution des variables de commande. La construction du système de régulation d'un processus nécessite une analyse préalable de celui-ci et une modélisation de son comportement. Dans tous les cas les modélisations sur lesquelles sont basées toutes les synthèses de régulateurs ne sont pas parfaites, celles-ci doivent posséder l'effet d'être le moins sensible aux erreurs de modélisation et assurer le bon fonctionnement du processus même en présence d'erreurs ou de perturbations. [22]

Le terme de régulation est employé lorsqu'on cherche à minimiser des perturbations afin de garder une valeur constante que ce soit une température, une pression, un débit ou autre grandeur physique.

La régulation mesure en permanence par le biais de sondes ou de capteurs le système à régler puis transmet les informations au régulateur celui-ci compare cette mesure à la consigne puis suivant l'algorithme implémenté dans le calculateur, le régulateur va transmettre ses ordres aux actionneurs (vannes, volets, moteurs, etc.), afin de corriger les perturbations. [17]

La figure III.1 montre le schéma de principe d'une boucle de régulation :



**Figure III.1 :** Schéma de Principe d'une boucle de Régulation

## **III.2. La régulation :**

### **III.2.1. Historique :**

Pour commencer un peu d'histoire, tout commence lorsqu'Elmer Ambrose Sperry (1860 – 1930) inventeur et industriel américain, cherche dès 1911 à mettre au point un système permettant aux navires de naviguer de façon plus autonome. Pour concevoir ses gyrocompas (stabilisateurs gyroscopiques) il observe le travail qu'un barreur fait intuitivement pour compenser et anticiper les écarts et les erreurs afin de garder son cap.

Plus tard vers 1922 un mathématicien et ingénieur Nicolas Minorsky (1885-1970) propose une formule mathématique qui constituera la base des applications des contrôleurs PID. La logique PID sera utilisée dans les systèmes de pilotage automatique pour les navires de la marine des USA dès le début des années 1930. [17]

### **III.2.2. Régulation manuelle (commande manuelle) :**

La modification sur la grandeur réglante peut être effectuée par un opérateur observant continuellement la grandeur réglée en modifiant en conséquence la grandeur réglante. Dans ce cas, on est en présence d'une commande manuelle tel est, par exemple le cas dans la conduite d'un bateau ou d'une automobile.

### **III.2.3. Régulation automatique (commande automatique) :**

Dans ce cas, la mesure de la grandeur réglée et la modification de la grandeur réglante s'effectuent automatiquement au moyen d'appareils appelés régulateurs dans lesquels est implantée une loi de commande (algorithme). En régulation automatique, il n'y a donc pas d'intervention d'un opérateur humain.

## **III.3. Types de régulations industrielles :**

Il existe plusieurs types de régulations industrielles telles que :

1. TOR : Tout ou rien (ON-OFF Control)
2. MLI : Modulation de la largeur d'impulsion (PWM) avec PID
3. PID : Continue, Proportionnelle, Intégrateur, Dérivateur
4. FUZZY : Continu PID avec commande par la logique floue
5. MULTI-BOUCLES : Maître esclave, cascade, rapport
6. NUMERIQUE : Modèle de fréquence

### III.3.1. Régulation analogique et numérique :

Les régulateurs et les automates sont des organes parfois complexes, ils offrent la possibilité de surveiller, d'optimiser, de commander, de réguler les installations techniques de climatisation et de chauffage. Ils peuvent traiter les paramètres de température, d'humidité, de pression, de débit d'air, de qualité d'air et autres.

#### III.3.1.1 Régulation analogique :

Un régulateur analogique est conçu à partir du pont de Wheatstone, le signal délivré est proportionnel à l'écart entre la mesure et la consigne, c'est une régulation non communicante. Un courant est appliqué en entrée du pont de Wheatstone, quatre résistances sont raccordées en série parallèle, celles-ci peuvent être toutes variables ou certaines à résistances variables et certaines fixes. Le courant émis en sortie sera modulé en fonction de la valeur ohmique des résistances. Si les quatre résistances ont la même valeur ohmique rien ne se passe. S'il y a déséquilibre car une ou plusieurs résistances varient une tension est générée et elle est utilisée pour commander divers actionneurs. Le signal permet d'actionner après amplification des contacts secs (contact on/off) ou de libérer à l'aide d'un convertisseur un courant de 0 à 10 V (volet mélange, vanne 2 et 3 voies etc...). [22]

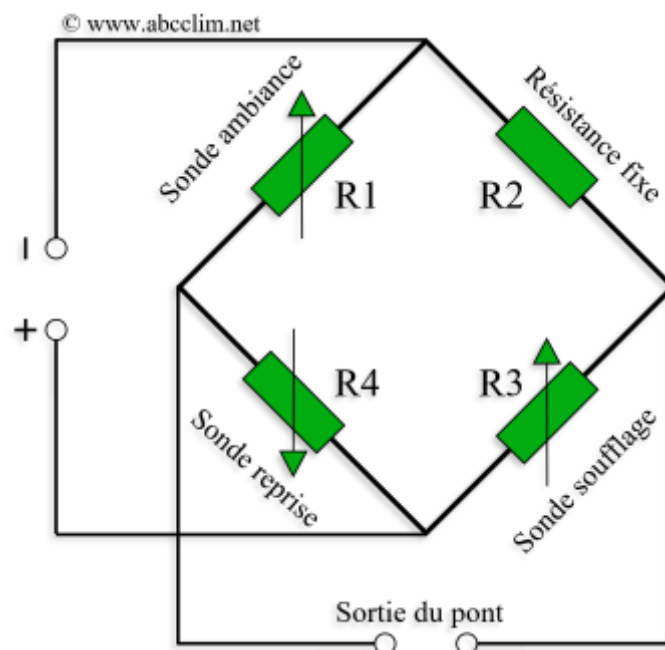


Figure III.2 : Régulateur Analogique

- La régulation analogique permet des actions de types :
  1. Proportionnelles (P)
  2. Proportionnelles et Intégrales (PI)
  3. Proportionnelles Intégrales Dérivées (PID). [22]

### **III.3.1.2 Régulation numérique :**

C'est une régulation communicante par excellence, les données numériques traitées sont comparables à celles des ordinateurs et comportent plusieurs états binaires. Le régulateur est un automate programmable qui cumule plusieurs fonctions, de méthodes de calcul, de logique et d'optimisation ou encore d'algorithmes complexes qui donnent des résultats plus précis que les régulateurs PID analogiques.

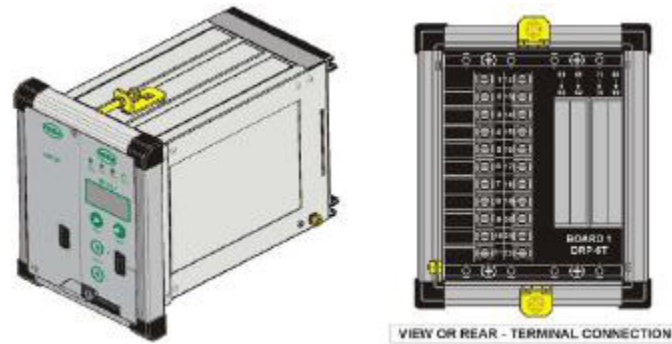
- **Fonctionnement général :**

Un microprocesseur interprète des informations fournies par des entrées analogiques ou tout ou rien (Tor) suivant un programme (P, PI, PID) préenregistré dans la mémoire du processeur ou spécifique introduit à la demande, pour agir sur des actionneurs.

Le programme est sauvegardé en cas d'incident soit dans une mémoire flash ou dans une mémoire physique alimentée par pile, on peut aussi récupérer les paramètres et données via un ordinateur ou une interface contenant la programmation (Smart key). Le dialogue entre les différentes interfaces ou modules est assuré par un "bus", liaison informatique à 2 fils.

- **FRIEM Régulateur Numérique de l'usine Adwan Chemicals (fig.III.3) :**

Il s'agit d'un ensemble d'appareils électroniques FRIEM pour la régulation automatique du courant continu constant DRP-6T. Le régulateur peut être géré localement, soit par le port de communication RS232 ou par les 4 boutons clés et l'écran LCD, soit à distance via le bus de communication RS485 connecté aux bornier arrière. L'écran LCD de 2 lignes x8 caractères affiche les informations disponibles.



**Figure III.3 :** Régulateur numérique de l'usine Adwan(ensemble boîtier et face avant)

### III.4. Le régulateur PID :

#### III.4.1. Les notions de bases d'un régulateur PID :

Appelé aussi correcteur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé), c'est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. [18]

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID, car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse et erreur statique) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre. Nombreux sont les systèmes physiques qui, même en étant complexes, ont un comportement voisin de celui d'un deuxième ordre, dans une certaine échelle de temps. Par conséquent, le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel et est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du procédé, quand on n'est pas trop exigeant pour les performances de la boucle fermée par rapport à celles de la boucle ouverte (par exemple, accélération très importante de la réponse ou augmentation très importante de l'amortissement en boucle fermée). [22]

Si la dynamique dominante du système est supérieure à un deuxième ordre, ou si le système contient un retard important ou plusieurs modes oscillants, le régulateur PID n'est plus adéquat et un régulateur plus complexe (avec plus de paramètres) doit être utilisé, aux dépens de la sensibilité aux variations des paramètres du procédé. La réalisation d'une boucle d'asservissement par PID est un problème très important, car il influence : sur la qualité de la régulation sur un site industriel et le temps de mise en œuvre de la commande. La figure III.4 montre le schéma de principe d'un correcteur PID de type parallèle.

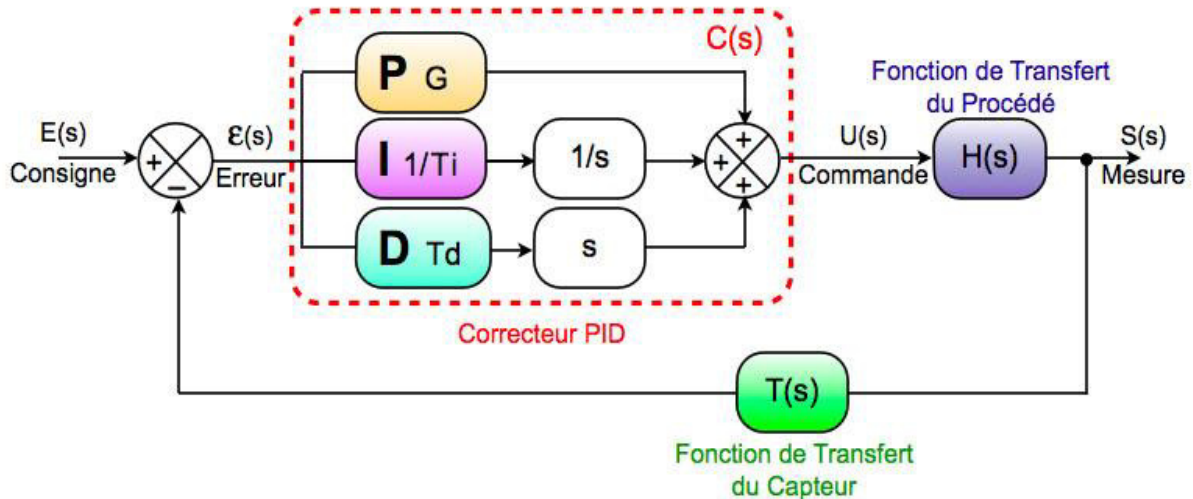


Figure III.4 : Schéma de régulation PID

De plus en plus, les régulateurs PID commercialisés offrent la possibilité d'autoréglage, qui réalise le calcul automatique des paramètres, à la demande de l'utilisateur.

### III.4.2. Généralités sur le Correcteur PID :

C'est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure (l'erreur).

Le correcteur PID agit de trois manières :

- **action proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain  $K_p$  selon l'équation (1).

$$P = K_p \epsilon(t) \quad (1)$$

- **action intégrale** : l'erreur est intégrée et divisée par un gain  $T_i$  selon l'équation (2)

$$I = \frac{1}{T_i} \int_0^t \epsilon(t) dt \quad (2)$$

- **action dérivée** : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain  $T_d$  selon l'équation (3)

$$D = T_d \frac{d\epsilon(t)}{d(t)} \quad (3)$$

### **III.4.3. Les différentes actions du régulateur PID :**

#### **III.4.3.1 L'action proportionnelle (P) :**

L'action proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler, elle permet de compenser les grandes inerties du système. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle) mais, on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante. [17]

#### **III.4.3.2 L'action intégrale (I) :**

L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale ce qui provoque l'augmentation du déphasage ce qui génère l'instabilité en état fermé. L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées t dt. [17]

#### **III.4.3.3 L'action dérivée (D) :**

L'action dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne. Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les à-coups dus à une variation subite de la consigne. L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique. En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile. [17]

La figure III.5 montre l'effet de chacune des actions P, I ou D lors de l'application d'un signal échelon ou consigne à l'entrée d'un système.

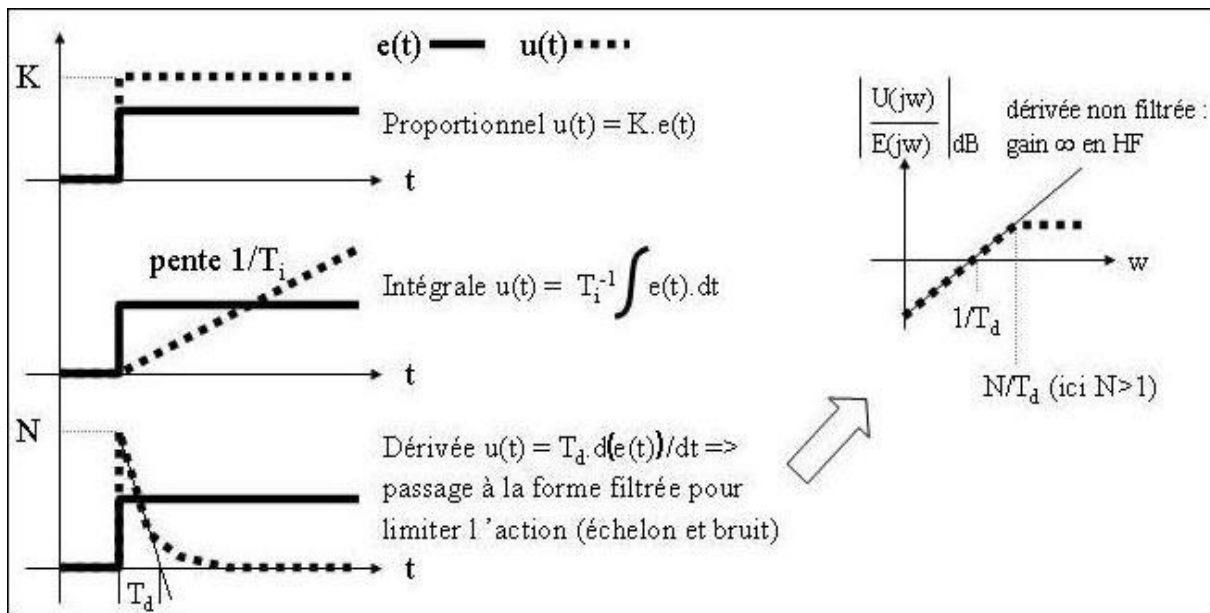


Figure III.5: Actions P, I, D

La figure III.6 montre la réponse d'un système à un échelon de consigne lorsqu'on lui applique une correction PID.

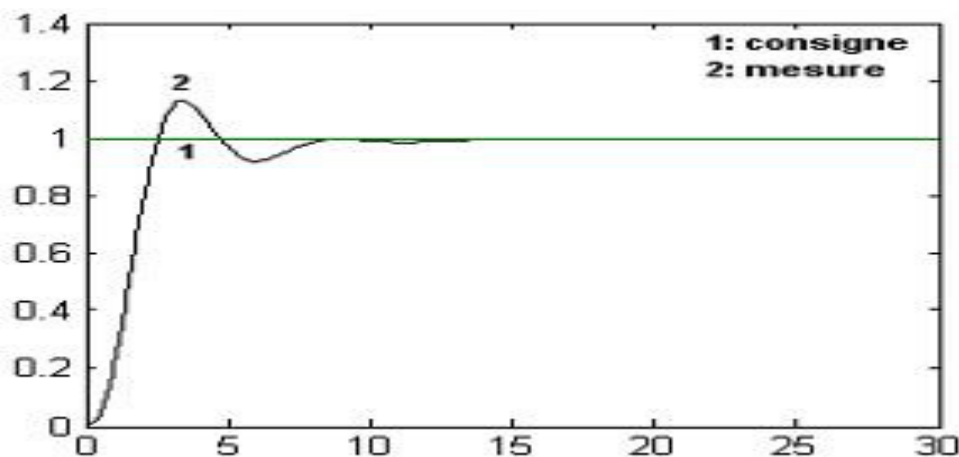


Figure III.6 : Réponse à un échelon de consigne.

#### III.4.4. Réglage des paramètres des actions PID

- Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN) :

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première approche nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité. [22]

Dans le cas des systèmes simples, les paramètres du PID influencent la réponse du système de la manière suivante :

- $K$  : lorsque  $K$  augmente, le temps de montée (rise time) est plus court et l'erreur statique est réduite, mais il provoque un dépassement plus important.
- $K_i$  : lorsque  $K_i$  est présent l'erreur statique est annulée. Quand il augmente, la valeur finale est plus rapidement atteinte pour les systèmes présentant de grandes marges de stabilité. Le temps d'établissement en régime stationnaire s'allonge pour les autres systèmes qui vont davantage osciller. Le réglage de ce paramètre dépend donc du comportement dynamique du système et influe sur son amortissement et son temps de réponse.
- $K_d$  : lorsque  $K_d$  augmente, le temps de montée diminue (la réponse du système ainsi corrigée est plus rapide) et le dépassement diminue ce qui améliore la stabilité. Toutefois il n'influence pas l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système avec des réactions violentes pouvant saturer le signal de commande sortant du correcteur, et dans un deuxième temps il amplifie de manière exagérée des perturbations brèves. [18]

### III.4.5. Qualités attendues d'une régulation :

Les qualités exigées les plus rencontrées industriellement sont la stabilité, la précision et la rapidité de la grandeur à réguler.

#### III.4.5.1. La stabilité :

La qualité essentielle pour un système de régulation est la stabilité. Dans une approche simplifiée, un système est considéré comme stable si, pour une grandeur à maîtriser le signal de sortie se stabilise à une valeur finie. Plus le régime transitoire d'un système soumis à une telle variation est amorti plus il est stable. Le degré de stabilité est alors caractérisé par l'amortissement de ce régime transitoire. [22]

#### III.4.5.2. La précision :

La précision d'un procédé ou système régulé se mesure par l'écart entre la consigne demandée et la mesure en régime permanent de la grandeur réglée, on parle alors de précision statique. Plus l'écart statique est petit, plus le système est précis. Quant à la précision dynamique, elle se définit par d'autres caractéristiques telles que : le premier dépassement. La précision d'un système se résume donc généralement par la qualité des paramètres de celui-ci. [22]

**a. Précision statique :**

Il est naturel d'évaluer la précision d'un système régulé en comparant l'objectif atteint par rapport à celui exigé. La précision d'un système régulé se mesure donc à l'écart entre la consigne demandée et la mesure en régime permanent ; ce qui représente la précision statique. Plus l'écart statique est petit, plus le système est précis. L'évaluation de la précision statique s'effectue en réalisant une variation rapide de consigne en amplitude et en mesurant la variation d'amplitude finalement obtenue de la mesure.

**b. Précision dynamique**

La précision dynamique est caractérisée par le dépassement (D) lors du régime transitoire de la réponse de la grandeur réglée suite à un échelon de consigne ou de perturbation. Cette précision est liée directement au degré de stabilité du procédé ; c'est un critère de performance qui peut être défini par les marges de gain et de phase. Elle est donc à prendre en compte lors des paramétrages des régulateurs. [22]

**III.4.5.3. La rapidité :**

La rapidité d'un système régulé s'évalue par le temps nécessaire à la mesure pour entrer dans une zone  $\pm 5\%$  de sa valeur finale. Le système régulé est d'autant plus rapide que le temps de réponse à 5% est court. [22]

**III.5. La régulation du courant redressé :****III.5.1. Introduction :**

Il existe de nombreuses stratégies de contrôle de l'étage de puissance d'un convertisseur statique à découpage. Nous considérons ici des alimentations à découpage, à forte intégration grâce aux technologies semi-conductrices et avec l'objectif de servir une tension d'alimentation continue, régulée, à un consommateur (une charge). La régulation de la tension de sortie nécessite de prendre une mesure d'une grandeur électrique, de la comparer à une grandeur de référence et d'utiliser l'écart pour piloter le fonctionnement de l'étage de puissance afin de corriger la tension de sortie.

L'approche la plus simple décrite ci-dessus consiste à mesurer la tension de sortie et de comparer cette mesure à une tension de référence ; souvent la tension de référence sera la valeur de la tension à obtenir en sortie ou bien une fraction fixe de celle-ci. La comparaison, si elle est linéaire (analogique), produira une tension d'écart, ou d'erreur. Cette tension d'erreur servira à piloter l'étage de puissance par une opération de modulation. On parle de contrôle en tension (voltage-mode control).

Il est possible également, par le même moyen, de réguler le courant dans la charge, si la mesure de courant produit une tension équivalente (par exemple aux bornes d'un shunt). L'approche dite de contrôle en courant (current-mode control) relève d'une autre technique. À l'intérieur de l'étage de puissance la commutation des transistors produit des impulsions de tension aux bornes d'une inductance. Il en résulte que le courant dans l'inductance varie linéairement par segments.

En régime établi, le courant dans l'inductance croît linéairement pendant une fraction du temps, puis décroît pendant une autre fraction du temps pour revenir à une même valeur initiale. La variation de courant dans l'inductance traduit l'énergie transférée à la charge. Pour une charge donnée, le courant fourni à la charge se traduit par une tension régulée, cette tension (donc la tension de sortie du convertisseur) peut s'opérer en contrôlant le courant dans l'inductance.

Si la tension en sortie baisse, il conviendra d'augmenter le courant dans l'inductance et vice-versa. Cette opération peut se faire à fréquence fixe de découpage, mais n'apporte pas d'intérêt particulier par rapport à un pilotage en tension. Il sera plus loin expliqué que le fonctionnement à fréquence variable offre un degré de liberté plus intéressant.

