

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES**

*Présenté par*  
**Naima LARDJANI**

Thème

## ETUDE DE LA COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE LORS D'UNE CHARGE NON LINEAIRE

*Mémoire à soutenir publiquement le 24 Septembre 2017 devant le jury composé de :*

<b>M Meziane AOUES</b>	Maitre Assistant Classe A, UMMTO,	Président
<b>M Karim HADJ SAID</b>	Maitre Assistant Classe A, UMMTO,	Rapporteur
<b>M Azouz MIOUAT</b>	Maitre Assistant Classe A, UMMTO,	Examineur
<b>M Hamza BESSAI</b>	Maitre Assistant Classe A, UMMTO,	Examineur

# Remerciements

- *Je remercie mon Dieu qui m'a donné la force et la sagesse pour achever ce modeste travail.*
- *Je tiens à remercier vivement tous ceux qui m'ont apporté un soutien pour l'élaboration de ce mémoire de fin d'études.*
- *Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon promoteur Mr HADJ SAID, pour ses multiples efforts et ses apports précieux afin de mener ce travail à terme.*
- *Je remercie les membres du jury d'avoir accepté de juger mon travail.*
- *Je tiens à présenter pour l'occasion tout mon respect à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.*
- *Mes remerciements également à tout le personnel du département ETH.*
- *Enfin, à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin je leurs dis merci.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce travail :*

*Avant tout à mes chers parents, qui m'ont  
soutenu durant toutes ces années de  
formation.*

*A mes chères sœurs Dihya et Lilia*

*A mes chères frères Anis et Adem*

*Et à toute ma famille*

*Tout comme je le dédie à tous mes amis(e)  
qui m'ont aidé de près ou de loin*

Introduction générale.....	1
<b>CHAPITRE I :</b>	
<b>Généralités sur la compensation de l'énergie réactive.</b>	
I.1.Introduction.....	3
I.1.1 Energies active, réactive, apparente.....	3
I.1.2 Composante active et réactive du courant.....	4
I.1.3 Composante réactive et réactive de la puissance.....	4
I.1.4 Puissance dans un réseau monophasé.....	5
I.1.5 Puissance dans un réseau triphasé.....	6
I.1.6 Facteur de puissance.....	8
- 6.1. Définition du facteur de puissance.....	8
- 6.2. causes du mauvais facteur de puissance.....	9
I.2. Utilité de la puissance réactive.....	10
I.3. Circulation de la puissance réactive et ses effets.....	10
- 3.1. Pertes joules . . . . .	11
- 3.2. Chutes de tension.....	13
- 3.3. Augmentation des investissements.....	14
- 3.4. Coté économique.....	15
I.4. Principe de la compensation d'énergie réactive.....	15
I.5. Les grands consommateurs d'énergie réactive.....	15
a. Machines à excitation.....	15
b. Systèmes d'électronique de puissance.....	16
c. Industries.....	16
I.6. Compensation de l'énergie réactive des réseaux de transport.....	16
➤ Caractéristiques des réseaux de transport et de répartition.....	16
➤ Caractéristiques des réseaux de distribution.....	16
I.7 Description de l'instabilité en tension.....	17
I.8 Phénomène d'écroulement de la tension.....	17
Conclusion.....	18
<b>CHAPITRE II :</b>	
<b>Moyens de compensations d'énergie réactive</b>	
Introduction.....	19
II.1. Batterie de condensateurs.....	19
II.1.1. Présentation.....	19
II.1.2. Les modes de compensation par batteries :.....	19
A. La compensation globale.....	19
B. Compensation partielle ou par secteur.....	20

<b>C. Compensation individuelle.....</b>	<b>21</b>
<b>II.1.3. Constitution de la batterie de condensateurs.....</b>	<b>22</b>
<b>II.1.4. Type d'installation :.....</b>	<b>22</b>
a- Installation série.....	22
b- Installation shunt.....	24
<b>II.1.5. Raccordement des condensateurs au réseau.....</b>	<b>24</b>
<b>II.2. Inductances.....</b>	<b>26</b>
<b>II.3. Compensateurs synchrones.....</b>	<b>26</b>
<b>II.4. Groupe thermique et hydraulique.....</b>	<b>28</b>
<b>II.5. Compensateurs statiques d'énergie réactive (dispositifs FACTS).....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.1. Concept FACTS : un projet EPRI.....</b>	<b>29</b>
<b>II.5.2. Quelques dispositifs de type FACTS.....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.1. Les condensateurs commutés par thyristors.....</b>	<b>30</b>
5.2.2. Compensateur statique de puissance réactive.....	31
5.2.3. Compensateur synchrone statique .....	32
5.2.4. Condensateur série commandé par thyristors :.....	32
<b>Conclusion.....</b>	<b>33</b>