Dans ce cas la comparaison entre l'image du courant dans l'inductance et une valeur de référence se fera de manière non linéaire. Le caractère « discret » du contrôle en courant le différencie immédiatement du contrôle en tension.

Il est possible de combiner les approches pour adjoindre des performances supplémentaires à la régulation en boucle fermée. Par exemple une première boucle fermée pourra contrôler le courant dans l'inductance (caractère discret), et une seconde boucle de pilotage en tension produira la référence de courant à la première boucle (caractère linéaire).

Quelle que soit la stratégie de contrôle en boucle fermée, il faut retenir l'impact de son choix sur les performances du convertisseur de tension. La performance dynamique de la régulation dictera ses performances au convertisseur pour corriger rapidement des perturbations dues à la variation de la charge, de la tension d'entrée ou des conditions externes (température, vieillissement, pollution électromagnétique, etc.). Les performances statiques de la boucle de régulation définiront la précision sur la tension de sortie. Celle-ci est toujours entachée d'une ondulation du fait même du caractère du découpage. L'objectif est d'obtenir une atténuation suffisante de cette ondulation de tension. Le filtrage interne à l'étage de puissance y contribue mais la boucle de régulation peut y contribuer aussi.

Enfin, la boucle de régulation consomme une certaine énergie électrique pour assurer sa fonction, puisqu'un circuit électronique se cache derrière son implémentation. Cette consommation énergétique est à peu près constante mais se distribue dans une large gamme en fonction de la stratégie choisie. Quand la puissance prélevée à la sortie du convertisseur baisse, le rendement énergétique du convertisseur baisse. Sachant que le rendement énergétique d'un régulateur linéaire ne dépasse pas 50 %, il convient que celui d'un convertisseur à découpage ne tombe pas sous cette valeur critique de 50 %. Il peut être intéressant de changer de stratégie en fonction de la puissance de sortie du convertisseur. Dans le cas du contrôle en tension, c'est la technique de modulation de la tension d'erreur pour piloter l'étage de puissance qui est adaptée. [16]

### III.5.2. La régulation de température du transformateur :

L'entrée de l'unité de compensation de coefficient de température positive est connectée à  $\Delta V_{be}$ . Le circuit de conversion courant-tension est équipé d'une résistance ( $R_0$ ) et d'une résistance réglable ( $R_1$ ) qui sont connectées en série, et la valeur de la résistance réglable ( $R_1$ ) est ajustée pour corriger le coefficient de température  $(R_1 + R_0)/R_2$ . [16]



Figure III.7 : Régulateur numérique de température

### III.5.3. Refroidissement du transformateur :

Le refroidissement du transformateur triphasé à double secondaire qui alimente le redresseur hexasphasé se fait grâce à un circuit de pompage d'eau dé-ionisée, la pompe étant entraînée par un moteur asynchrone triphasé. Le moteur sera déclenché lorsque la température au niveau du transformateur dépasse un seuil de 35°C.

**III.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement quelques définitions des systèmes de régulation ainsi que les régulateurs standards (PID). Le correcteur qui est l'élément principal d'un système de régulation doit respecter au maximum les contraintes imposées en termes de dépassement, temps de réponse et en précision statique sous l'effet d'un changement de consigne ou de présence de perturbation pour atteindre l'objectif fixé. La synthèse paramétrique du correcteur PID utilise des méthodes précises qui permettent de déterminer les coefficients du correcteur. [22]

# **CHAPITRE IV**

**SIMULATIONS, RESULTATS**

**ET INTERPRETATIONS**

## IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre IV nous avons procédé à la modélisation et la simulation des différents étages qui constituent le système électrique de commande de l'électrolyseur industriel à l'aide des logiciels Simulink, simpower et simscape de Matlab. Les résultats de simulation et leur interprétation nous permettront de faire une approche avec le fonctionnement réel de ces étages pour essayer de détecter certains défauts et de pouvoir apporter les améliorations nécessaires. Les étages concernés sont les suivantes : le réseau triphasé d'alimentation moyenne tension, le transformateur triphasé moyenne-basse tension à double secondaire, le redresseur à pont tous thyristors dodécaphasé et les systèmes de régulation en courant et en température. Les paramètres électriques imposés aux différents circuits sont ceux des circuits et montage réels existants au sein de l'usine Adwan Chémicals. Une interprétation des résultats de simulation ainsi que des commentaires sont donnés à la suite de la simulation de chaque étage. L'objectif visé à travers cette étude est de comprendre le comportement de chaque circuit dans les conditions de fonctionnement industriel et de pouvoir proposer les corrections aux différents défauts et anomalies remarqués pendant le fonctionnement réel du processus.

## IV.2. Simulation de chaque étage :

### IV.2.1. Réseau triphasé étage de l'alimentation :

(1er étage) : La figure IV.1 représente le schéma de simulation d'une source triphasée moyenne tension réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink /Simpower avec lequel nous avons visualisé les caractéristiques des tensions et courants.

Tension composée entre phase  $U = 30000 \text{ V}$

Tension simple :  $V_s = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{30000}{\sqrt{3}} = 17320.5 \text{ V}$

Tension efficace :  $V_{\text{eff}} = V_s \times \sqrt{2} = 24495 \text{ V}$

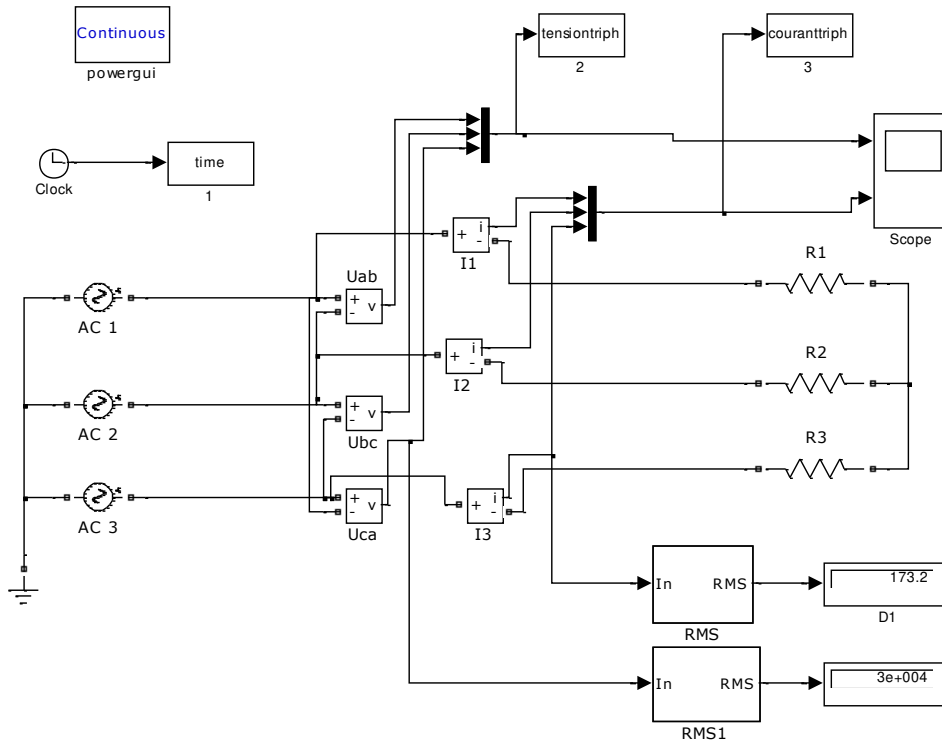


Figure IV.1: Réseau triphasé pour une charge résistive équilibrée.

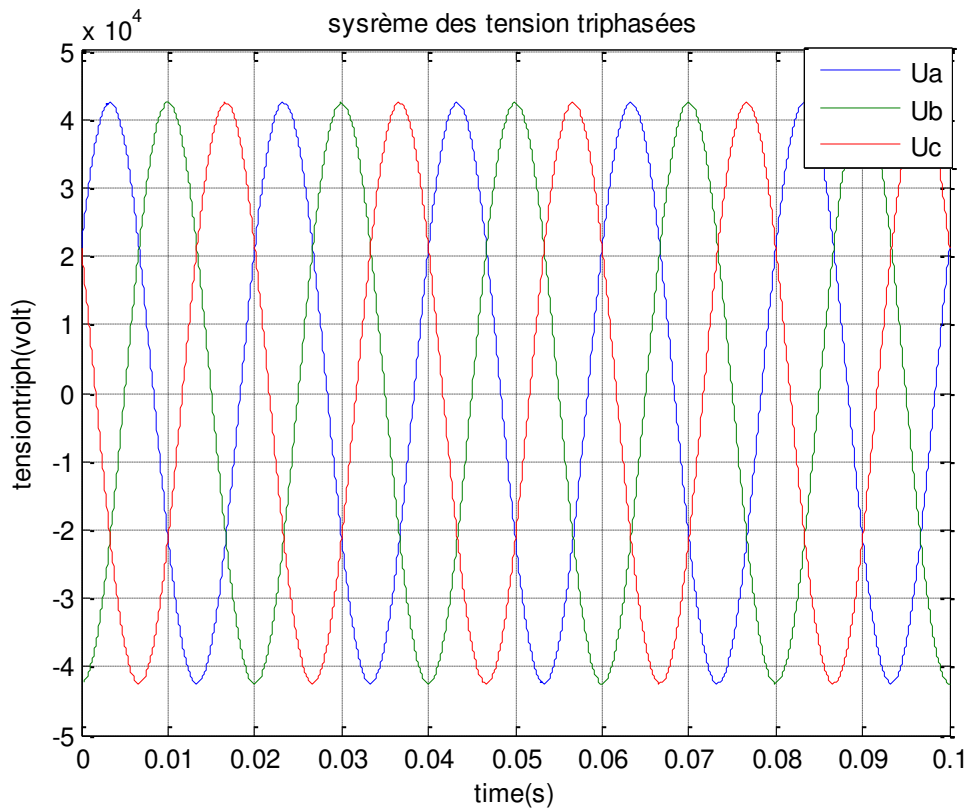
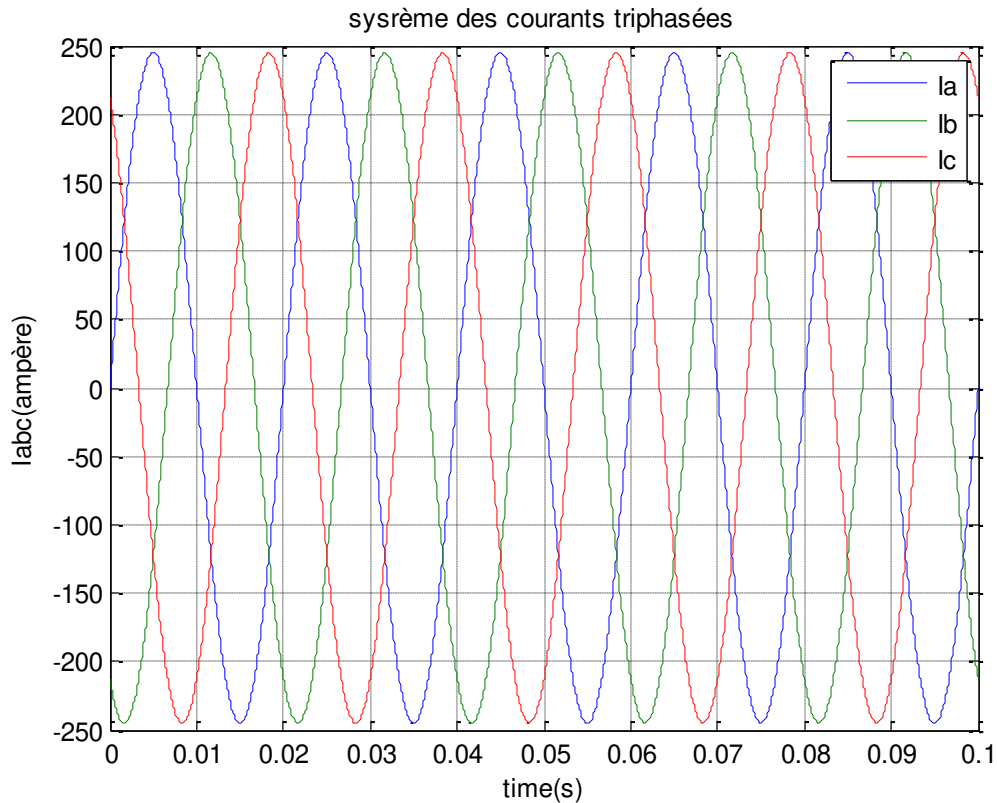


Figure IV.2: Les tensions composées du réseau.



**Figure IV.3:** Les courants de ligne.

▪ **Interprétation :**

Les figures IV.2 et IV.3 donnent respectivement les courbes de variations des courants et de la tension composée en fonction du temps.

La tension efficace entre phase donné par l'équation ci-dessous

$$U_{eff} = \frac{42430}{\sqrt{2}} = 30 \text{ KV}$$

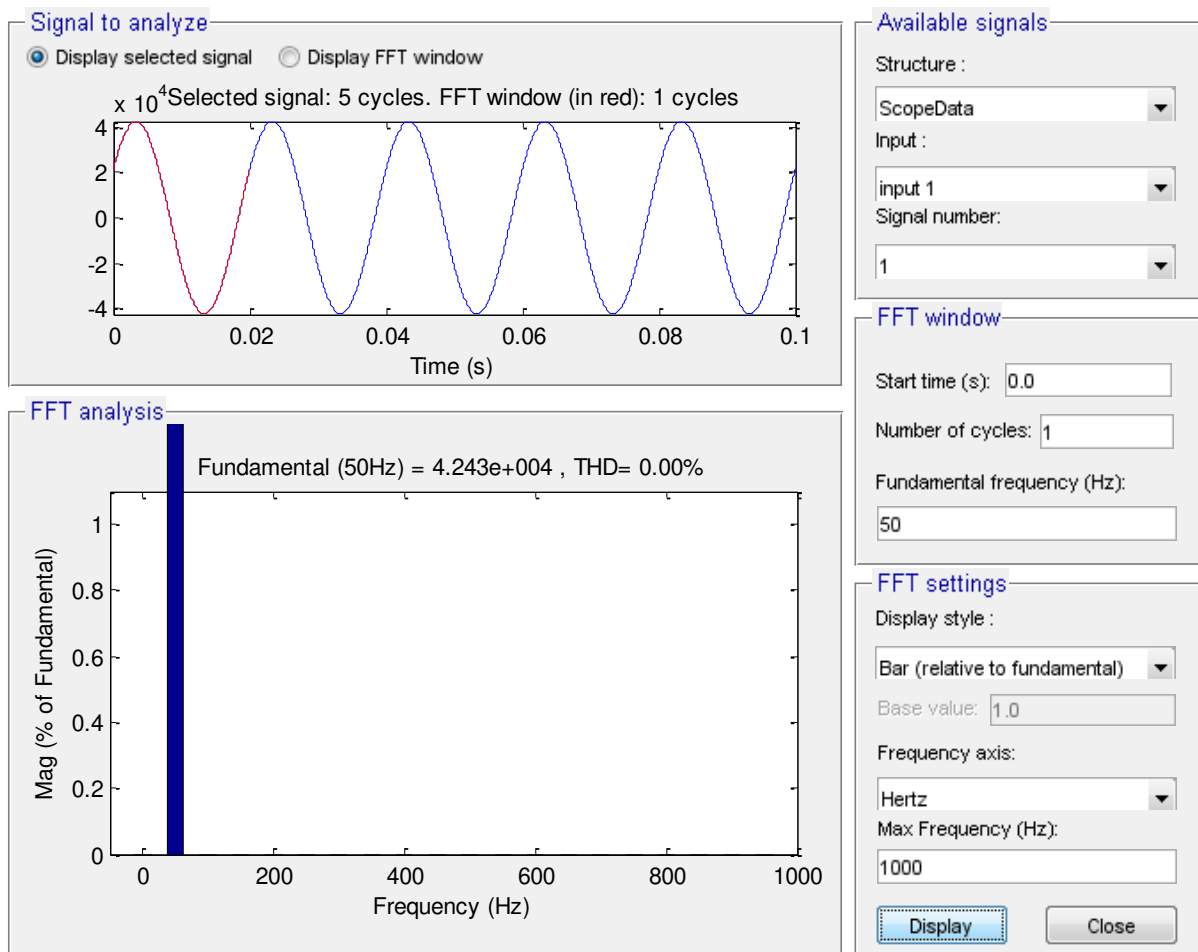
D'après la figure IV.3 le courant triphasé de régime sinusoïdale et la valeur crête à crête est égale 244.95A avec :

$$V = R \times I$$

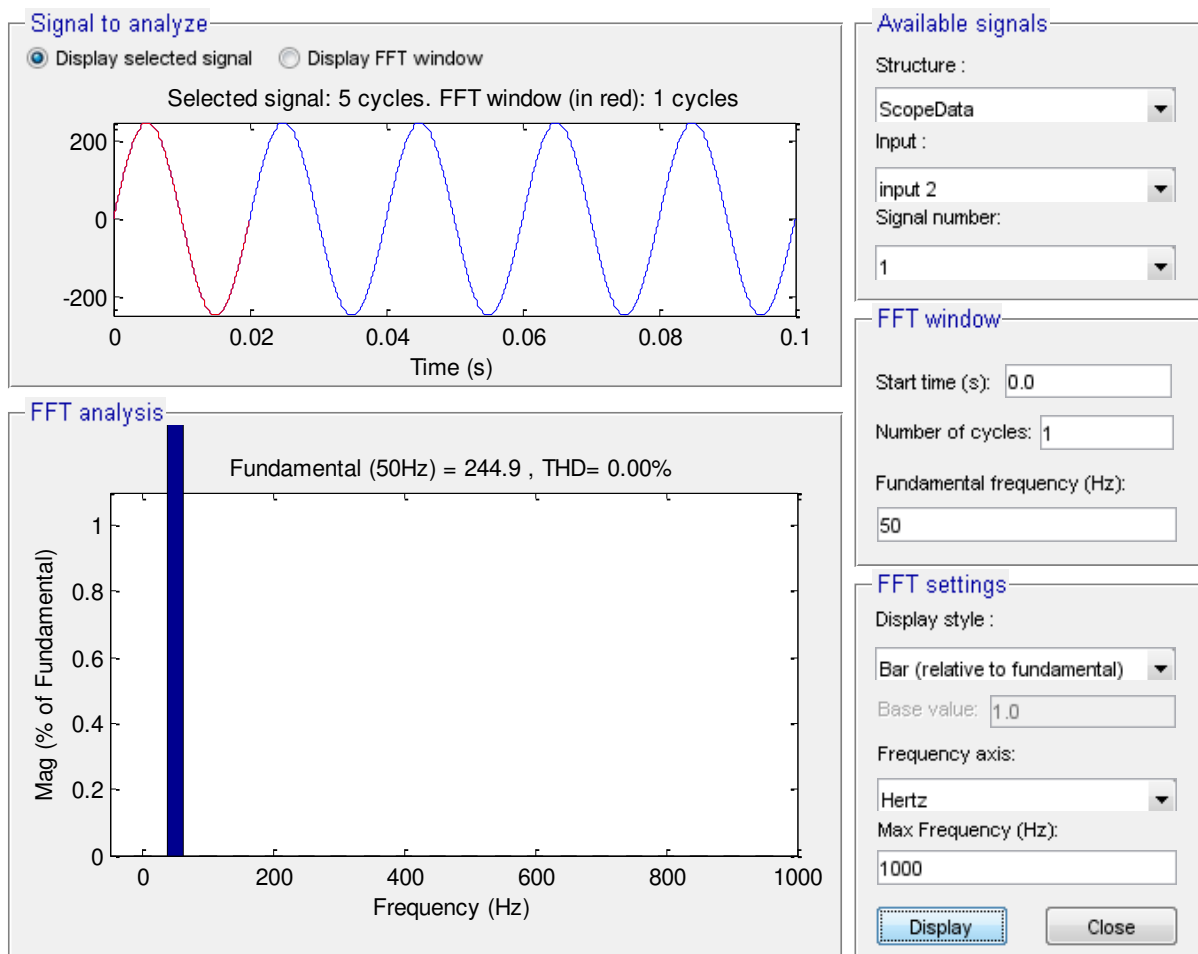
Pour une charge de  $R = 100 \Omega$

$$I = \frac{V_{max}}{R} = \frac{24495}{100} = 244.95 \text{ A}$$

Notre analyse harmonique FFT est faite sur la base d'une charge résistive équilibrée.



**Figure IV.4 :** Analyse harmonique FFT tension triphasée équilibrée charge résistive



**Figure IV.5 :** Analyse harmonique courant triphasé équilibré (charge résistive)

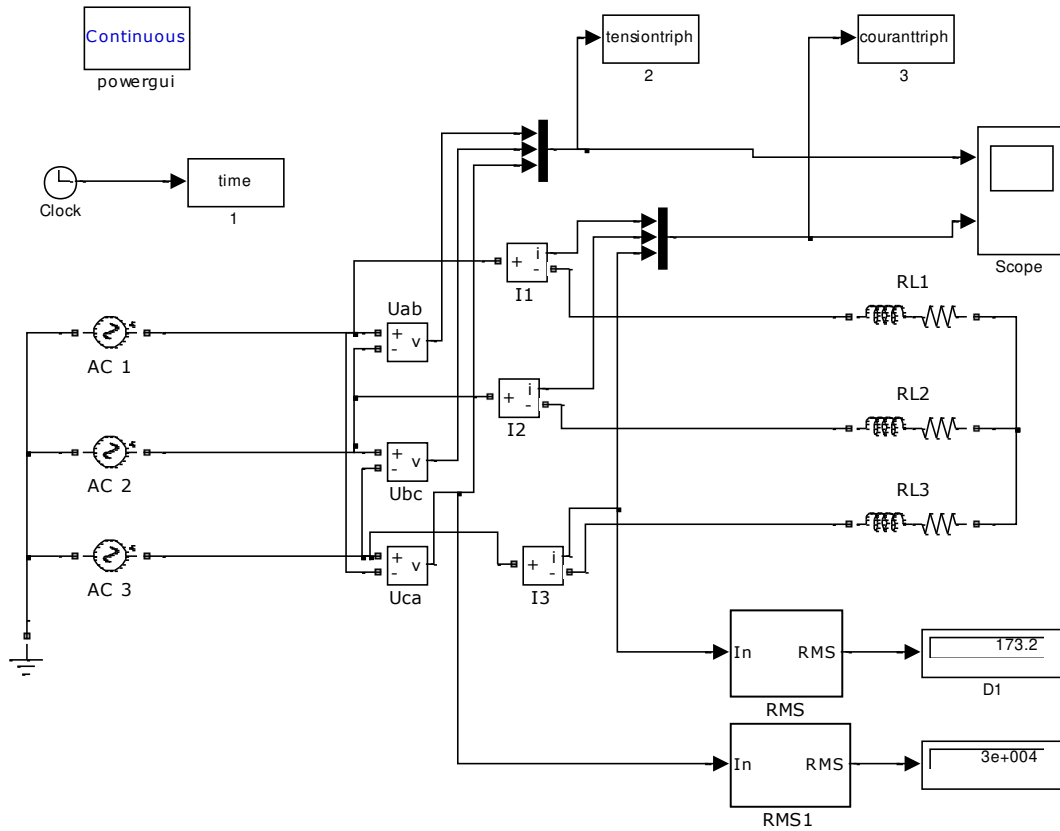


Figure IV.6 : Réseau triphasé pour une charge RL

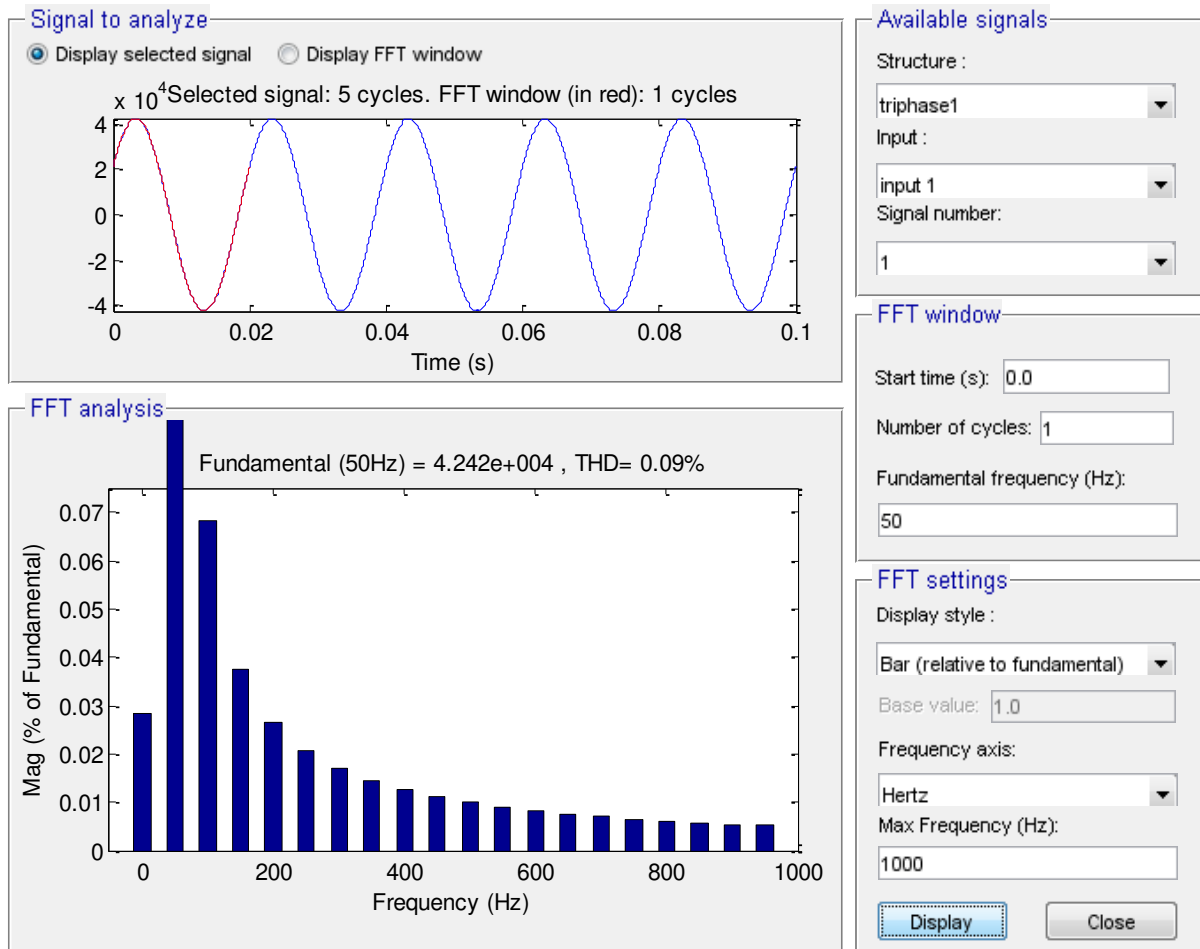


Figure IV.7 : analyse harmonique FFT de la tension.

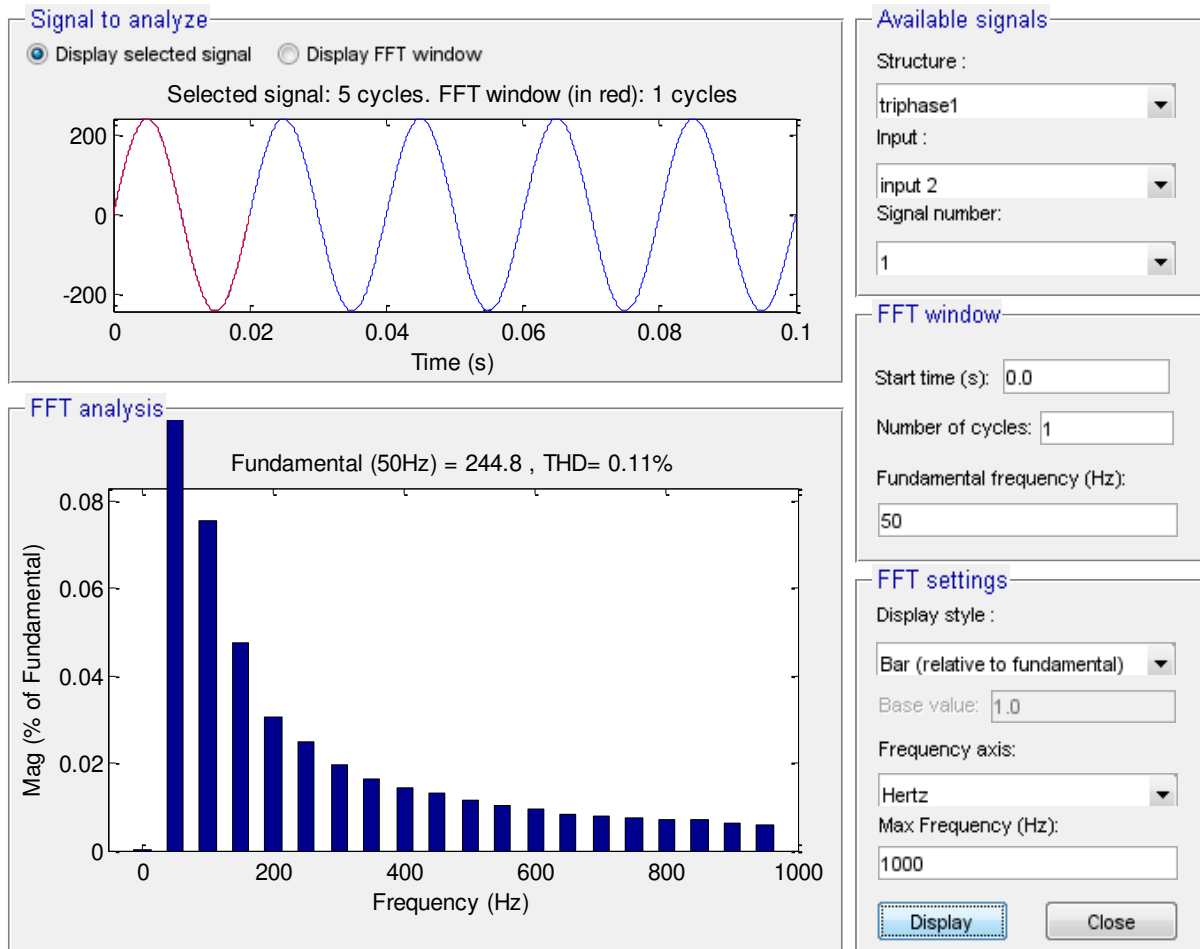
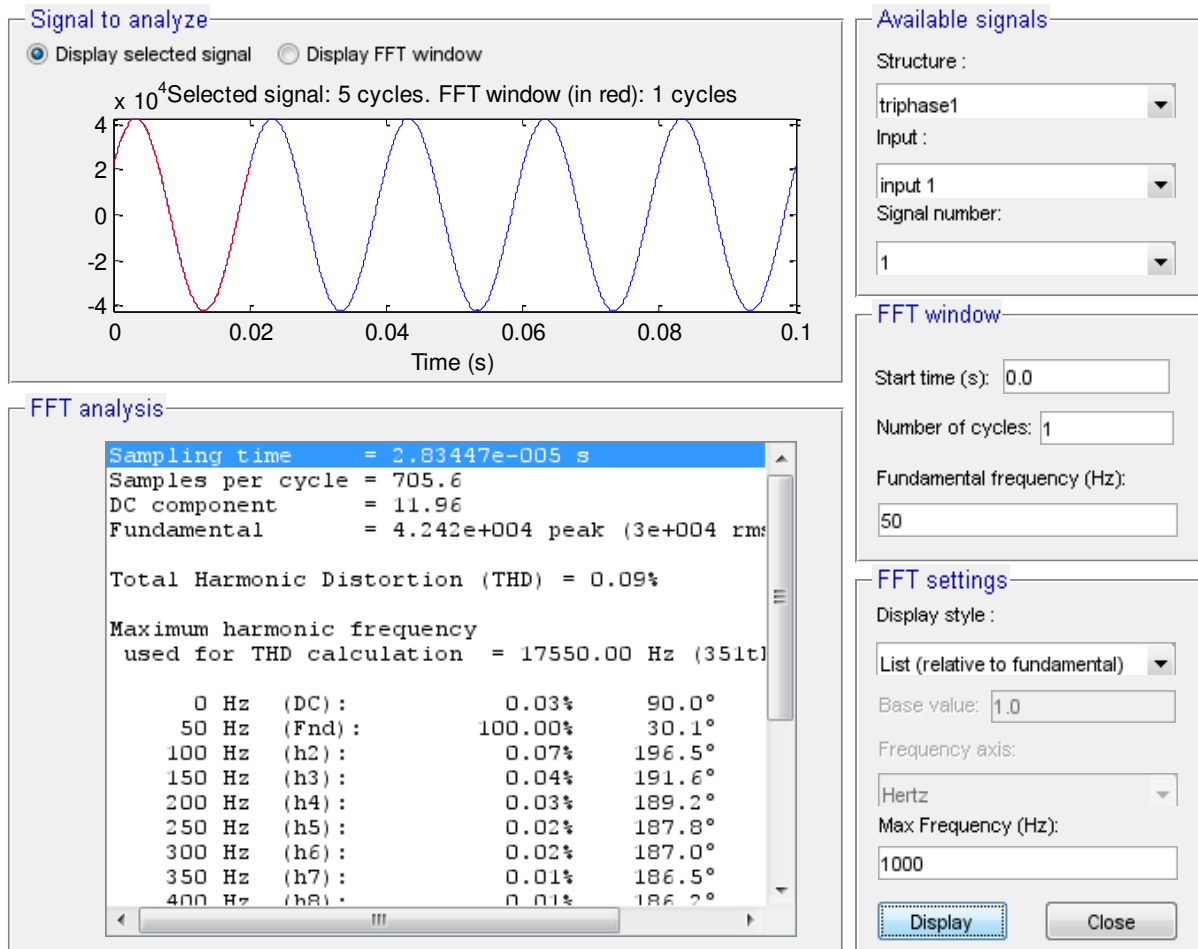


Figure IV.8 : Analyse harmonique du courant



**Figure IV.9 :** La liste des valeurs THD (%) en fonction des fréquences.

### Interprétation :

En plus de la fondamentale, nous constatons la présence de plusieurs harmoniques d'ordre supérieurs pour une charge RL équilibrée avec leurs pourcentages d'après la figure IV.9, la valeur de la composante continue est de l'ordre de 0.03%

Nous essayerons d'éliminer la composante continue et l'harmonique d'ordre (2) par application d'un filtrage par batterie de condensateur ou par circuit (RL) ou par circuit (RLC).

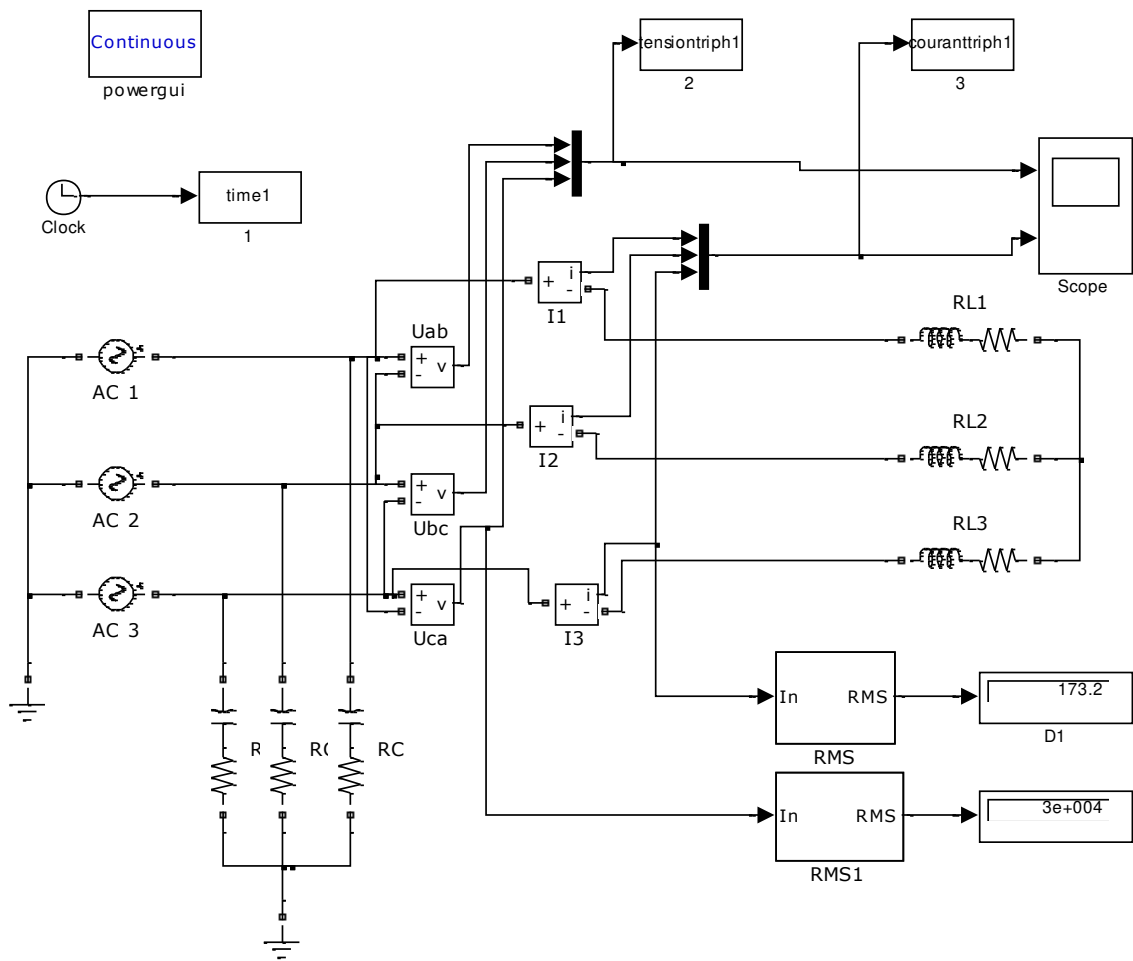


Figure IV.10 : Schémade simulation de reseau avec l'application d'un filtre (RC)