## **CHAPITRE III :**

### **Perturbations électriques dans les réseaux électriques**

<b>Introduction.....</b>	<b>34</b>
<b>III.1 Qualité de l'énergie électrique .....</b>	<b>34</b>
<b>III.1.1. Qualité de la tension.....</b>	<b>34</b>
➤ Amplitude.....	34
➤ Fréquence.....	35
➤ Forme d'onde.....	35
➤ Symétrie.....	35
<b>III.1.2. Qualité du courant.....</b>	<b>35</b>
<b>III.2. Les perturbations électriques dans les réseaux électriques.....</b>	<b>35</b>
<b>III.2.1. Les variations de tension.....</b>	<b>35</b>
<b>III.2.2. Déséquilibre de tension .....</b>	<b>36</b>
<b>III.2.3. Les surtension.....</b>	<b>36</b>
<b>III.2.4. Creux de tension et coupures brèves.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.5. Fluctuation de tension.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.6. Variation de fréquence.....</b>	<b>37</b>

<b>III.3. Les harmoniques.....</b>	<b>37</b>
<b>III.3.1. Définitions des harmoniques .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3.2. Les perturbations harmoniques.....</b>	<b>38</b>
<b>III.3.3. Caractéristique des perturbations harmoniques .....</b>	<b>38</b>
➤ Charge linéaire.....	38
➤ Charge non linéaire.....	38
<b>III.4. Caractéristiques d'un signal.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.1. Rang d'un harmonique.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.2. Représentation spectrale.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.3. décomposition d'un signal périodique en série de Fourier .....</b>	<b>39</b>
<b>III.5. valeurs caractérisant un signal déformé.....</b>	<b>40</b>
<b>III.5.1. Valeur efficace d'une grandeur déformée.....</b>	<b>40</b>
<b>III.5.2 Le taux de distorsion harmonique TDH.....</b>	<b>41</b>
➤ Le facteur de distorsion.....	41
<b>III.5.3. Les inter-harmonique.....</b>	<b>42</b>
<b>III.5.4. Les sources de pollution harmoniques.....</b>	<b>42</b>
<b>III.5.4.1. Les charges domestiques.....</b>	<b>42</b>
<b>III.5.4.2. Les charges industrielles.....</b>	<b>42</b>
<b>III.6. Méthodes et procédés d'atténuation harmonique.....</b>	<b>44</b>
<b>III.6.1. Utilisation d'une inductance (self) série.....</b>	<b>44</b>
<b>III.6.2 Filtres passifs d'harmoniques.....</b>	<b>44</b>
➤ Filtre résonant .....	44
<b>III.6.3. Filtre amorti.....</b>	<b>45</b>
<b>III.6.4. Filtrage actif.....</b>	<b>45</b>
<b>III.6.5. Filtrage hybride.....</b>	<b>46</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>46</b>
 <b>CHAPITRE IV</b>	
<b>Simulation.</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>47</b>
<b>IV.1 Filtres utilisés dans notre simulation.....</b>	<b>47</b>
<b>IV.2 Description du modèle.....</b>	<b>48</b>
<b>IV.3 Caractéristique du modèle.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.4 Résultats des simulations.....</b>	<b>50</b>

## SOMMAIRE

---

<b>IV.4.1 Système sans filtrage et sans compensation.....</b>	<b>50</b>
<b>IV.4.2 Système sans filtrage et avec compensation.....</b>	<b>59</b>
<b>IV.4.3 Système avec filtrage et avec compensation.....</b>	<b>67</b>
<b>Comparaison et interprétation.....</b>	<b>76</b>
<b>IV.5 Conclusion.....</b>	<b>76</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>77</b>

Introduction générale :

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter et à des conditions d'environnement très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Le transport se fait, en outre, sur de longues distances en utilisant des lignes de grande capacité de transport. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable a substantiellement augmenté. La stabilité de tension du réseau est alors caractérisée par sa capacité de maintenir la tension aux bornes de la charge dans les limites spécifiées dans le fonctionnement normale.

L'étude du comportement de la tension et de la compensation d'énergie dans les réseaux électriques est devenue une préoccupation majeure des exploitants et planificateur de ces systèmes. En fait, plusieurs incidents généralisés survenus dans le monde ont été associés à des instabilités de tension. Ce mode d'instabilité n'est pas encore bien maîtrisé. En effet, le mécanisme causant l'instabilité de tension semble l'un des plus importants problèmes à clarifier. Aujourd'hui encore, il n'y a pas une théorie disponible et largement acceptée pour l'analyse de la stabilité de tension. Les problèmes liés à ce type d'instabilité constituent alors, dans plusieurs pays, un axe de recherche très important.

Des relevés sur les incidents survenus durant les dernières décennies ont montré que l'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes. Ce réseau s'affaiblit et sa consommation réactive s'accroît. Le phénomène est alors caractérisé par une baisse progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices, et qui va en s'accroissant au bout de quelques minutes. La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être : manque de tension, augmentation des pertes réactives du réseau. La défaillance du réglage de la tension, au niveau des bornes des groupes, a pour conséquence une accélération de la dégradation du plan de la tension qui peut aller jusqu'à des déclenchements, en cascade, de groupes et de lignes et un effondrement général du réseau.

En plus d'assurer la stabilité et la continuité de service des réseaux électriques, les exploitants et les planificateurs des réseaux électriques, cherchent toujours à optimiser la production d'énergie électrique, traduite par la réduction des pertes actives et réactives. La satisfaction simultanée de ces objectifs contradictoires fait appel à des méthodes de compensation d'énergie électrique.

Ce travail traite le problème de la compensation de l'énergie réactive lors d'une charge non linéaire. Des notions de base relative à la puissance réactive, les modes et les moyens de compensation ont été présentées. Aussi les perturbations électriques dans les réseaux électriques a retenue aussi l'intérêt dans ce mémoire.

Dans le premier chapitre, des notions générales sur l'énergie électrique, le facteur de puissance et la stabilité de tension du réseau électriques sont présentées. Les différentes définitions liées à la puissance réactive.

Le deuxième chapitre, s'adresse aux techniques et moyens de compensation de l'énergie réactive classiques et modernes, voir la compensation par batteries de condensateurs, par inductances, les compensateurs synchrone et les compensateurs statique.

Le troisième chapitre est consacré à présenter les perturbations électriques dans un réseau électrique, la qualité de l'énergie électrique, les harmoniques, le filtrage sont décrits d'une façon plus détaillé.

Le quatrième chapitre, est dédié à l'application et la simulation d'un réseau électrique compensé. Le problème des harmoniques, le filtrage et la variation de l'angle d'amorçage est traité à travers des courbes comparative au fonctionnement normal du réseau et en fin nous terminerons par une conclusion générale.

**Introduction :**

L'énergie électrique est parmi les biens de consommation, un des plus rapidement mis à la disposition des utilisateurs. Il suffit de brancher à la source permanente d'alimentation électrique (prise) le récepteur (télévision, ventilateur, frigidaire, lampe ...) et l'énergie est là instantanément, provenant d'une centrale de production située peut être à plusieurs centaines de kilomètres. Du fait que les délais de commande et de transport sont absolument nuls, on parlera de transmission d'énergie au lieu de transport car l'énergie électrique se communique sans transport simultané de matière.

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie active, la partie réactive ne peut pas être éliminée, mais compensée par des dispositifs appropriés. Ces dispositifs de compensation sont très utiles car il faut disposer à chaque instant de la puissance active nécessaire augmentée des pertes entraînée par son transport. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

Les économies d'énergie réalisées sont d'une grande importance vue les efforts humains et matériels qui sont investis quotidiennement pour garantir la continuité et la qualité de service. Dans ce chapitre, nous allons parler du principe de la compensation de l'énergie réactive en évoquant les différentes techniques entreprises pour sa concrétisation.

**I.1.1. Energies active, réactive, apparente :**

Tout système électrique (câble, ligne, transformateur, moteur, éclairage,..) utilisant un courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

- **L'énergie active consommée (KWh) :** résulte de l'utilisation de puissance active  $P(KW)$  par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en énergie mécanique, aussi thermique ou lumineuse.
- **L'énergie réactive consommée (KVARh) :** sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines (transformateurs et moteurs). De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. Elle correspond à la puissance réactive  $Q(KVAR)$  des récepteurs.
- **L'énergie apparente (KVAh) :** est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente  $S(KVA)$  des récepteurs, somme vectorielle de  $P(KW)$  et  $Q(KVAR)$ .

**I.1.2. Composante active et réactive du courant :**

A chacune de ces énergies active et réactive correspond un courant. Le courant actif ( $I_a$ ) est en phase avec la tension du réseau. Le courant réactif ( $I_r$ ) est déphasé de  $90^\circ$  par rapport au courant actif, soit en retard (récepteur inductif), soit en avance (récepteur capacitif).

Le courant apparent ( $I_t$ ) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel.