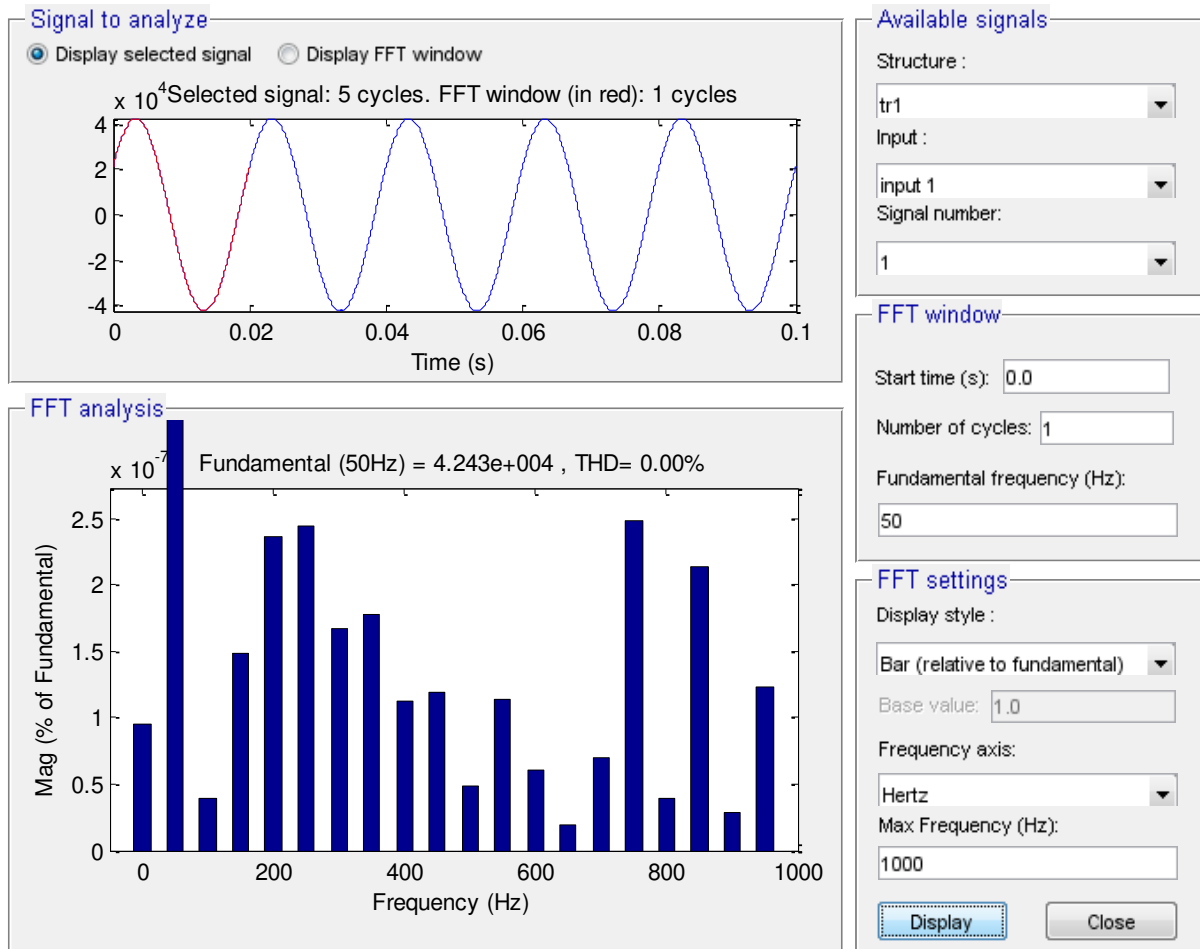


Figure IV.11 : Analyse harmonique de la tension triphasé charge RL

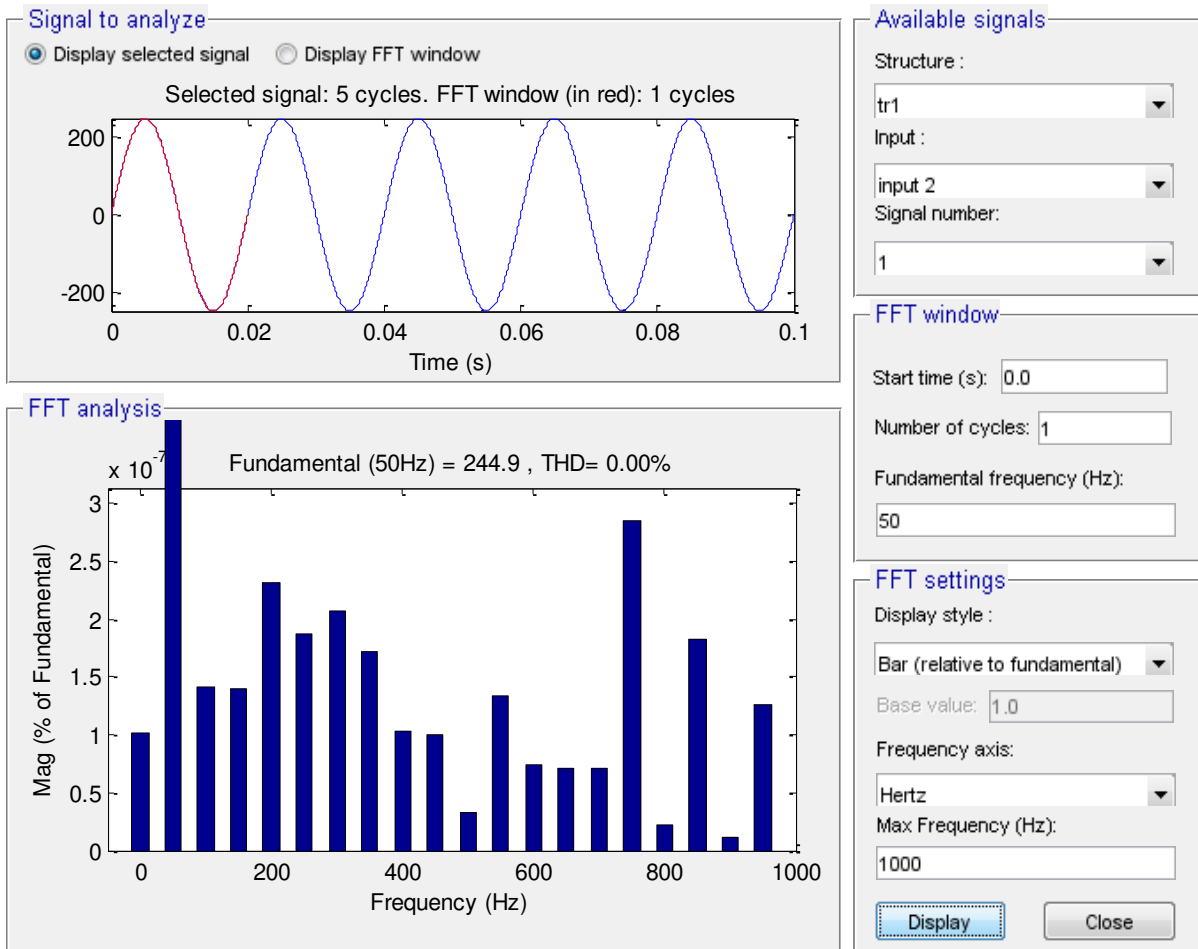


Figure IV.12 : Harmonique du courant.analyse

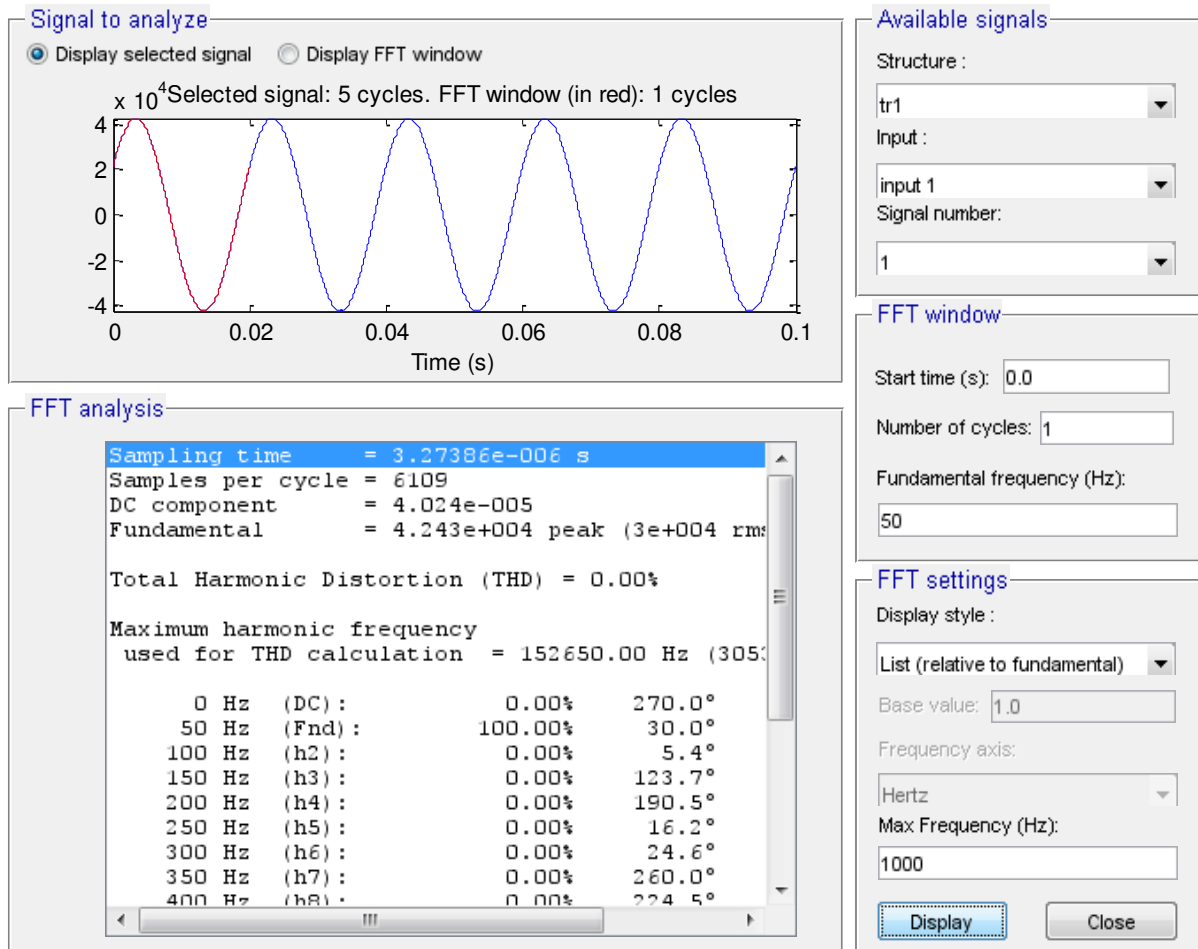


Figure IV. 13 : liste des harmoniques THD en %

**Interprétation :**

La batterie de condensateur que nous l'avons introduite dans le réseau permet d'éliminer les harmoniques proches de la fondamentale et la composante continue. La batterie de condensateur permet de compenser une partie de l'énergie réactive consommée par la charge RL, car cette batterie apporte de l'énergie réactive, ce qui permet d'améliorer le facteur de puissance. Les composantes du circuit RLC, RC, L et la charge R peuvent constituer le filtre de notre système réseau. D'après les figures IV.11 et 12.

- **Commentaire :**

La représentation des perturbations provoquées par la charge ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique. Pour obtenir une source de réseau triphasé équilibré il faut mettre des filtres passe bas pour améliorer le facteur de puissance.

### IV.2.2. Transformateur triphasé en charge alimenté par un réseau triphasé ( 2ème étage):

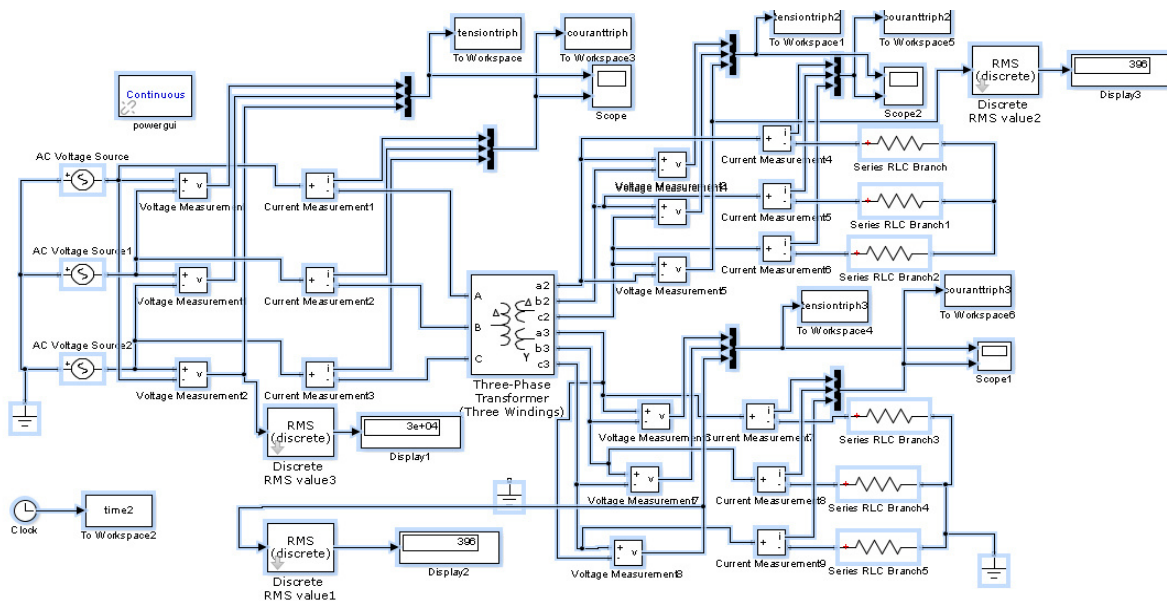
Pour visualiser les caractéristiques (I-V) dans la figure IV.13 montre la simulation du transformateur triphasé avec couplage du primaire(D) et à deux secondaires différents couplages triangle (D) et étoile (Y) et alimenté par une source triphasée équilibré, La simulation a été réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink.

Pour une charge :  $R = 100 \Omega$ .

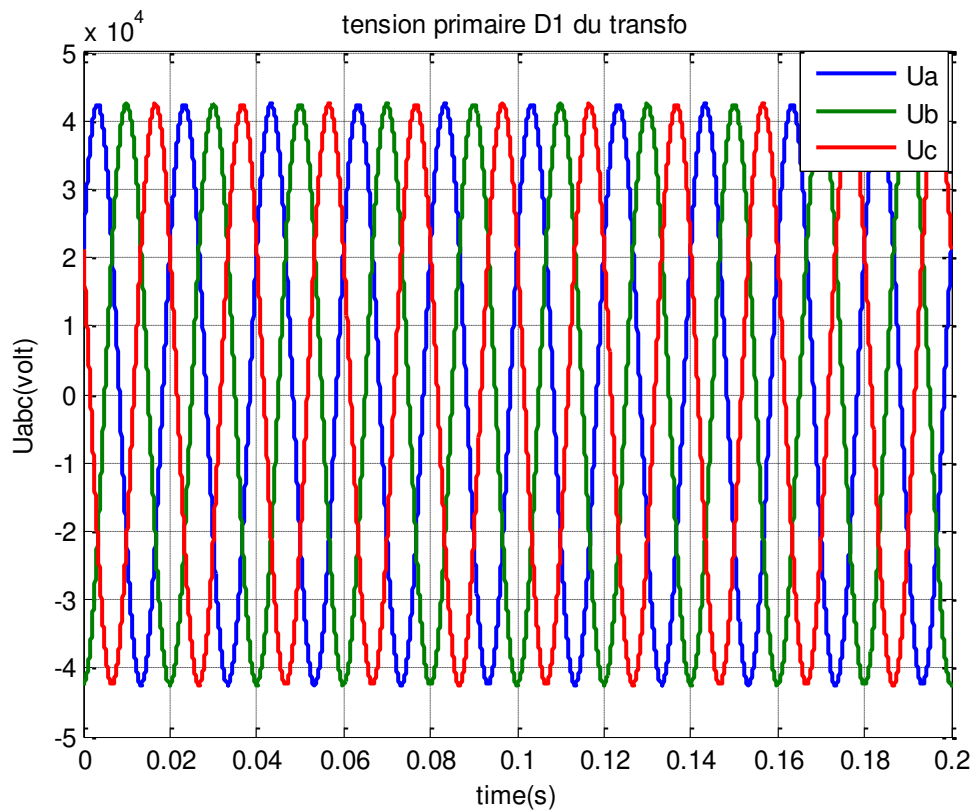
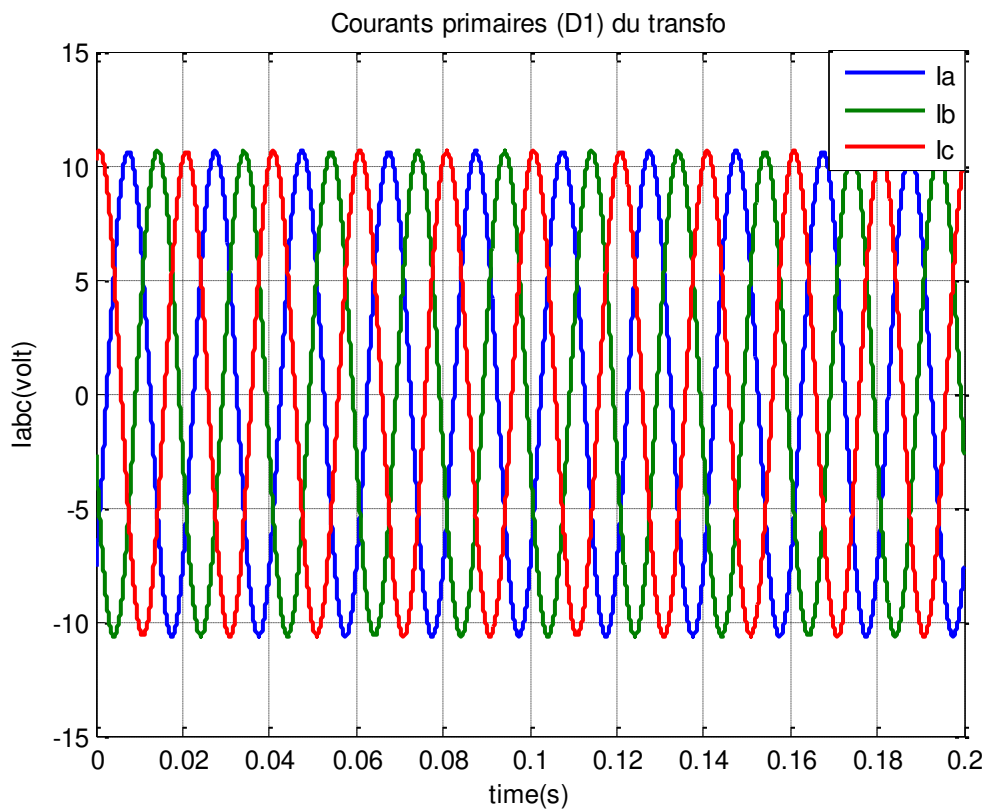
Tension composée  $U = 30000 \text{ V}$

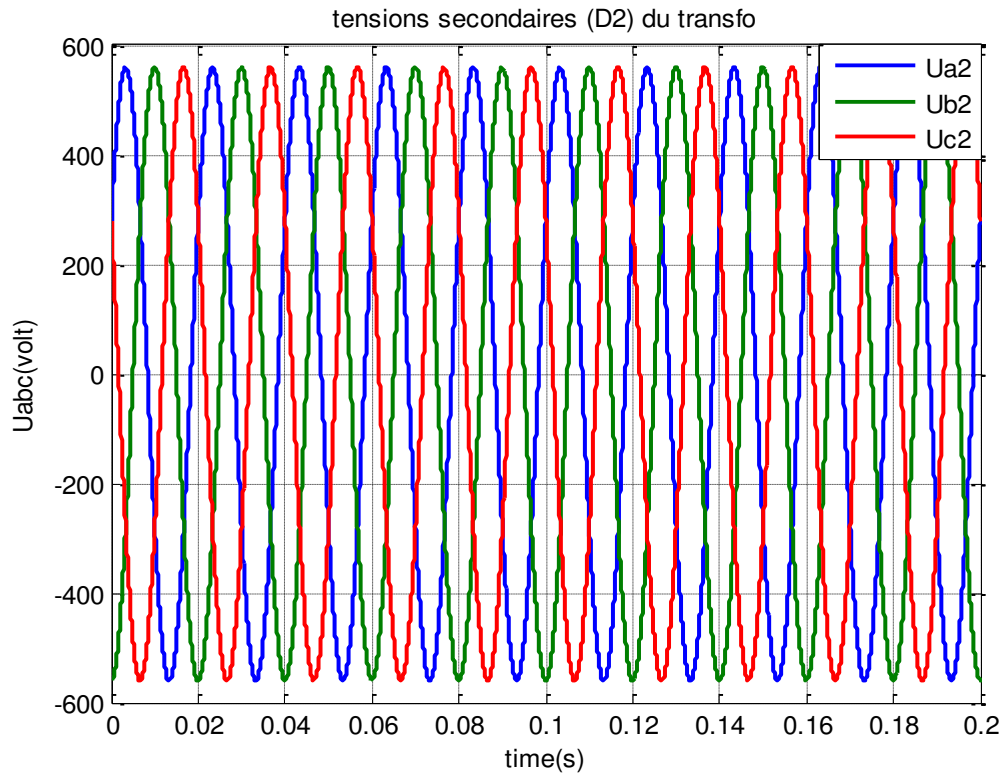
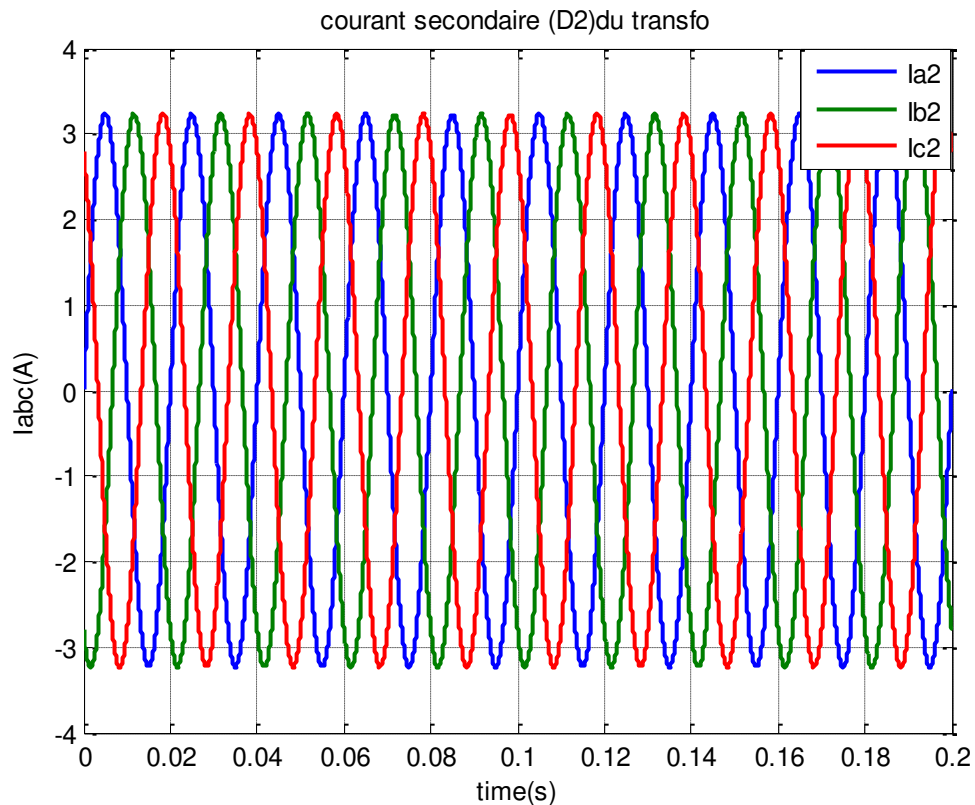
$$\text{Tension simple } V = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{30000}{\sqrt{3}} = 17320.5 \text{ V}$$

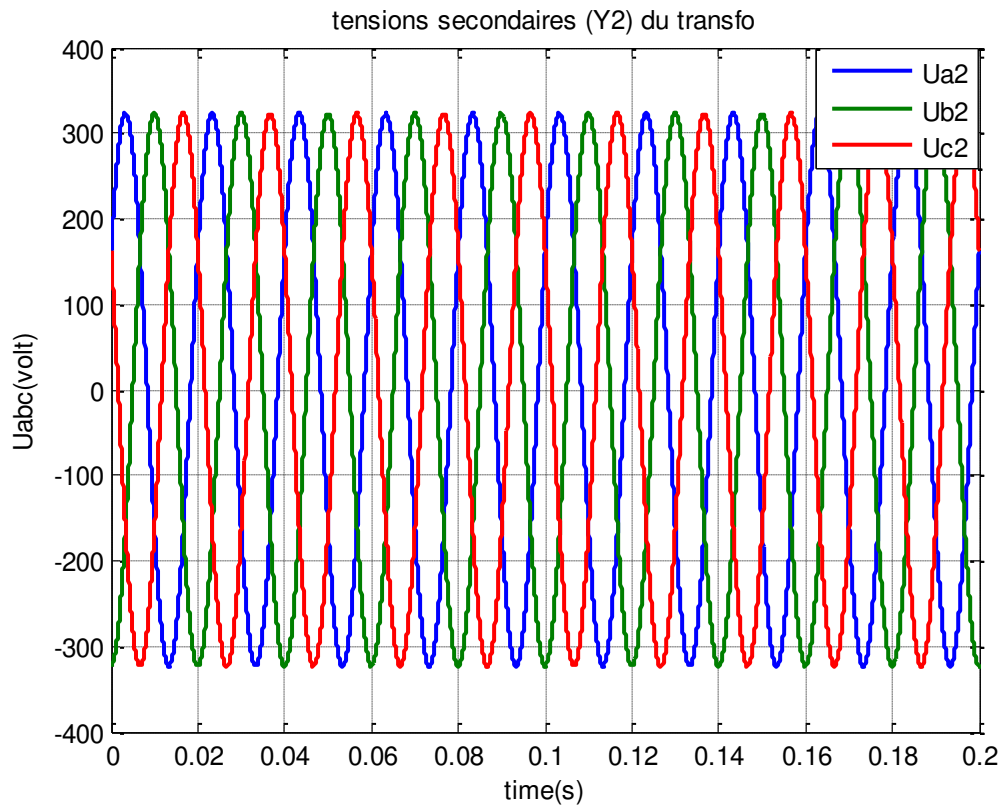
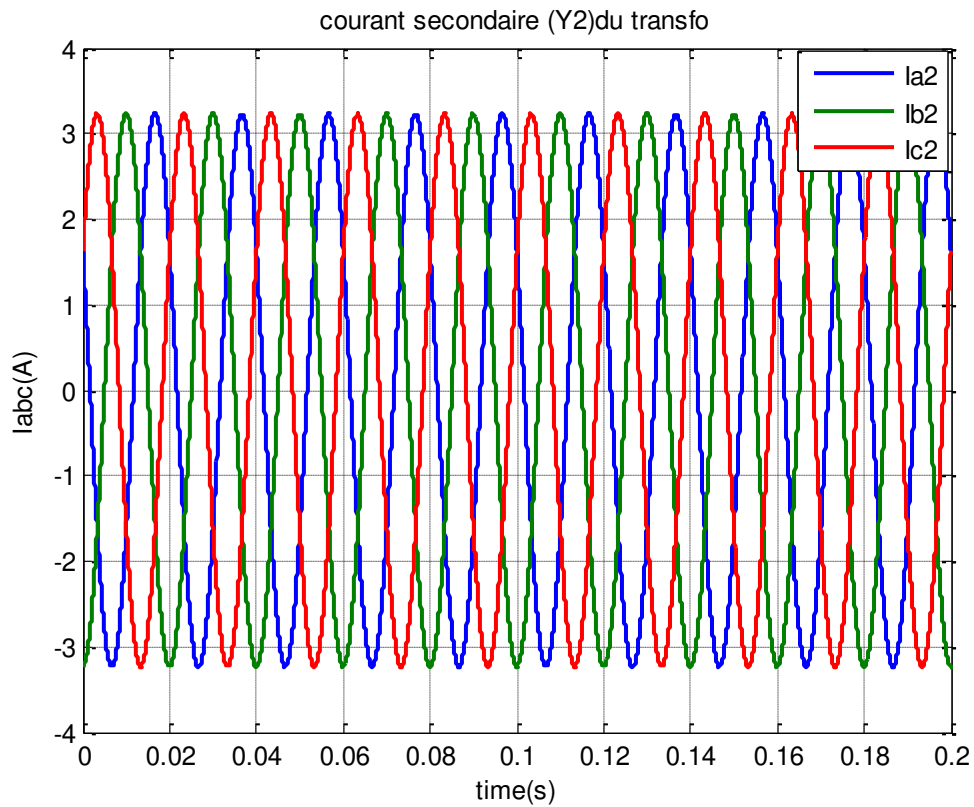
$$\text{Tension efficace : } V_{\text{eff}} = V \times \sqrt{2} = 24495 \text{ v}$$



**Figure IV.14:** Simulation du transformateur triphasé alimenté par un réseau triphasé de moyenne tension.

**1- Graphe de la tension et courant de primaire (D) de transfo :****Figure IV.15 :** les tensions triphasées du primaire(D) du transformateur**Figure IV.16 :** courants triphasés du primaire (D) du transformateur

**2- Graphe de la tension et courant de secondaire1 (D) de transfo :****Figure IV.17:** tensions triphasées du secondaire (D) du transformateur**Figure IV.18:** courants triphasés du secondaire (D) du transformateur

**3- Graphe de la tension et courant de secondaire2 (Y) de transfo :****Figure IV.19:** tensions triphasés du secondaire (Y) du transformateur.**Figure IV.20:** courants triphasés du secondaire (Y) du transformateur.