Ces courants se composent alors vectoriellement comme représenté à la figure I.1 :

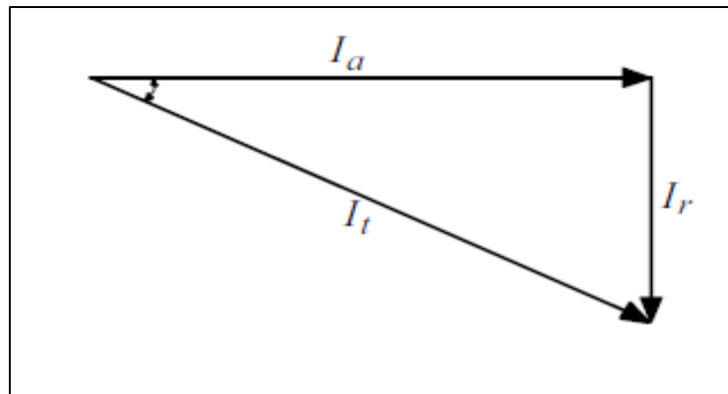


Figure I.1 : composante vectorielle des courants

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{I.1})$$

$$I_a = I \cdot \cos \varphi \quad (\text{I.2})$$

$$I_r = I \sin \varphi \quad (\text{I.3})$$

### I.1.3. Composante réactive et active de la puissance :

Pour des courants et des tensions ne comportant pas des composantes harmoniques, le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances ; il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

On définit aussi pour un circuit monophasé :

$$P = UI \cos \varphi : \text{puissance active en (kW)}. \quad (\text{I.4})$$

$$Q = UI \sin \varphi : \text{puissance réactive en (kVAR)}. \quad (\text{I.5})$$

$$S = UI : \text{puissance apparente en (kVA)}. \quad (\text{I.6})$$

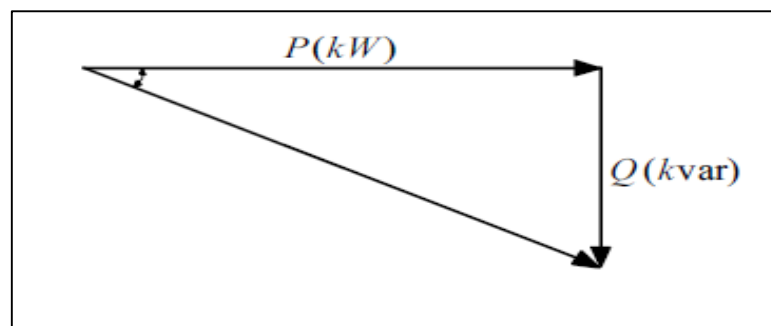


Figure I.2 : composition vectorielle des puissances

$S$  = puissance apparente.

$P$  = puissance active.

$Q$  = puissance réactive.

$\varphi$  = déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension).

$P$ ,  $Q$ ,  $S$  et  $\varphi$  sont reliés par ces relations :

$$P = S \cos\varphi \quad (\text{I.7})$$

$$Q = S \sin\varphi \quad (\text{I.8})$$

$$Q = P \operatorname{tg}\varphi \quad (\text{I.9})$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I.10})$$

#### I.1.4. Puissance dans un récepteur monophasé :

On représente sur la figure I.3 un récepteur monophasé soumis à une tension alternative  $v$  et dans lequel circule un courant alternatif  $i$ , avec  $\varphi$  comme déphasage entre la tension et le courant.

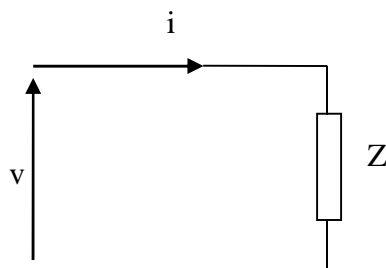


Figure I.3 : Récepteur monophasé

$$v = V\sqrt{2} \sin \omega t \quad (\text{I.11})$$

$$i = I\sqrt{2} \sin (\omega t - \varphi) \quad (\text{I.12})$$

La puissance instantanée consommée par le récepteur  $Z$  est donnée par la relation suivante :

$$P = v.i \quad (\text{I.13})$$

En remplaçant  $v$  et  $i$  par leurs expressions respectives on obtient :

$$P = V\sqrt{2} \sin \omega t .I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) = 2VI \sin\omega t. \sin(\omega t - \varphi). \quad (\text{I.14})$$

A l'aide des relations trigonométriques et après développement, on obtient l'expression finale de la puissance instantanée qui est composée de deux termes :

$$P = \underbrace{VI \cos\varphi (1 - \cos 2\omega t)}_1 - \underbrace{VI \sin\varphi \sin 2\omega t}_2 \quad (\text{I.15})$$

La valeur moyenne du terme (1) représente la puissance active fournie par la source au récepteur. Le deuxième terme a une valeur moyenne nulle ; c'est la composante qui caractérise par son amplitude l'échange de puissance réactive entre le récepteur et la source. Cet échange est de nature fluctuante et s'effectue à la pulsation  $2\omega$ . Cette notion de puissance réactive apparaît lorsqu'il y'a un déphasage entre la tension et le courant qui traverse le récepteur ; c'est le cas des récepteurs composant des condensateurs ou des inductances en régime sinusoïdal. L'apparition de la puissance réactive est due à la circulation d'un courant réactif qui ne donne lieu à aucun échange de puissance moyenne, ce courant peut être à l'origine de pertes et de chutes de tension. En régime sinusoïdal, les puissances réactives produites et consommées ne conservent au même titre que les puissances actives.