- **Interprétation :**

D'après la figure IV.13 qui représente la simulation du transformateur triphasé, alimenté par un réseau triphasé moyenne tension avec charge résistive ( $R=100\Omega$ ), nous avons constaté que le transformateur abaissé la tension de 30kV du primaire à 396 V dans le secondaire voir les figures IV.14 (primaire) et IV.16 (secondaire D) et 18 (secondaire Y), et le courant va augmenter de 194.5A dans le primaire, figure IV.15 vers 7634 A dans le deux secondaires voir figures IV.17 et 19.

L'objectif visé à travers cette étude est de comprendre le fonctionnement réel du transformateur.

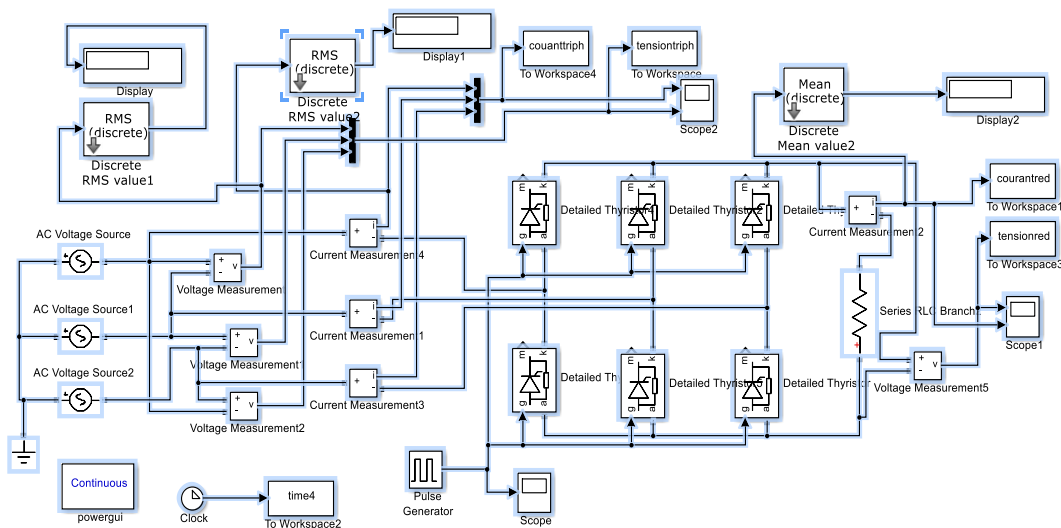
- **Commentaire :**

On a choisi le transformateur triphasé à double secondaire pour abaisser la tension et augmenter le courant et pour alimenter la charge.

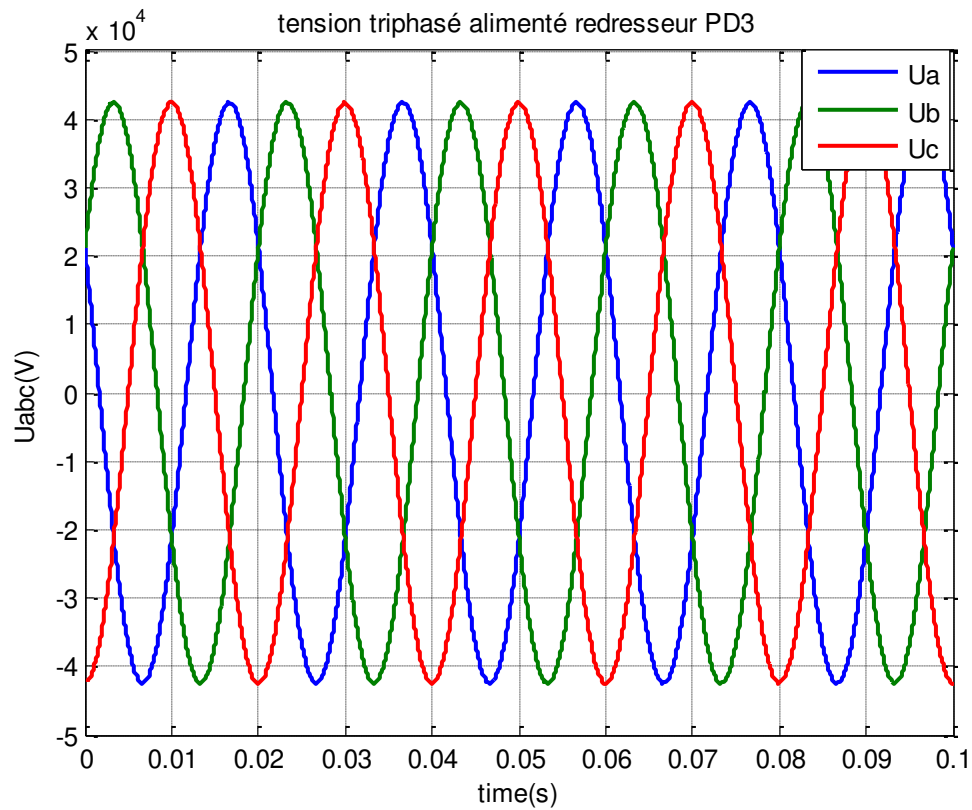
### IV.2.3. Schéma de redresseur triphasé commandé et alimenté par un réseau triphasé (3ème étage) :

Figure IV.20 qui représente la simulation. Elle a pour objectif l'étude de redresseur triphasé PD3 commandé alimenté par une source triphasée équilibrée et la charge purement résistive.

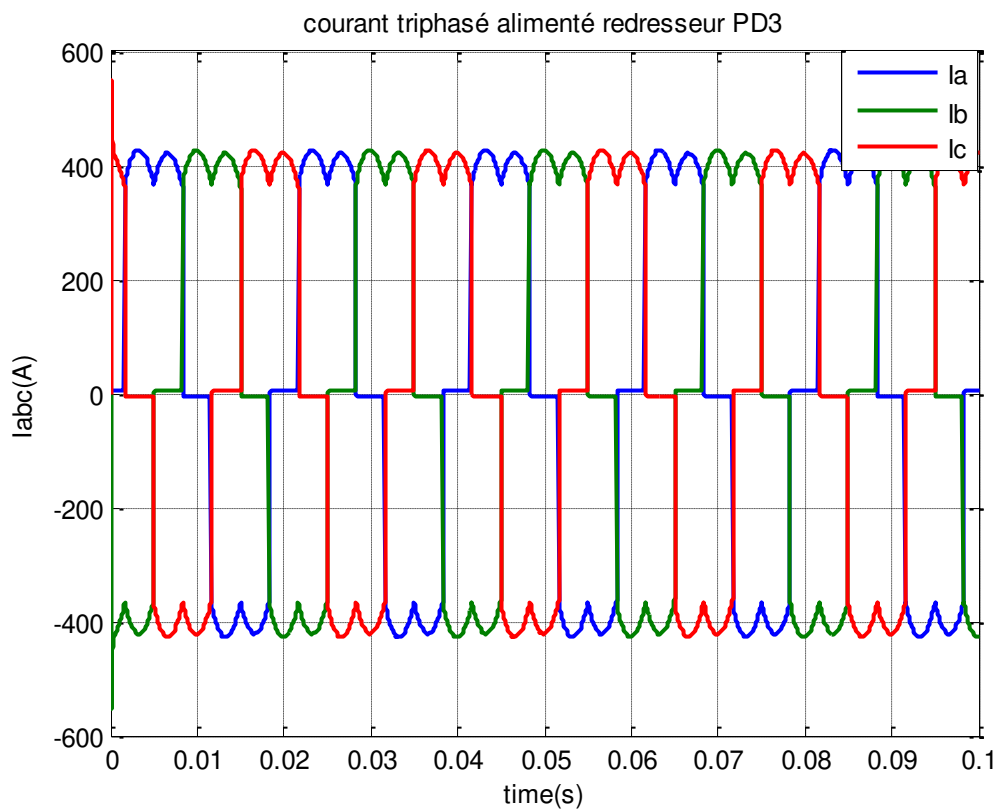
Pour le redressement du courant alternatif vers le courant redressé continu DC à partir de la variation de l'angle d'amorçage alpha (gâchette du thyristor).



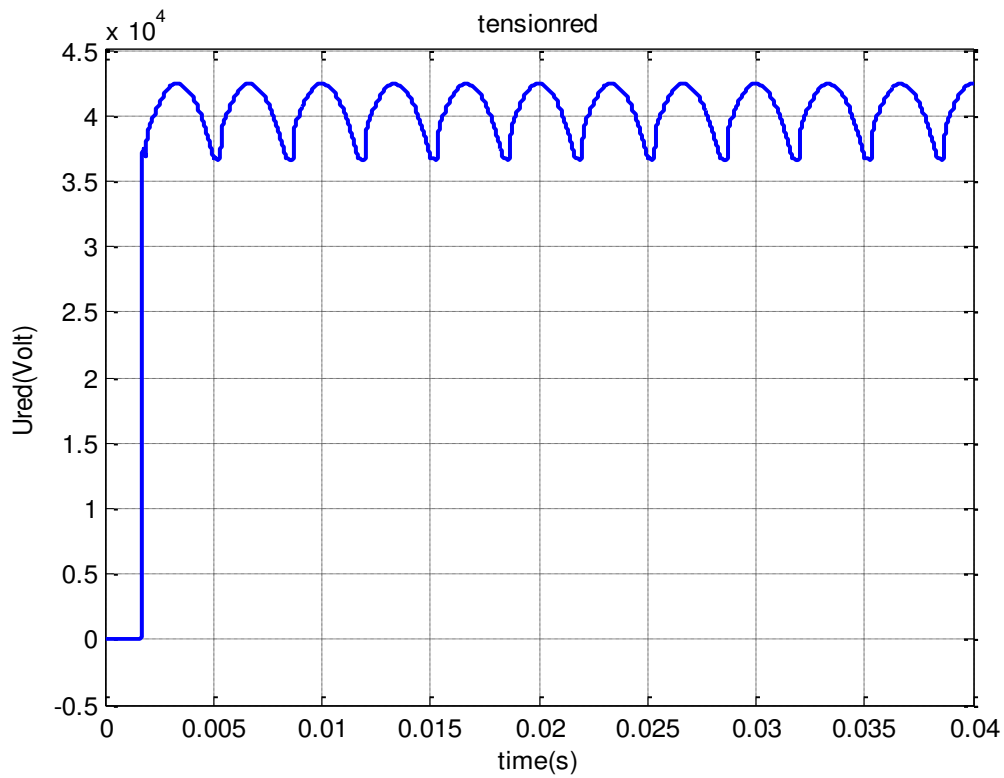
**Figure IV.21:** Simulation de redresseur PD3 Commandé alimenté par une source triphasée



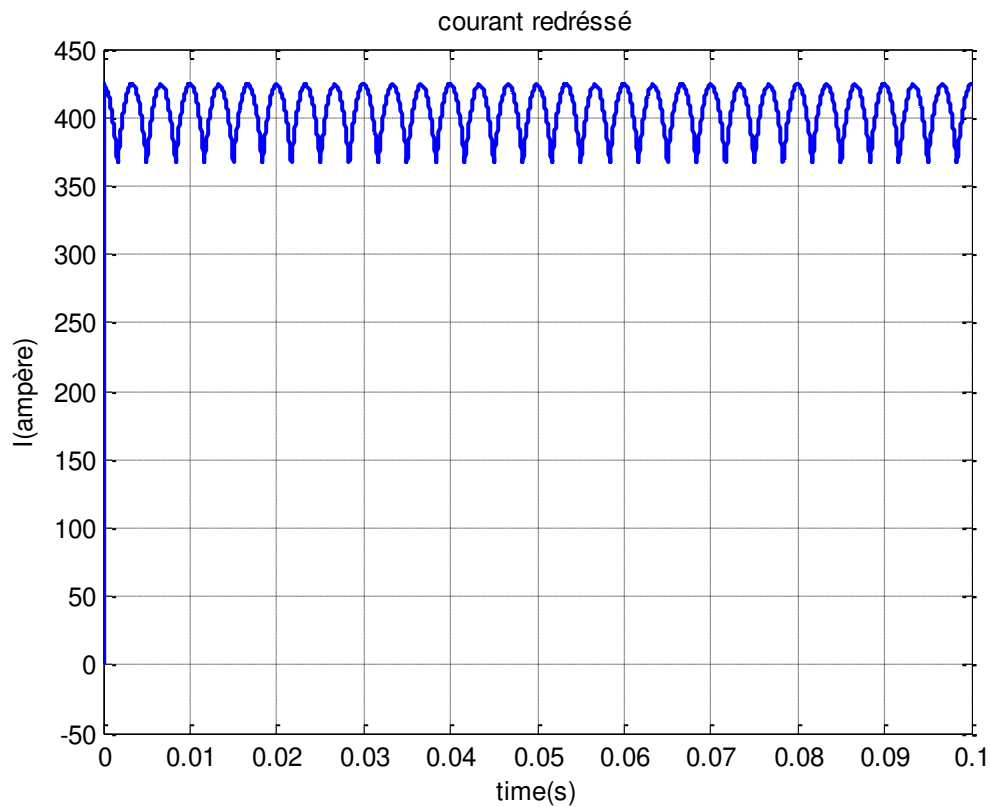
**Figure IV.22:** Résultat de simulation de la tension de source pour alimenter le redresseur PD3 Commandé



**Figure IV.23:** Résultat de simulation de courant de source pour alimenter le redresseur PD3 Commandé

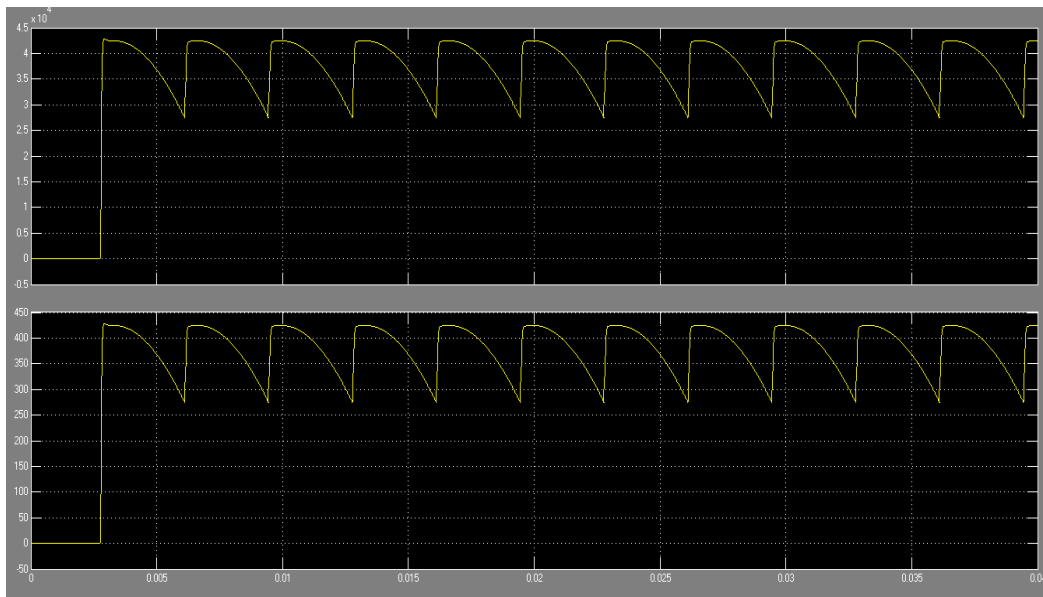


**Figure IV.24:** Resultat de simulation de la tension redressée en DC avec un angle d'amorçage  $\alpha = 0$



**Figure IV.25 :** Résultat de simulation du courant redressé de PD3

### 1- Capture d'écran du redressement du tension et courant avec $\alpha=20$



**Figure IV.26:** Resultat de simulation concernant le courant et la tension redressé en DC avec un angle d'amorçage  $\alpha = 20$

#### ▪ Interprétation :

La figure IV.21 simulation de redresseur PD3 commandé alimenté par une source triphasé moyenne tension réalisé sous l'environnement Matlab /simulink pour visualisé les caractéristique de courant DC et tension DC commandé par un générateur d'impulsion pour amorcer les gachettes du thyristors avec une charge résistive pour comprendre le fonctionnement réel de PD3, nous avons visualisé les caractéristiques de tension voir figure IV.22 et le courant voir figure IV.23

Pour un angle d'amorçage à  $\alpha = 0$  le point de PD3 redresse en AC/DC tension DC voir figure IV.24 et courant DC voir figure IV.25

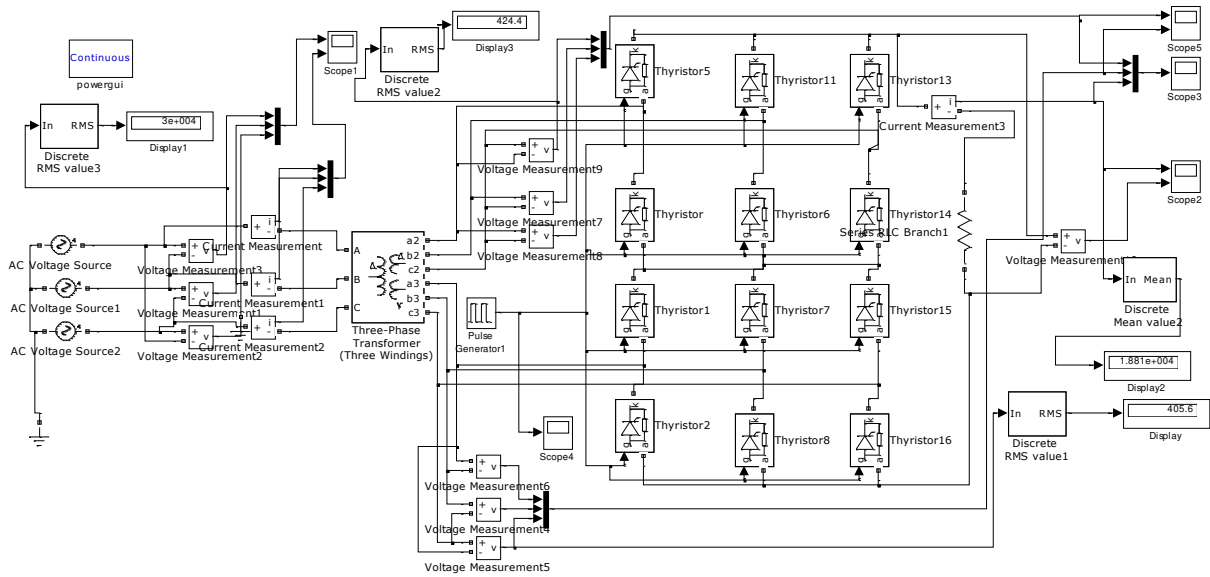
Pour le changement de l'angle d'amorçage à partir le générateur d'impulsion et avec  $\alpha = 20$  nous avons obtenu par capture d'écran voir figure IV.26

#### ▪ Commentaire :

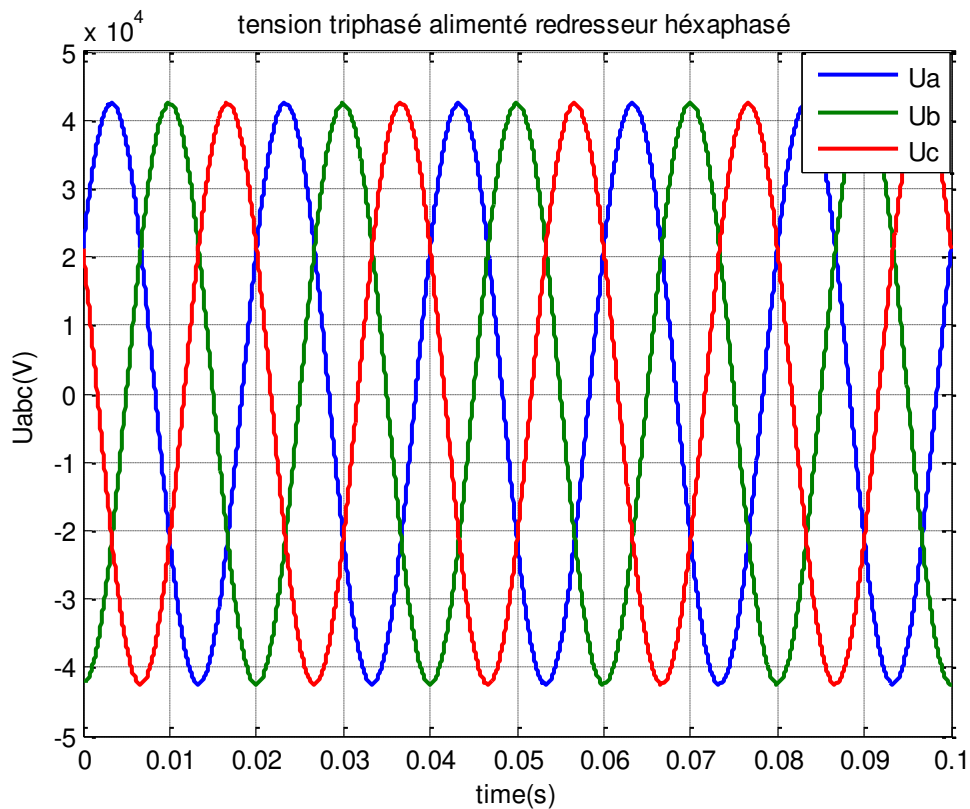
On ne peut pas amorcer les thyristors d'un pont avec des angles trop proches de  $180^\circ$  car sinon on risque d'avoir 2 branches en conduction : celle qui tarde à s'ouvrir (à cause du temps de recouvrement) et celle qui se ferme, donc on crée un court-circuit sur le réseau. En pratique, l'angle d'amorçage limite est de l'ordre de  $150^\circ$ . On ne cherche pas à aller au-delà de cet angle

**IV.2.4. Schéma de simulation de redresseur hexasphasé (4ème étage) :**

Le schéma de simulation de la figure IV.27 nous avons un assemblage de trois étages.