En ce qui concerne la puissance apparente, elle est surtout utilisée pour le dimensionnement des appareils et des machines. Contrairement aux puissances actives et réactives, la puissance apparente ne se conserve pas.

### I.1.5. Puissance dans un récepteur triphasé :

On représente sur la figure I.4 un récepteur triphasé symétrique qui est alimenté par un système de tensions triphasées équilibrées.

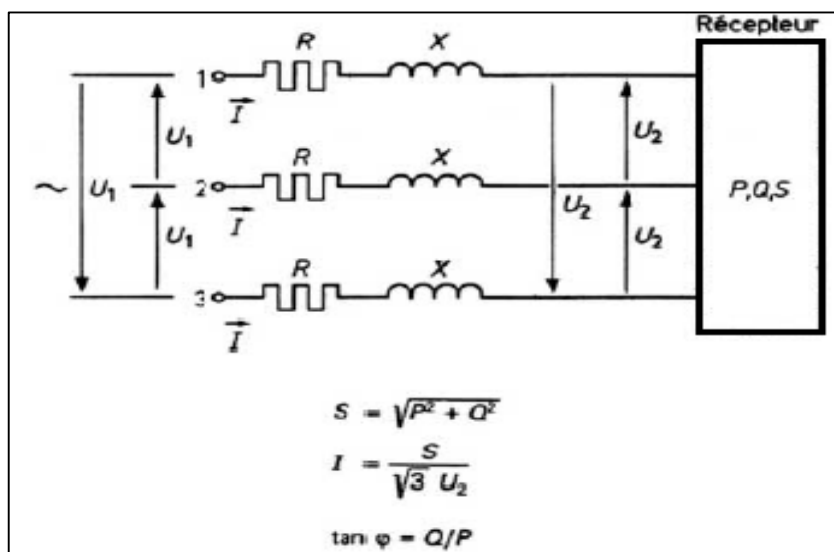


Figure I.4 : Elément de réseau triphasé symétrique.

Les puissances active, réactive et apparente pour un tel système sont d'expressions suivantes :

- **Puissance active** : égale à la valeur moyenne de la puissance instantanée soit :

$$P = 3VI \cos\varphi = \sqrt{3} UI \cos\varphi \quad (\text{I.16})$$

Avec U: tension composée.

V: tension simple.

- **Puissance réactive** : la somme des puissances fluctuantes des trois phases du système est nulle mais chaque phase séparément fait circuler une puissance réactive de valeur moyenne nulle et d'amplitude  $VI \sin\varphi$ . Donc il faut tenir compte de cette puissance qui est pour l'ensemble du système d'expression :

$$Q = \sqrt{3} VI \sin\varphi \quad (\text{I.17})$$

- **Puissance apparente** : A partir des deux puissances précédente on définit cette troisième comme suit :

$$S = \sqrt{3} UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I.18})$$

Le tableau I.1 récapitule toutes les notions qu'on vient d'évoquer. Pour mieux comprendre, on a appliqué une tension de forme  $Ve^{j\theta}$  à des récepteurs de comportements différents (résistif, inductif et capacitif). C'est l'impédance  $\bar{Z}$  du récepteur qui détermine la nature et le sens de la puissance.

Impédance (z) en $\Omega$	Puissance active (P) en kW	Puissance réactive (Q) en kVAR	Energie (W)	Déphasage ( $\varphi$ ) et facteur de puissance $\cos\varphi$	observation
$\bar{Z}=R$ (résistance)	$P=RI^2$	$Q=0$	$W=\frac{U^2 t}{R}$	$\varphi=0 \rightarrow \cos \varphi=1$	Energie active dissipée
$\bar{Z}=jL\omega$ (inductance)	$P=0$	$Q=L\omega I^2$	$W=\frac{1}{2}LI^2$	$\varphi=\frac{\pi}{2} \rightarrow \cos \varphi=0$	Energie réactive emmagasinée
$\bar{Z} = \frac{1}{jC\omega}$ (capacité)	$P=0$	$Q=\frac{-I^2}{C\omega}$	$W=\frac{1}{2}CU^2$	$\varphi=-\frac{\pi}{2} \rightarrow \cos\varphi=0$	Energie réactive fournie (par la charge)

Tableau I.1 : Bilan de puissance pour les différents récepteurs de base.