**Figure IV.27:** simulation de redresseur hexasphasé Commandé 12 impulsions



**Figure IV.28 :** Resultat de simulation de la tension d'entrée

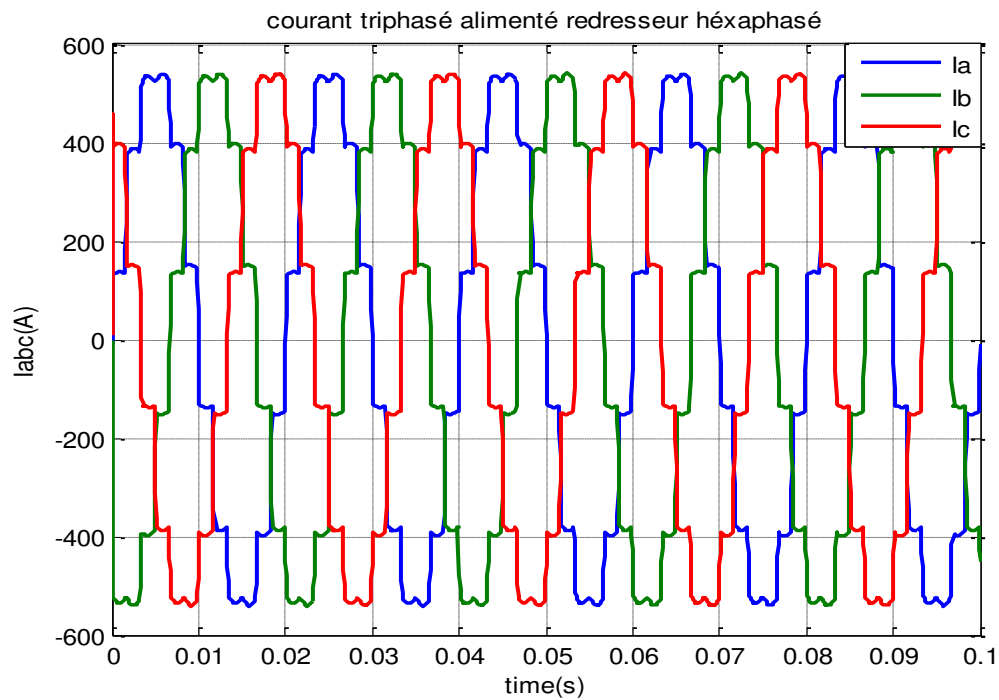


Figure IV.29: Simulation du courant d'entrée

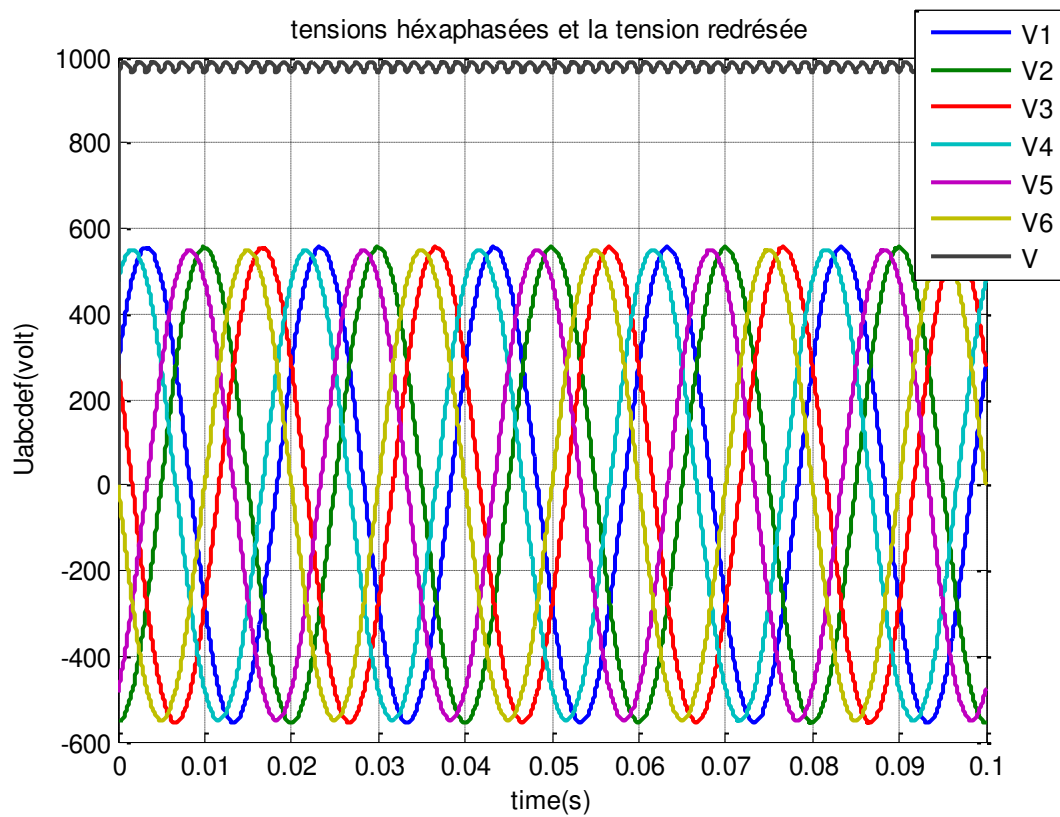
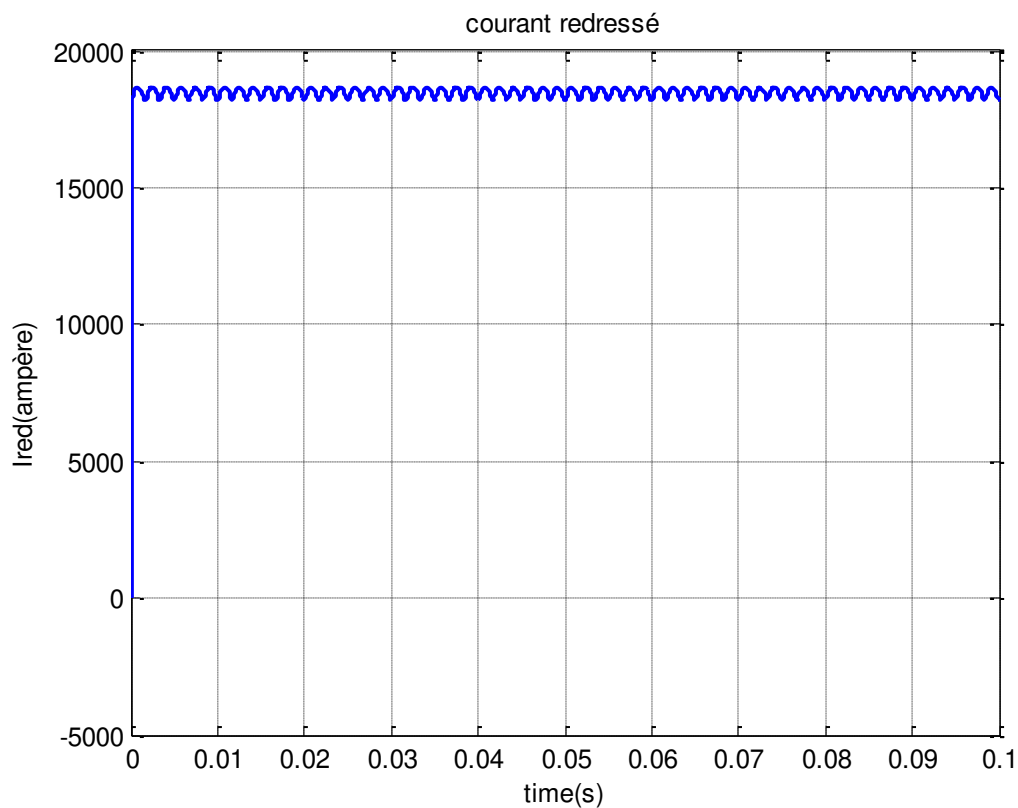
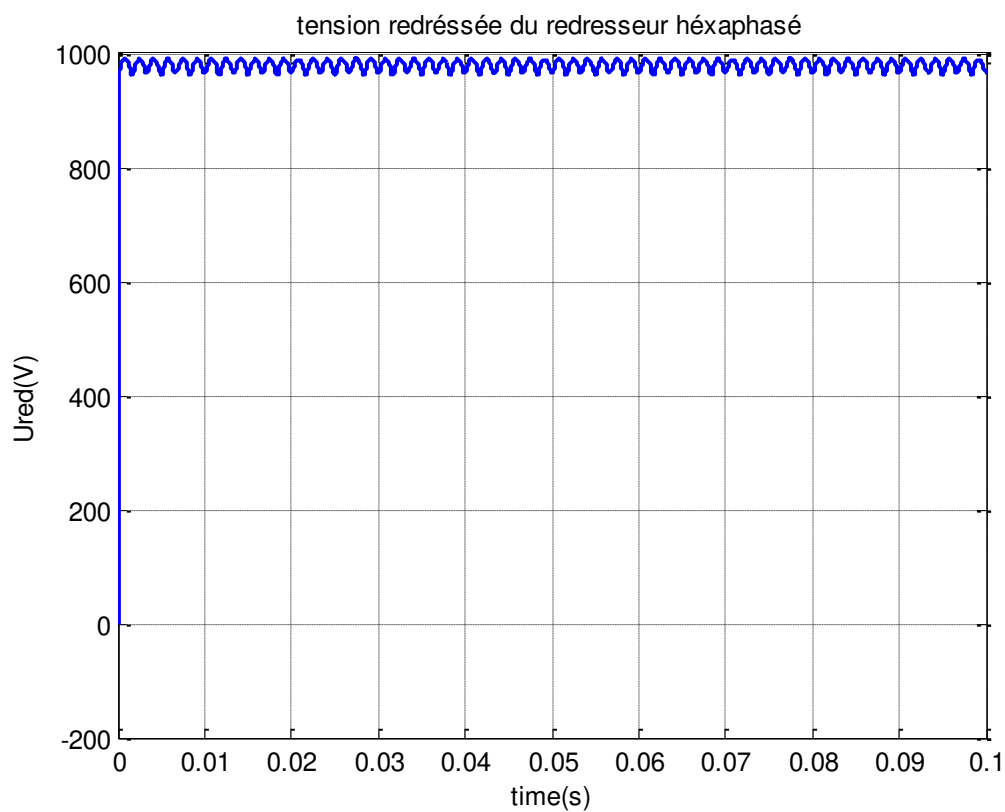


Figure IV.30 : resultat de simulation des tensions hémphasées et de la tension redressée.

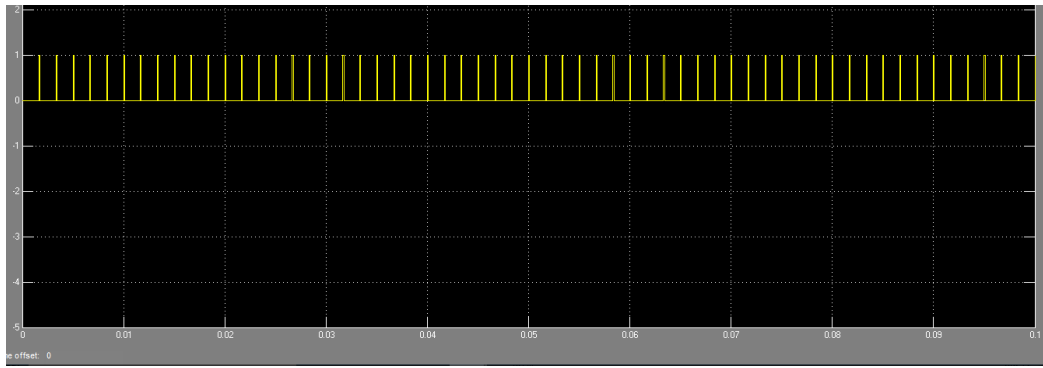


**Figure IV.31:** Résultat de simulation du courant redressé



**Figure IV.32:** Résultat de simulation de la tension redressée.

### 1- Capture d'écran des impulsions des thyristors



**Figure IV.33:** les impulsions du gâchette des thyristors.

#### ▪ Interprétation :

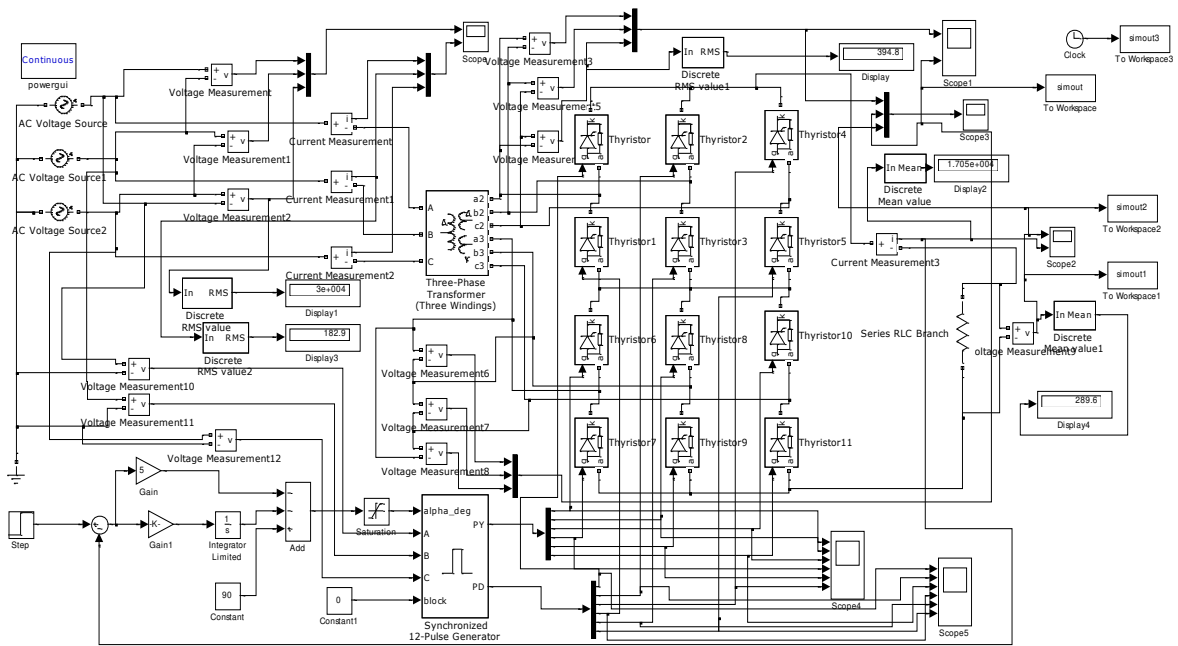
La figure IV.27 représente la simulation du redresseur hexasphasé commandé alimenté par une source triphasé moyenne tension réalisée sous l'environnement Matlab /simulink pour visualiser les caractéristiques de courant DC et tension DC commandé par un générateur d'impulsion pour amorcer les gâchettes des thyristors avec une charge résistive pour comprendre le fonctionnement réel de hexasphasé, nous avons visualisé les caractéristiques de tension voir figure IV.28 et le courant voir figure IV.29

Pour obtenir un convertisseur à 12 pulsations, il faut connecter deux ponts triphasés à thyristors en série. On a six phases (hexasphase) avec un déphasage de  $30^\circ$  voir figure IV.30

Pour un angle d'amorçage à  $\alpha = 0$  le point de redressement en AC/DC tension DC voir figure IV. 31 et courant DC voir figure IV.32

#### IV.2.5. Schéma de simulation global (5ème étage) :

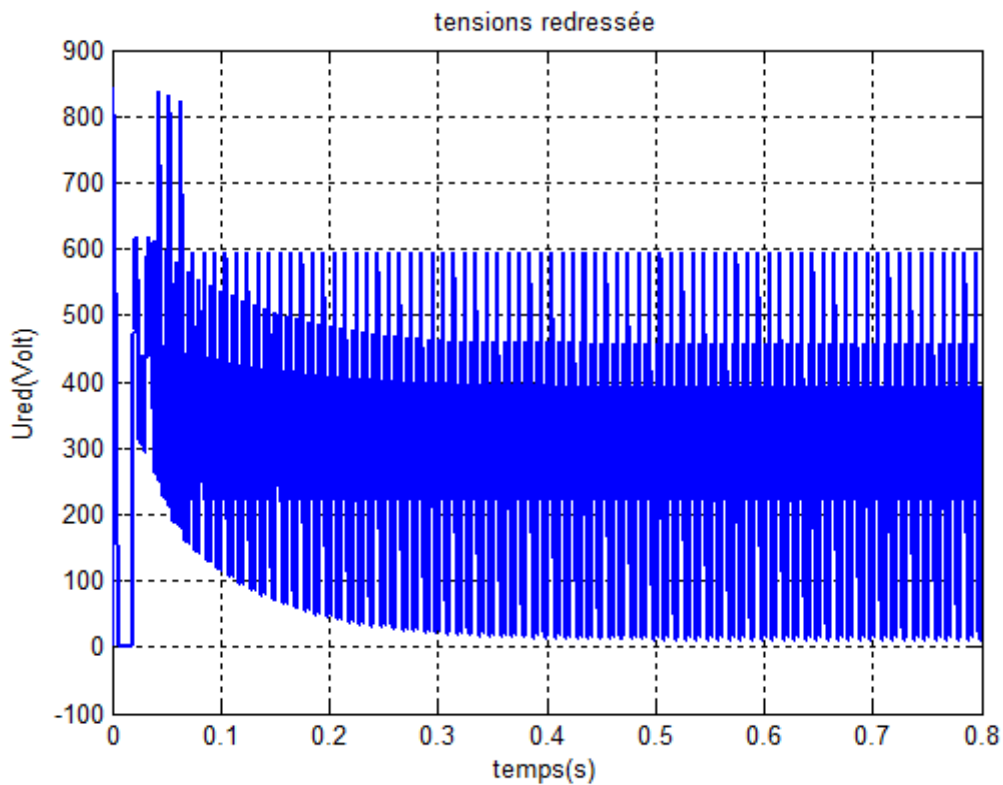
Pour compléter notre étude nous avons simulé un redresseur hexasphasé alimenté par un transformateur triphasé qui peut travailler en régime abaisseur et qui est contrôlé par une boucle de régulation de type PID pour la régulation du courant redressé. La figure IV.34 montre le schéma global de simulation réalisé sous Matlab/ Simulink.



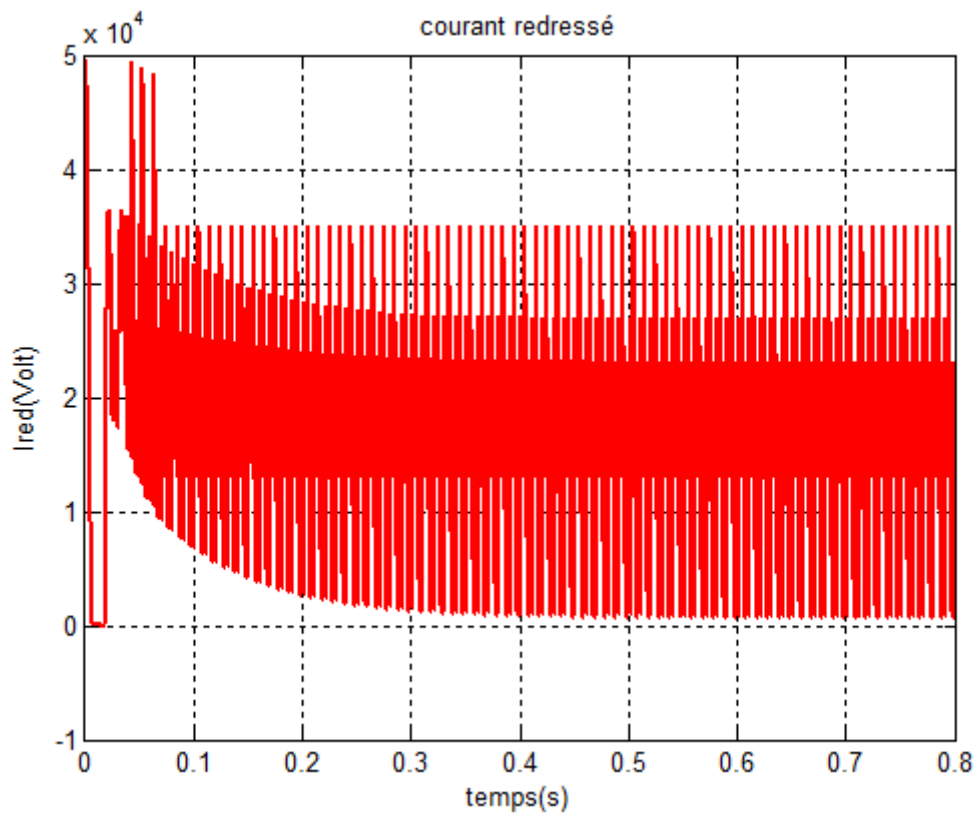
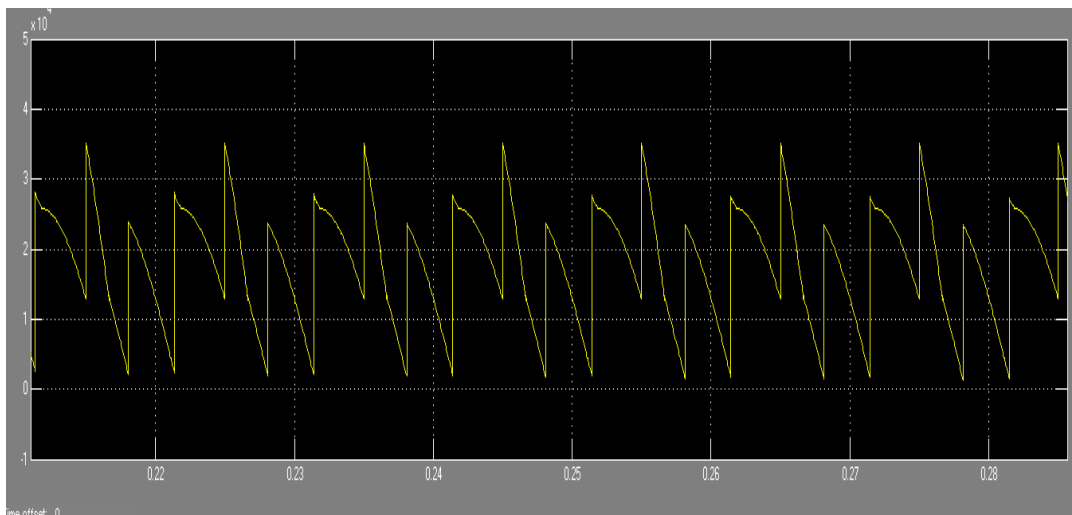
**Figure IV.34:** simulation de redresseur hexasphasé commandé avec la régulation du courant redressé.

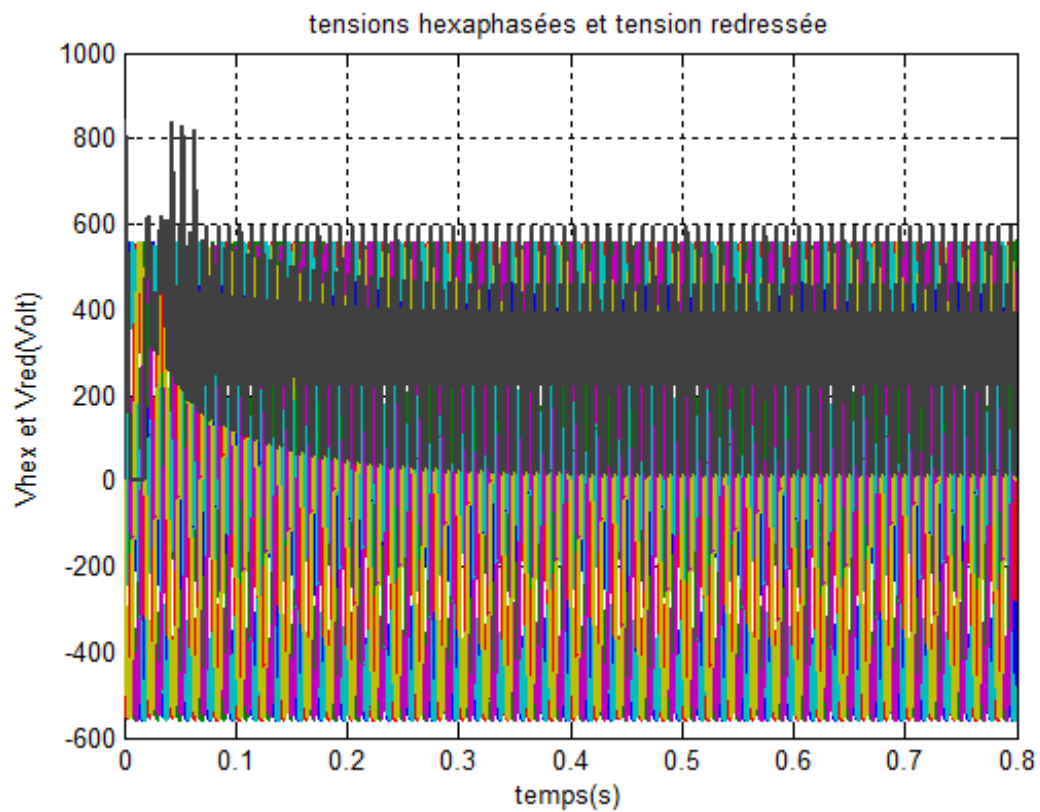
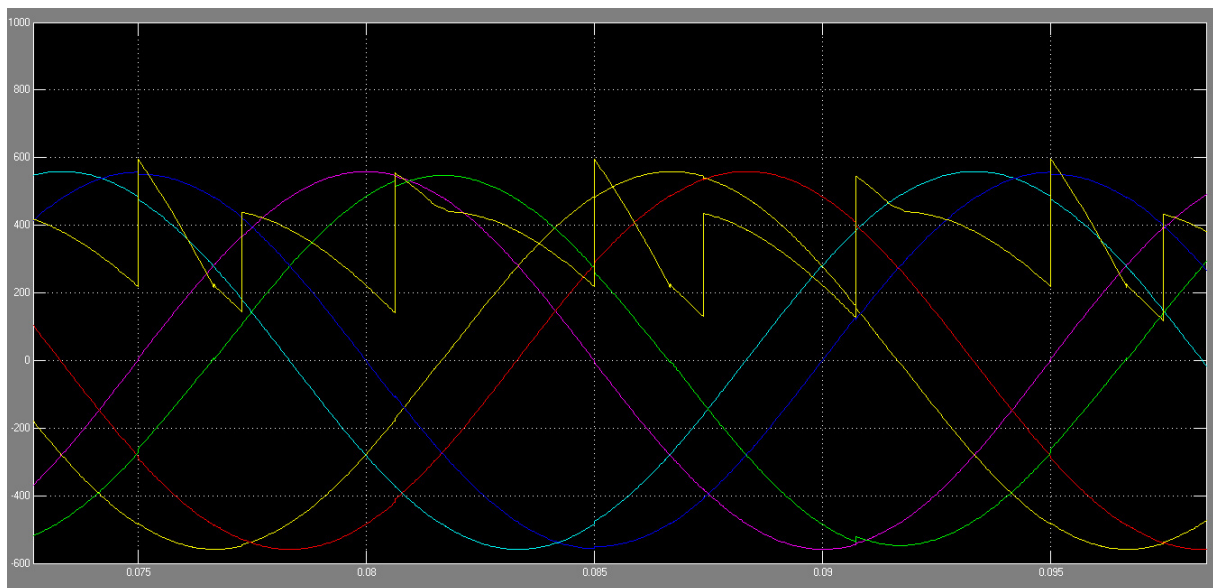
**1- Graphes de simulation (schéma global) :**

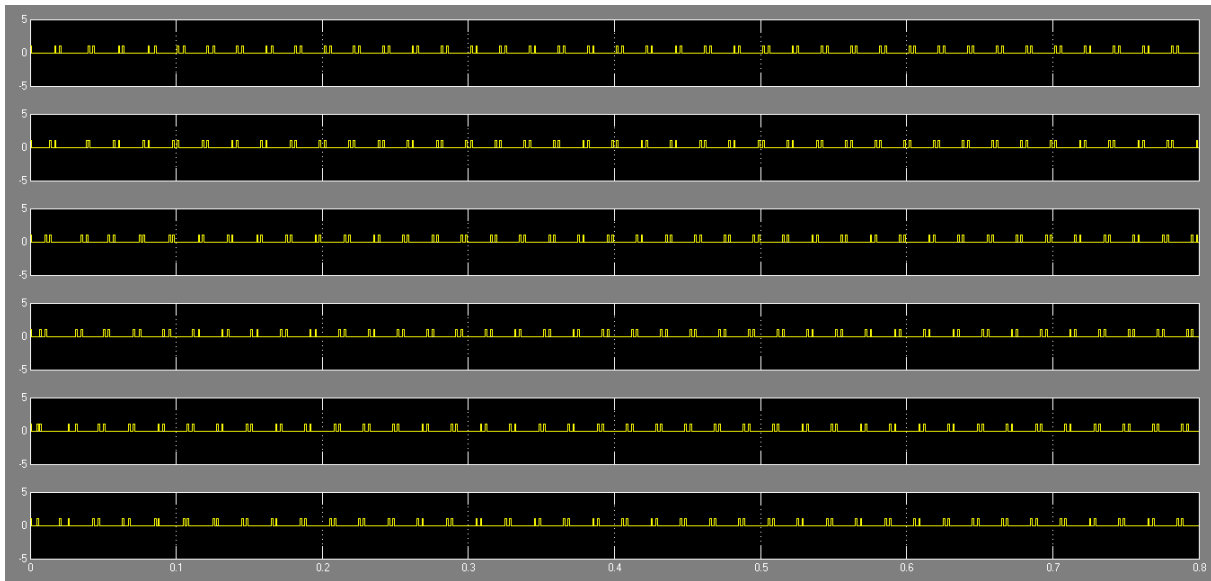
**a) Graphe1 : tension redressée**



**Figure IV.35 :** simulation de la tension redressée.

**b) Graphe2 : courant redressé****Figure IV.36:** Simulation de la régulation courant redressé.**c) Graphe 2 Capture d'écran courant redressé :****Figure IV.37:** Régulation du courant redressé .

**d) Graphe3 : tensions hexaphasées et tension redressée****Figure IV.38:** Simulation de l'héxaphasé et tension redressée**e) Graphe capture d'écran l'héxaphasé :****Figure IV.39:** Simulation de l'héxaphasé et tension redressée

**f) Capture d'écran des impulsions du thyristor :****Figure IV.40 :** résultat de simulation des impulsions des thyristors**▪ Interprétation :**

Nous présentons les schémas de simulation de certains défauts qui se produisent au niveau d'un redresseur hexaphasé, et qui peuvent perturber le fonctionnement et par suite le comportement de tout système relié à celui-ci. Les résultats obtenus par simulation sont interprétés et commentés. Tous les travaux sont réalisés à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Dans le cas du redressement commandé à thyristors la fermeture des dits thyristors provoque l'apparition d'harmoniques en Amont et en aval du pont redresseur ces harmoniques sont ensuite amplifiées par le transformateur qui devient élévateur ce qui va perturber grandement le réseau électrique. Pour prévenir et éliminer ses harmoniques l'étude fréquentielle des signaux des différents étages est nécessaire pour calculer l'amplitude et les fréquences des harmoniques ensuite on calcule les filtres passe bas (pour éliminer les fréquences supérieur à 50Hz) à appliquer en Amont du transformateur pour les éliminer.