On constate que l'énergie réactive n'existe que lorsque le courant est déphasé par rapport à la tension .Le sens de l'échange de cette énergie dépend uniquement de la nature de l'impédance Z, c'est-à-dire :

- La puissance réactive résistive est nulle : aucun échange de puissance réactive entre la source et le récepteur. C'est le cas d'une impédance résistive qui consomme uniquement la puissance active ; la tension et le courant sont en phase.
- La puissance réactive inductive : le récepteur absorbe une puissance réactive fournie par la source. C'est le cas d'une impédance purement inductive qui ne consomme aucune puissance active ; le courant est en retard de  $+\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension.
- La puissance réactive capacitive : le récepteur fournit une puissance réactive à la source. C'est le cas d'une impédance purement capacitive qui ne donne lieu à aucune puissance active ; le courant est en avance de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension.

### I.1.6. Facteur de puissance :

#### I.1.6.1. Définition du facteur de puissance :

Par définition le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ; c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1, on l'appelle également  $\cos\varphi$ .

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{Puissance active}}{\text{Puissance apparente}} \quad (\text{I.19})$$

$$Fp = \frac{P(KW)}{S(KVA)} \quad (\text{I.20})$$

Si les courants de tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal à  $\cos\varphi$ , c'est-à-dire :

$$Fp = \cos \varphi = \frac{P(KW)}{S(KVA)} \quad (\text{I.21})$$

On utilise également la variable  $\text{tg}\varphi$ . Dans les mêmes conditions, nous avons également la relation :

$$\text{Tg}\varphi = \frac{Q(KVAR)}{P(KW)} = \frac{\text{Puissance réactive}}{\text{Puissance active}} \quad (\text{I.22})$$

On définit un facteur de puissance moyen dans un intervalle donné dans le cas où les grandeurs P et S ne sont pas constantes. On obtient alors le facteur de puissance en effectuant le rapport énergétique des puissances mesurées dans l'intervalle de temps correspondant :

$$Fp_{\text{moy}} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = (\cos \varphi)_{\text{moy}} \quad (\text{I.23})$$

$$\text{Où} \quad \text{Tg}\varphi_{\text{moy}} = \frac{Q(KVAR)}{P(KW)} \quad (\text{I.24})$$

Le facteur de puissance est une grandeur très utile qui permet d'évaluer la consommation ou l'apport en puissance réactive de l'élément mis en jeu. En effet, si le facteur de puissance est proche de 1, cette donnée nous permet de constater que l'élément étudié ne consomme pratiquement aucune puissance réactive, il ne consomme que de la puissance active. Contrairement, si le facteur de puissance est proche de 0, cela nous permet de constater

que cet élément consomme uniquement la puissance réactive. Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus grande qu'il se rapproche de 0.

Les valeurs approximatives de  $\cos\varphi$  des principaux actionneurs consommateurs d'énergie réactive comme suit :

- Moteur asynchrone à 100% de charge :  $\cos\varphi = 0.85$ .
- Moteur asynchrone à 50% de charge :  $\cos\varphi = 0.73$ .
- Lampe à incandescence :  $\cos\varphi = 1$
- Lampe à fluorescence :  $\cos\varphi = 0.5$
- Chauffage par induction :  $\cos\varphi = -0.5$

Ces exemples montrent l'importance de la partie réactive de la consommation énergétique des actionneurs qui comportent des circuits magnétiques.

Un bon facteur de puissance c'est  $\cos\varphi$  plus élevé plus proche de 1 ou  $\tan\varphi$  est trop faible proche de 0, il permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation d'énergie réactive.
- La diminution de la puissance souscrite en KVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte –tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire.

#### **I.1.6.2. Causes du mauvais facteur de puissance :**

Dans une installation bien dimensionnée, un bon facteur de puissance est obtenu lorsque chaque machine consomme une puissance active proche de sa valeur nominale. Mais il reste toujours que cette installation consomme une certaine puissance réactive due au courant magnétisant des transformateurs et des moteurs asynchrones. Cette puissance est indépendante de puissance active consommée par l'élément de l'installation. Maintenant, le mauvais facteur de puissance est obtenu lorsque la puissance active absorbée diminue, c'est-à-dire que les éléments de l'installation consomment des puissances actives loin de leurs valeurs nominales. Donc  $\cos\varphi$  diminue, ce qui risque des pénalités pour le consommateur.

En pratique, une mauvaise utilisation du matériel résulte souvent un mauvais facteur de puissance, à titre d'exemple ;

- Un transformateur qui fonctionne à vide à faible charge.
- Un fonctionnement à niveau de tension d'alimentation élevée ou à des marches à vides ou à faibles charges pour les moteurs asynchrones.

- Une mauvaise conception de l'éclairage fluorescent.

### I.2. Utilité de la puissance réactive :

La notion de puissance réactive est utilisée lorsqu'il existe un déphasage entre la tension et le courant qui traverse le récepteur, c'est-à-dire lorsque celui-ci comporte des inductances ou des condensateurs en régime sinusoïdale. Elle caractérise l'existence d'une composante du courant ( $\bar{I}_r$ ) qui ne donne lieu à aucun échange de puissance moyenne mais qui occasionne des pertes et des chutes de tension quand elle est transportée.