### Analyse harmonique par FFT

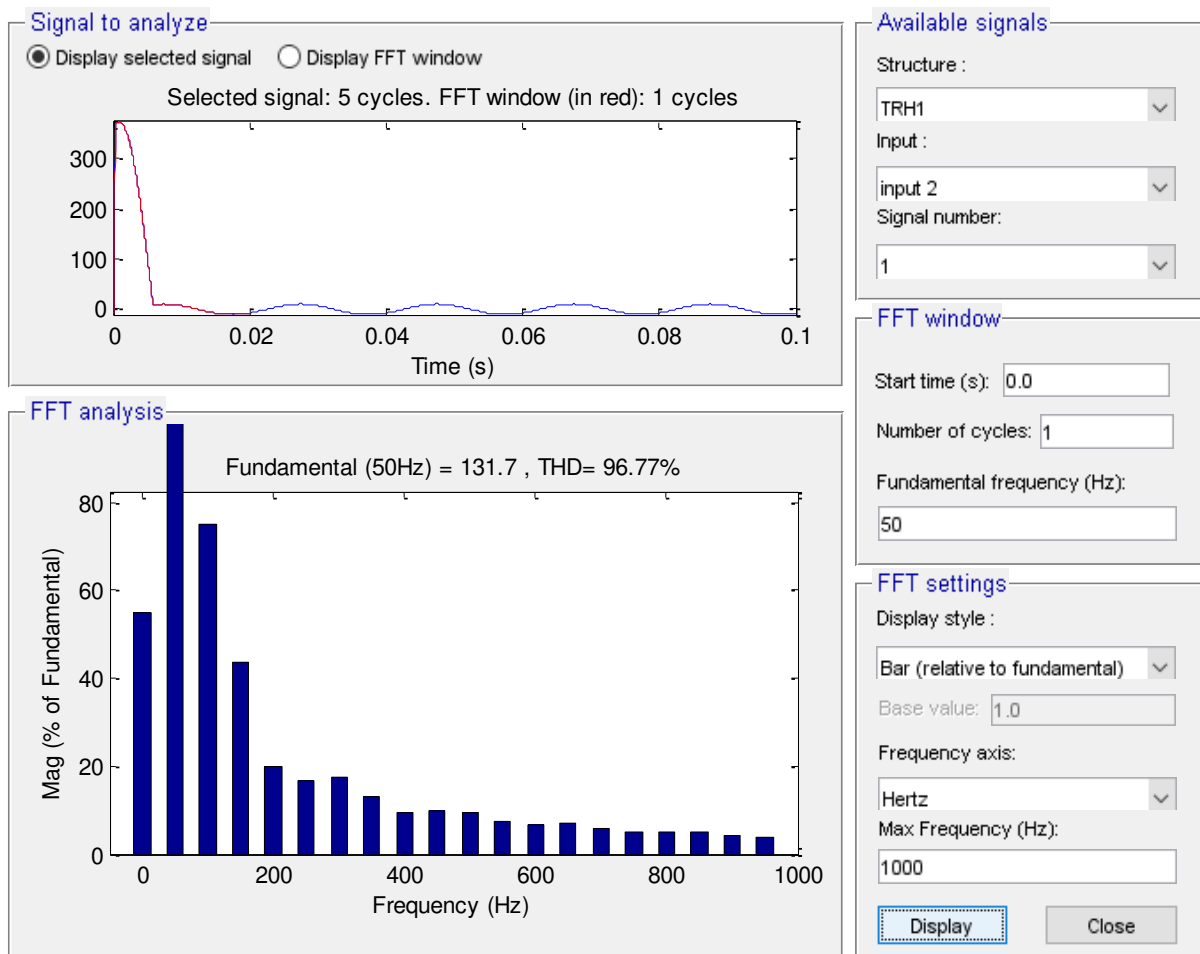


Figure IV.41 : Analyse harmonique du courant AC

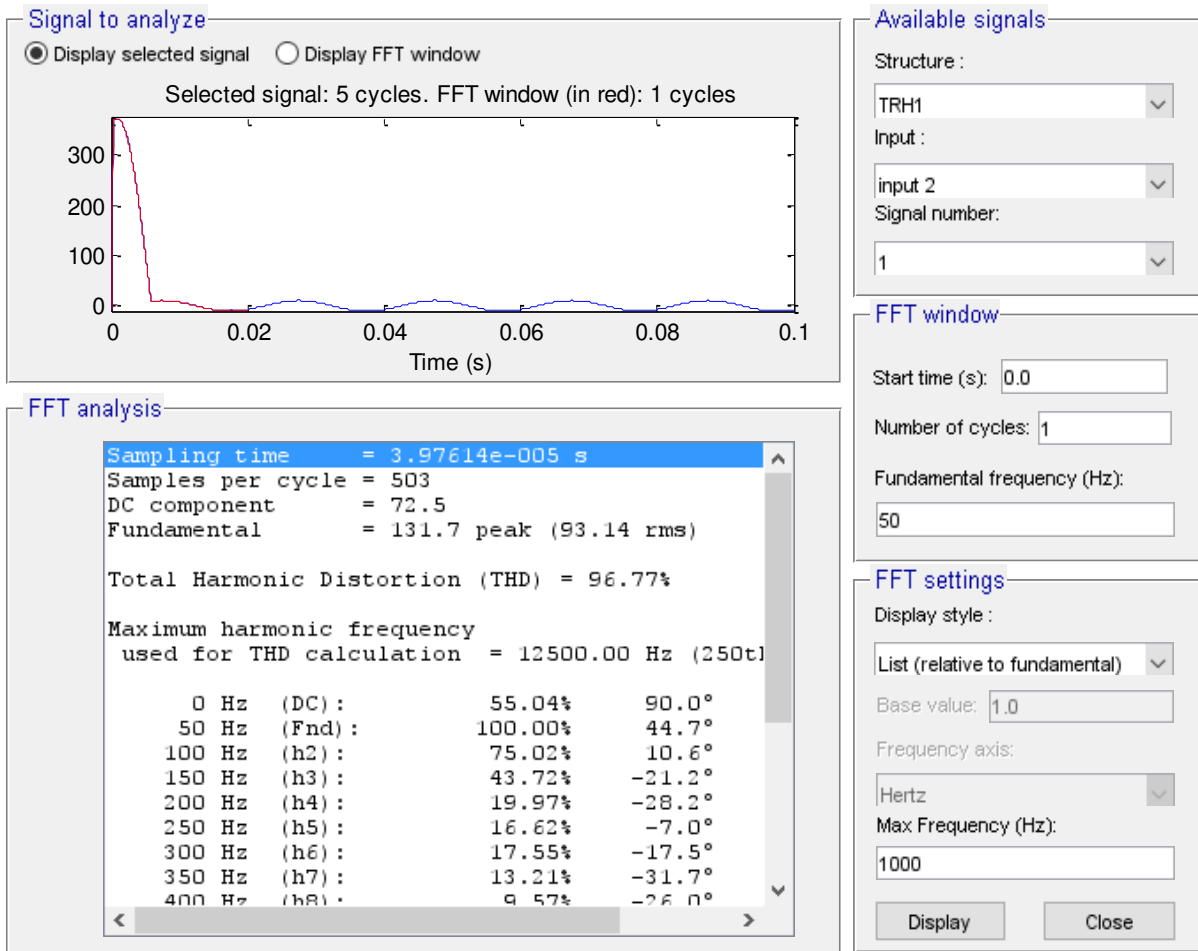


Figure IV.42 : Analyse harmonique de la liste THD en % du courant AC

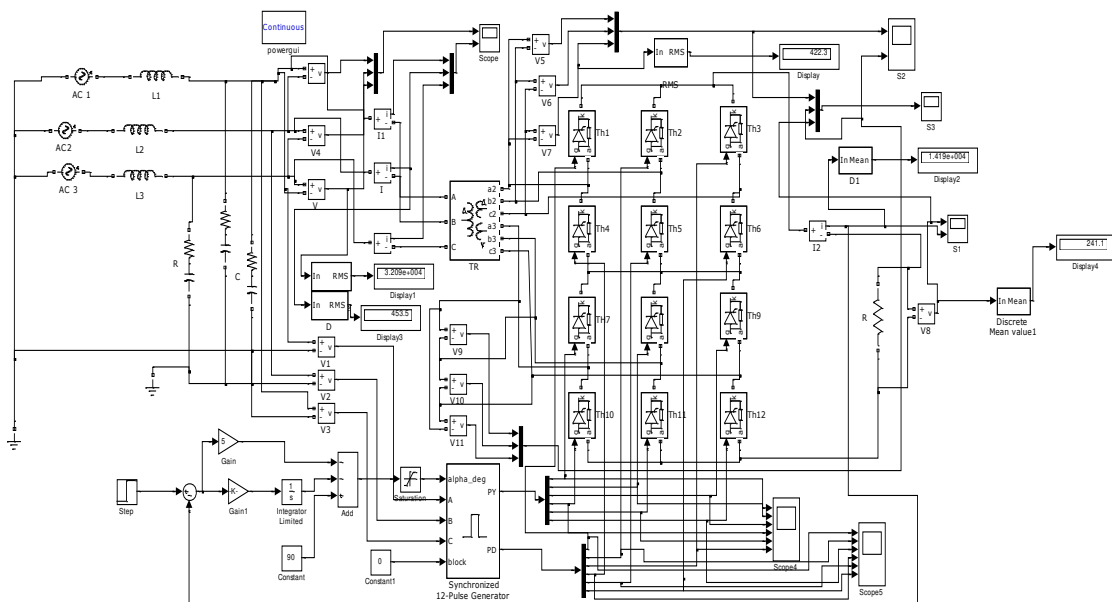


Figure IV.43 : schéma de simulation global charge RL avec filtre harmonique

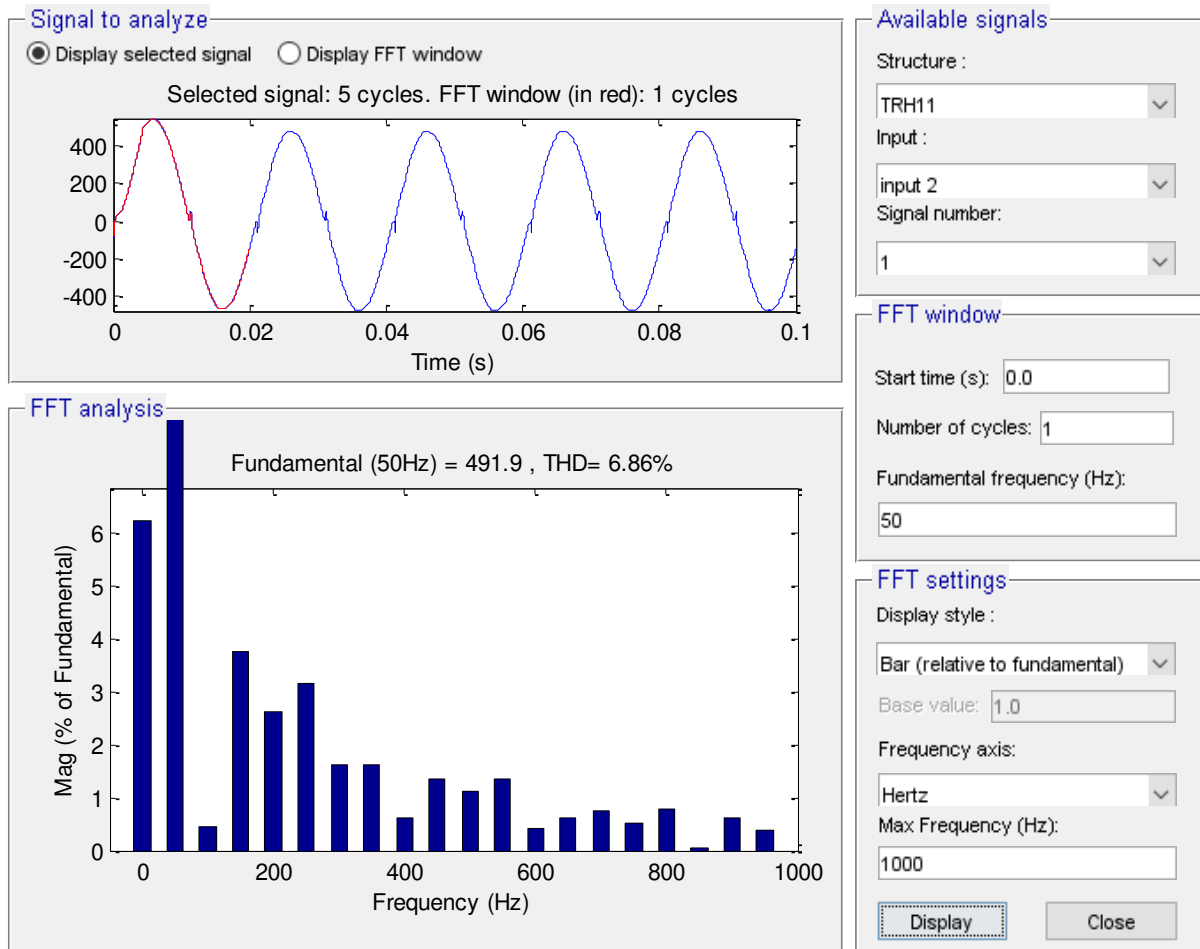


Figure IV.44 : Analyse harmonique du courant AC

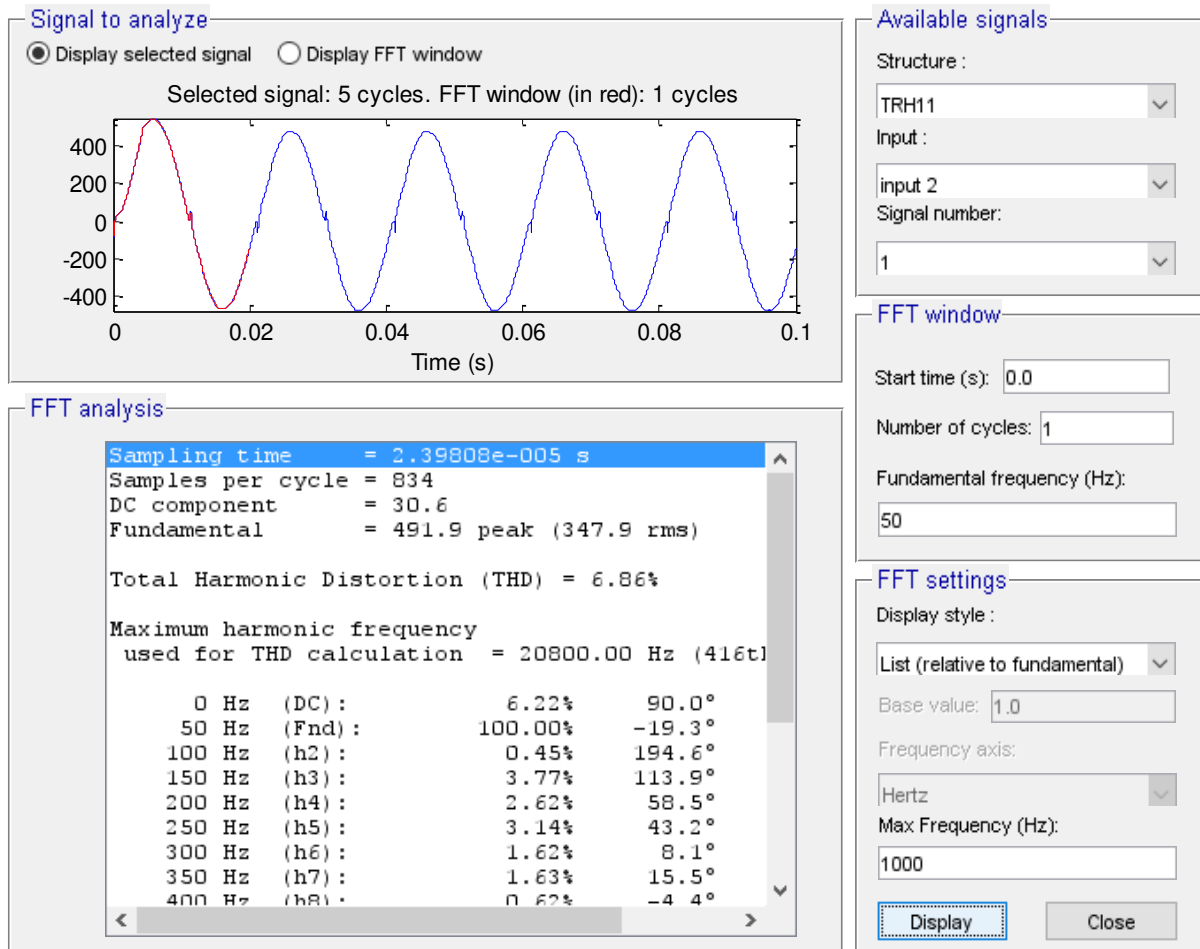


Figure IV.45 : Analyse harmonique de liste de THD en % courant AC

**Interprétation :**

Dans le schéma global pour une charge resistive non équilibrée à cause de l'utilisation d'un transformateur triphasé comme charge inductive, nous constatons d'après les analyses d'harmonique FFT ,la présence de plusieurs harmoniques d'ordre supérieur en plus de la fréquence fondamentale (F=50Hz) et de la composante continue et THD =96.77% voir les figuresIV.41 et 42,nous essayons d'atténuer le taux de distorsion harmonique et la composante continue et les harmoniques d'ordres supérieurs dans la source d'entrée par un système de compensation de l'énergie réactive avec uncircuit RLC,voir la figure IV.43.

La batterie de condensateur que nous avons introduite dans le schéma global est destinée à maintenir la fréquence fondamentale F=50Hz,et diminuer les pourcentages des harmoniques d'ordre supérieur et la composante continue.

D'après les analyses harmoniques, on remarque que le taux de distorsion harmonique a diminué jusqu'à 6.86 % voir figures IV.44.45. car nous avons utilisé un système de compensation de l'énergie réactive par circuit RLC, ce qui permet d'avoir un facteur de puissance meilleur.

**Commentaire :**

Le but d'un filtre passif est de réduire l'amplitude d'un ou plusieurs harmoniques. La taille du filtre est définie par la puissance réactive à la fréquence fondamentale. Le critère idéal pour la conception des filtres est l'élimination de tous les effets causés par la déformation du courant, mais ce critère idéal est irréalisable pratiquement. Le critère le plus pratique exige la réduction des harmoniques à un niveau acceptable au point de couplage commun avec d'autres consommateurs. Il est plus économique d'utiliser des filtres de type (R-L-C) série en résonance à la fréquence de l'harmonique basse fréquence. Les filtres passifs ont certains inconvénients ce qui rend la conception délicate, surtout lorsqu'il s'agit de minimiser les harmoniques causées par les convertisseurs statiques. Les solutions classiques tel que filtrage passif et la compensation de puissance réactive ne sont plus suffisantes pour la dépollution. Il faut donc chercher d'autres moyens plus efficaces. Le progrès réalisé sur les semi-conducteurs a permis de concevoir de nouvelles structures, tel que le filtrage actif. Ce dernier permet d'injecter des courants de ligne créés par le convertisseur.

### **IV.3. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons exposé les principes de simulations d'un certain étage parmi les plus fréquents dans l'installation industrielle pour la fabrication du chlore au niveau de la société Adwan Chemicals. Le logiciel Simulink de MATLAB a été l'outil de base pour réaliser les différents étages de simulations. Les résultats obtenus ont tous été interprétés et commentés. Notre étude a été axée de façon générale sur l'effet de redressement et la régulation sur la tension et le courant. Certaines propositions ont été faites dans le but d'améliorer le rendement de la production.

## **CONCLUSION GENERALE**

### CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons étudié un problème sérieux qui est la pollution du réseau électrique causée par les convertisseurs côté réseau. Pour ce faire, nous avons relié le système électrique et l'électronique à travers un redresseur hexasphasé de 12 pulsations commande l'électrolyseur industriel. Nous avons exposé les principes de simulations d'un certain étage parmi les plus fréquents dans l'installation industrielle pour la fabrication du chlore. Le logiciel Simulink de MATLAB a été l'outil de base pour réaliser le système de redressement hexasphasé qui contient des thyristors pour donner une grande intensité DC on a trouvé les effets harmoniques dans les systèmes pour alimenter l'électrolyseur. Les résultats de simulation obtenus ont tous été interprétés et commentés. Certaines propositions ont été faites dans le but pour étudier, simuler et améliorer le circuit RLC et la compensation pour arriver à un système de redressement stable et équilibré. Le but d'un filtre passif est de réduire l'amplitude d'un ou plusieurs harmoniques. La taille du filtre est définie par la puissance réactive à la fréquence fondamentale. Le critère idéal pour la conception des filtres est l'élimination de tous les effets causés par la déformation du courant, mais ce critère idéal est irréalisable pratiquement. Le critère le plus pratique exige la réduction des harmoniques à niveau acceptable au point de couplage commun avec d'autres consommateurs.

Il est plus économique d'utiliser des filtres de type (R-L-C) série et à la fréquence de l'harmonique basse fréquence à éliminer. Dans la pratique, les filtres passifs ont certains inconvénients ce qui rend la conception délicate, surtout lorsqu'il s'agit de minimiser les harmoniques causés par les convertisseurs statiques. Les solutions classiques telles que le filtrage passif et la compensation de puissance réactive ne sont plus suffisantes pour la dépollution. Il faut donc chercher d'autres moyens plus efficaces. Le progrès réalisé sur les semi-conducteur sa permis de concevoir de nouvelles structures, tel que le filtrage actif .ce dernière permet d'injecter des courant de ligne créés par le convertisseur un réglage par un régulateur PI de courant de l'étage continu et une commande à thyristors pour contrôler la phase et l'amplitude des courants du réseau d'alimentation. Les résultats de simulation montrent que cette stratégie de contrôle donne de bonnes performances, en termes de réglage de courant de l'étage continu et de correction du facteur de puissance.

Ce travail n'est pas achevé d'autres travaux doivent être projetés en particulier les effets de température sur le fonctionnement (régulation de la température).

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

[1] : DEDDH Halima. Thème : Procédé de fabrication d'hypochlorite de sodium et la caractérisation de produit (2017/2018) Université Akli Mohamed Oulhadj-BOUIRA.

[2] : ALIMI chahinez : Procédé de fabrication industrielle d'hypochlorite de sodium et leur caractérisation (2020) Université de BISKRA.

[3] : Le procédé Castner-Kellner- wikipédia <https://fr.wikipedia.org>

[4] : ABDELHAK N, KELLOU M A : Conception d'un système de comptage automatisé à l'usine FCI : Partie automatisation par API S7-1200mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah Ouargla 2016

[5] : Production de chlore et de soude par le procédé à membrane échangeuse d'ions François Delmas

[6] : Chapitre8 transformateur [www8.umoncton.ca](http://www8.umoncton.ca)

[7] : Abdelkader AMIR et SAADI Nassim : Application de la logique Floue pour le Diagnostic des Transformateurs de puissance pour analyse des Gaz dissous (2017) Université M'hamed Bougara - BOUMERDES.

[8] : MEDJKANE Hayette : Etude du régime transitoire dans les réseaux MT (2010-2011) TIZI OUZOU.

[9] : Ammar BENEDDINE et Flora BEN MAMER Etude des essais normalisés des transformateur de puissance MT/BT (2016) Université de Mouloud Mammeri TIZI- OUZOU.

[10] : MEGHERBI Hicham et HAMRI Sofiane : Etude et modilisation des convertisseurs statiques destinés à améliorer la qualité de l'énergie électrique (2016/2017) Université de TAHAR Moulay - SAIDA.

[11] : ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE - NUMLOR.

<http://numlor.fr> > elearning > etenp >

[12] : Radia BOUMILEK : Un simulateur de convertisseur d'électronique de puissance appliqué dans le transport d'énergie électrique HVDC (2017) Université Badji -Mokhtar - ANNABA.

[13] : BOUCHA Aissa et BENAYAD Aida : méthodologiés d'analyse des montages redresseurs (2009/2010) université Larbi Benmhidi- OUM ELBOUAGHI.

[14] : amélioration des performances des ponts redresseurs (site internet)

[15] : redresseur 12 et 6 impulsions [www.tubefr.com](http://www.tubefr.com)

[16] : Principes de régulation en boucle fermée – approche en tension

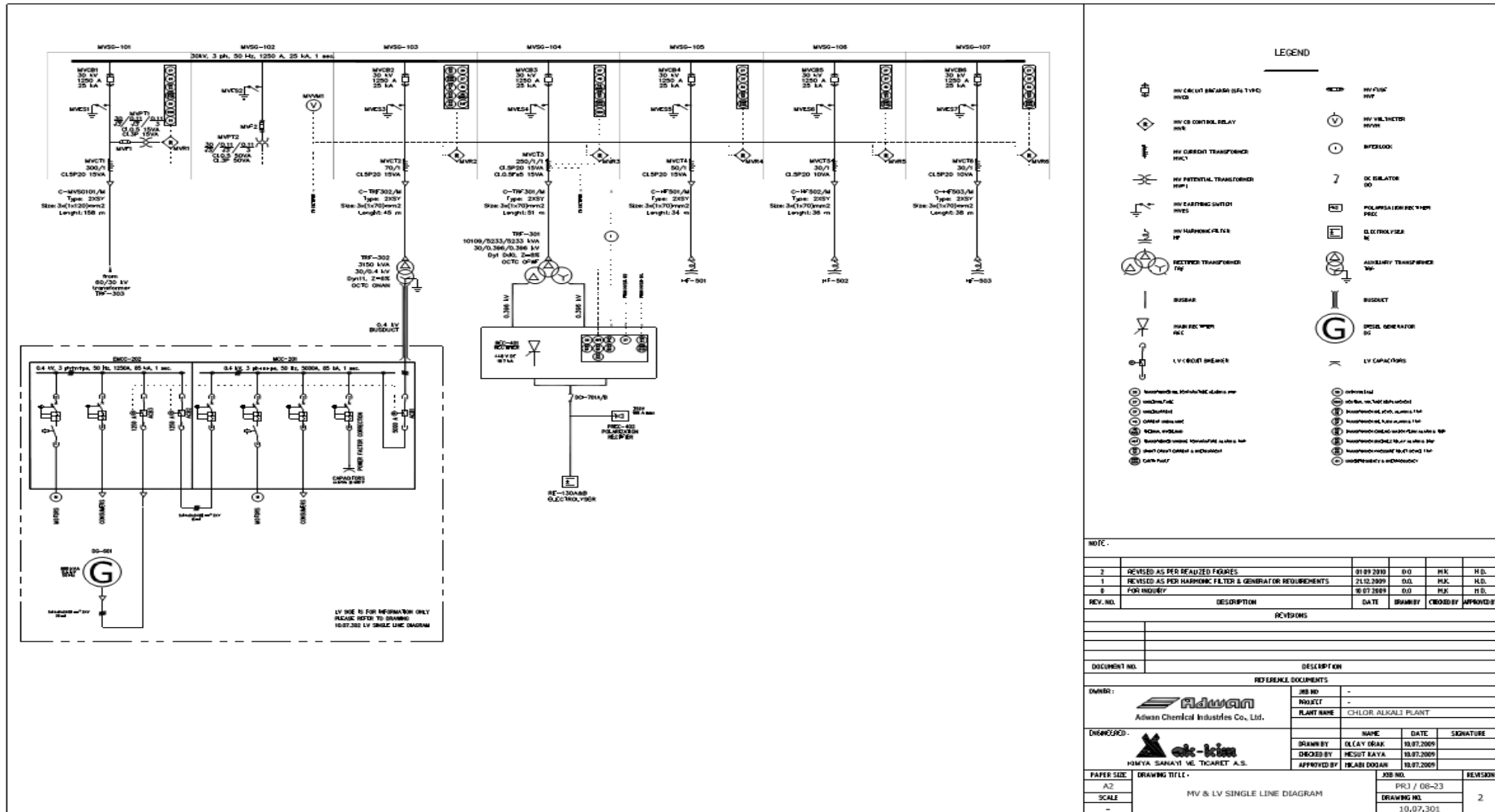
<https://www.techniques-ingenieur.fr> > énergies-th4 >.

- [17] : SLIMANI Sofiane et HACHEUR Ahcen Thème : Contribution à l'Implémentation d'un Régulateur Flou Simplifié sous un API S7-300 (2018) Université de Mouloud Mammeri - TIZI OUZOU.
- [18] : HAMLAOUI ahmed abderraouf : Implémentation et test en temps réel d'un bloc régulateur RST sur le procédé industriel de régulation CE 177 (2017) Université larbi Ben M'hidi - OUM ELBOUAGHI.
- [19] : BENFEDA Rachid et Amrane BOUSSAD et CHAOUUCHE Aziz : Etude de la protection électrique des moteurs asynchrones triphasés (2012) Université Mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU
- [20] : MALLEK Abdennour et MERABET Ghiles : Régulation de la température huile de turbine de la centrale thermique de CAP-DJINET (2017) Université Mouloud Mammeri Tizi OUZOU
- [21] : MEDJBER Amine et BOUCEBSSI Marzak: conception et réalisation d'un système domotique par GSM (2017) Université Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU.
- [22] : DR. M. Rabi, « régulation analogique industriel », ESSTT.G. thermique, 2008



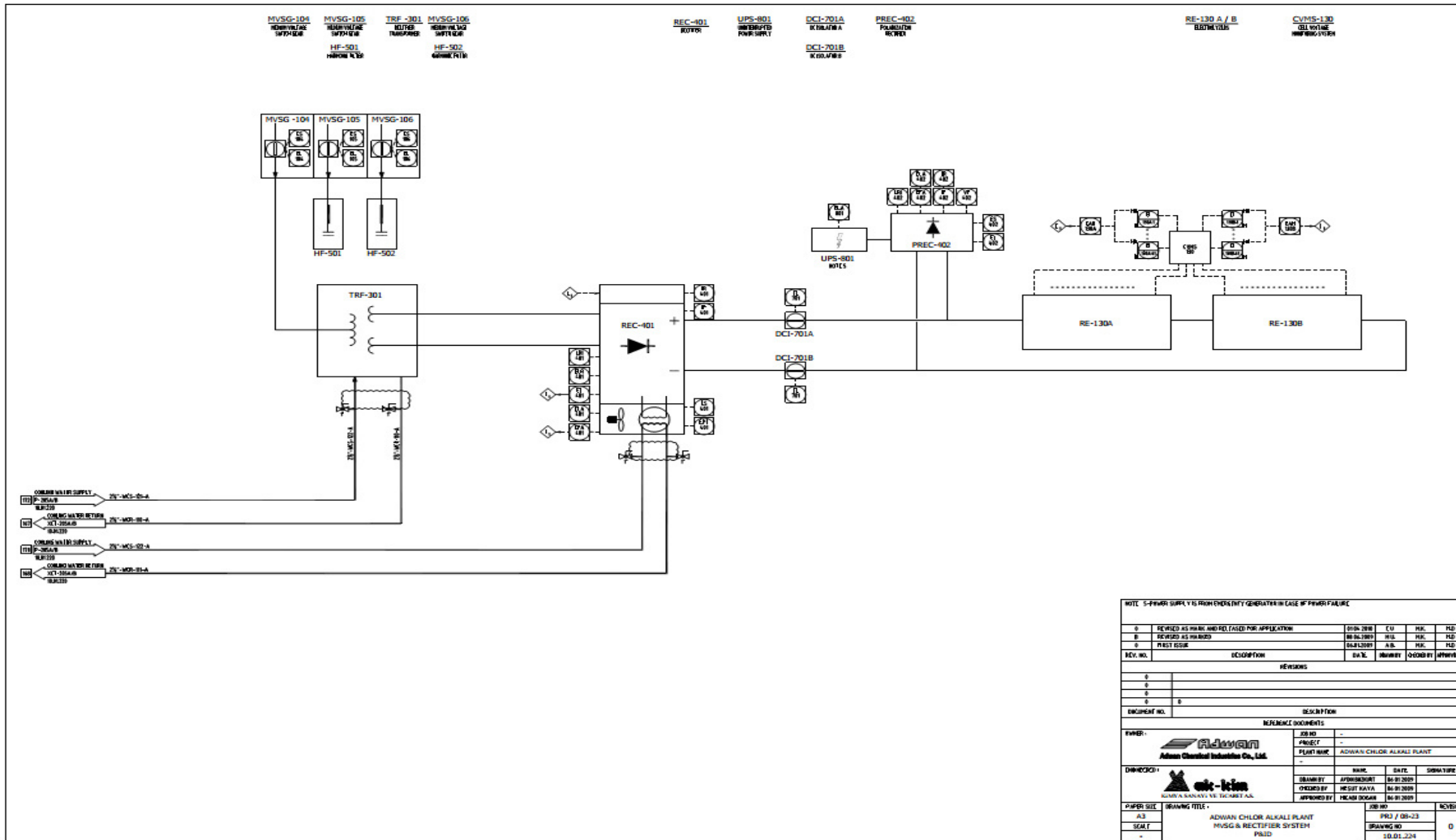
# Annexe

## Chapitre II :



Annexe B Figure 1 : Schémas architecture du transformateur et redresseur de la société Adwane.

# Annexe



Annexe B Figure 2 : Schémas électrique du transformateur et redresseur de la société Adwane.

### TRANSFORMER'S CHARACTERISTICS

- Serial no.: 36004
- No. of phases: 3/6
- Type of cooling: OFWF
- Frequency: 50 Hz
- Rated power: 10116/2x5236 kVA
- Primary voltage: 30000 V  $\pm 2 \times 2.5\%$
- No-load secondary voltage: (396 – 396) V
- Primary line current: 194.7 A
- Secondary current: (7634 – 7634) A
- Primary connection: Delta – Delta
- Secondary connection: Delta – Star
- Vector group: Dd0 – Dy1
- HV insulation level: 36 / 70 / 145 kV
- LV insulation level: 1.1 / 3 kV
- Installation type: Outdoor

**Annexe B Figure 3 : Les paramètres du transformateur hexasphasé de la société Adwane**

## Annexe

---

### 1. RECTIFIER TRANSFORMER UNIT

Quantity 1

The provided transformer unit is 12 pulse, 3/6 phase, oil immersed type, cooled by OFWF (oil forced, water forced) system with 100% total redundancy and it has cores made of high quality grain oriented sheet steel and windings made of copper.

#### Main characteristics

- Primary side AC supply : 30 kV  $\pm$  2 x 2,5 %, 50 Hz
- Fault level : 400 MVA
- No load tap changer (NLTC) : 5 positions
- Maximum power primary side : 10110 kVA
- Max secondary power at max secondary voltage : 2 x 5222 kVA
- Maximum secondary voltage, at no load : 396 V
- Rated secondary voltage, at no load : 379 V
- Minimum secondary voltage, at no load : 326 V
- Rated secondary current (for each arm) : 7634 A
- Vector group : Dy1-Dd0
- Windings connection number (IEC 146-1-2) : 9
- Rectifier connection : double bridge
- Rectifying elements : thyristor
- Rated DC current : 18700 A
- Rated DC voltage : 440 V

Annexe B Figure 4 : Les paramètres du redresseur de la société Adwane.