Mais la puissance réactive se révèle très utile voir indispensable dans l'exploitation des réseaux électriques quand elle est produite en un lieu stratégique (compensation). Toute machine électrique a besoin d'être excitée pour fonctionner (moteurs, générateurs, transformateurs), cette excitation est assurée par le courant réactif qui correspond à la puissance réactive.

Ainsi toute installation à facteur de puissance différent de zéro appelle en plus de sa consommation active une certaine puissance réactive.

### I.3. Circulation de la puissance réactive et ses effets :

La circulation de l'énergie réactive a des influences importantes sur le choix des matériels et le fonctionnement des réseaux. Elle a, par conséquent, des incidences économiques. En effet, pour une même puissance active  $P$  utilisée, la figure I.5 montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente ( $S_2 > S_1$ ) que le  $\cos\varphi$  est faible, c'est-à-dire que l'angle  $\varphi$  est élevé

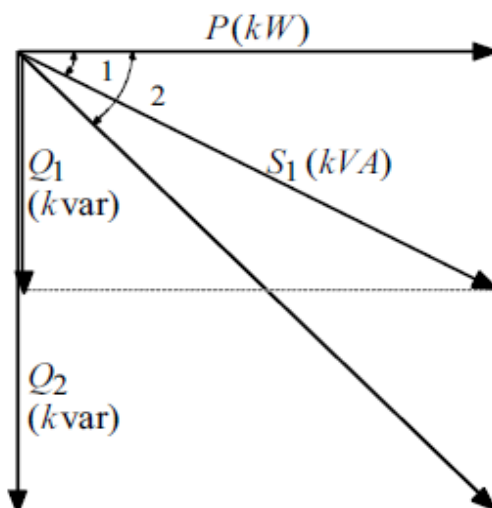


Figure I.5 : influence du  $\cos\varphi$  sur la valeur de la puissance apparente.

De façon identique, sur la figure I.5, pour un même courant actif utilisé  $I_a$  (pour une tension constante  $U$  du réseau), il faut fournir d'autant plus de courant apparent ( $I_2 > I_1$ ) que le  $\cos\varphi$  est faible (l'angle  $\varphi$  est élevé).

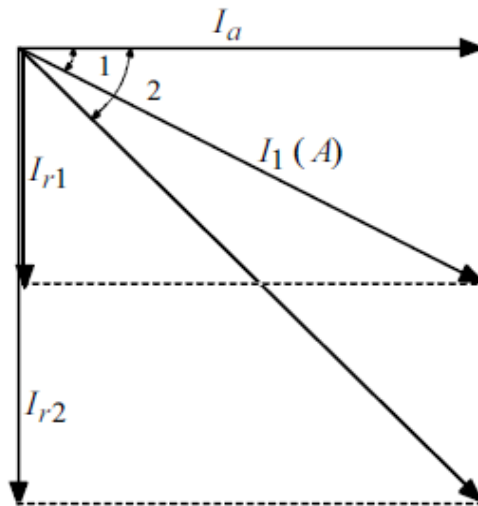


Figure I.6 : influence du  $\cos\varphi$  sur la valeur du courant apparent.

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant apparent, la circulation d'énergie réactive provoque :

- Des surcharges et des échauffements supplémentaires dans les transformateurs et les câbles qui ont pour conséquences des pertes d'énergie active (pertes joule).
- Des chutes de tension

Les conséquences de la circulation d'énergie réactive conduisent à surdimensionner les équipements électriques du réseau.

### I.3.1. Pertes joule :

Afin de déterminer les pertes joule engendrées par le transit d'une puissance réactive  $Q$ , on se propose à étudier le réseau monophasé illustré dans la figure I.7.

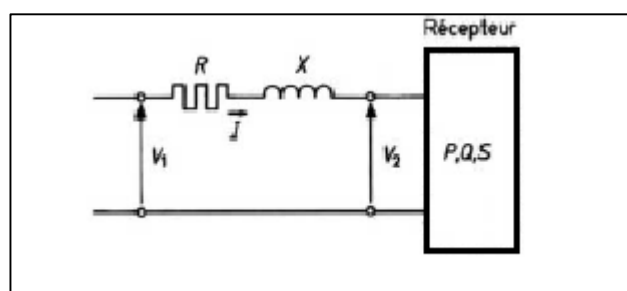


Figure I.7 : réseau monophasé

Le réseau considéré est représenté par une résistance  $R$  en série avec une inductance  $X$ . l'ensemble fournit une puissance active  $P$  et échange une puissance réactive  $Q$  avec un récepteur monophasé.

Le courant circulant dans le réseau a une valeur efficace  $I$  égale :

$$I = \frac{S}{V_2} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V_2} \quad (\text{I.25})$$

$V_2$  : valeur efficace de la tension aux bornes du récepteur.

$S$  : puissance apparente consommée par le récepteur.

La puissance absorbée par la résistance  $R$  est transformée en chaleur. C'est par définition les pertes joules engendrées par le transport de la puissance à travers cette résistance. Ces pertes sont d'expression :

$$P_j = R \cdot I^2 = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{V_2^2} \quad (\text{I.26})$$

$$P_j = \frac{RP^2}{V_2^2} + \frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{V_2^2} \quad (\text{I.27})$$

Une partie des pertes joule ( $\frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{V_2^2}$ ) est occasionnée par le transit de la puissance réactive. Pour le réseau triphasé on applique le même principe et on aura les résultats suivants :

$$P_j = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (\text{I.28})$$

En remplaçant la valeur efficace du courant par :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U_2} \quad (\text{I.29})$$

On obtient alors:

$$P_j = 3 \cdot R \cdot \left( \frac{S}{\sqrt{3} U_2} \right)^2 = \frac{3 \cdot R \cdot (P^2 + Q^2)}{3 \cdot U_2^2} = \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{U_2^2} \quad (\text{I.30})$$

$$P_j = \frac{RP^2}{U_2^2} + \frac{RP^2 \cdot tg^2\varphi}{U_2^2} \quad (\text{I.31})$$

La partie des pertes joule qui est occasionnée par le transit de la puissance réactive est le terme :  $\left( \frac{RP^2(1 + tg^2\varphi)}{U_2^2} \right)$

Le transport de la puissance réactive engendre des pertes joule considérable, d'où la nécessité de réduire au mieux le transport de cette puissance indispensable pour le fonctionnement des machines.

### I.3.2. chute de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel consommation et production sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte au nœud du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

Considérant maintenant sur la figure I.8 le schéma équivalent d'une ligne de transmission ; d'impédance complexe  $Z = R + j X$ , et destinée à alimenter la charge  $Z_c$ . La tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1, l'extrémité 2 absorbant une puissance :  $S_2 = P_2 + jQ_2$

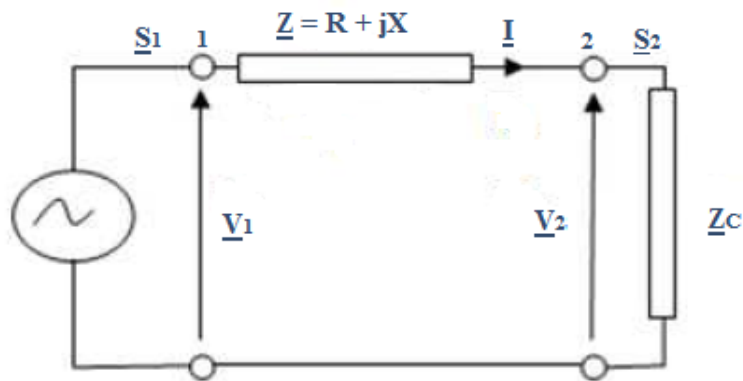


Figure I.8 : circuit équivalent du réseau électrique.

Les puissances apparentes :

$$S_1 = P_1 + jQ_1 \quad (I.32)$$

$$S_2 = P_2 + jQ_2 \quad (I.33)$$

La relation qui relie les tensions est donnée par :

$$V_1 = V_2 + R.I + j X.I \quad (I.34)$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur la figure I.9 :

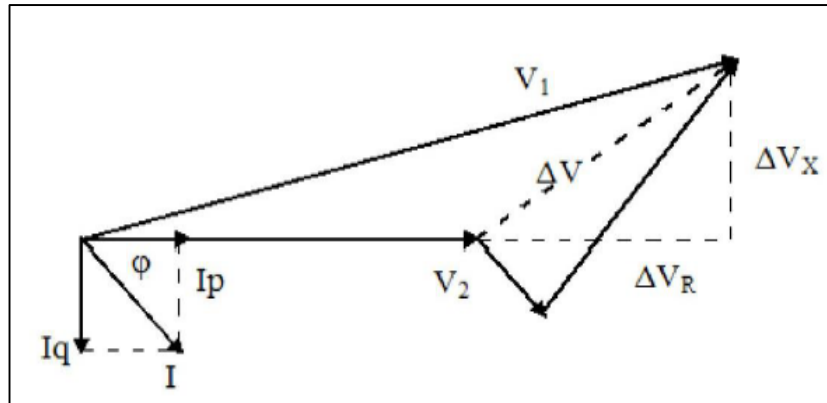


Figure I.9 diagramme vectoriel des tensions.

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme des tensions conduit à assimiler la chute de tension  $\Delta V$  à :

$$\Delta V = V_1 \cos \varphi - V_2 \quad (\text{I.35})$$

L'angle de transport étant petit (réseau peu chargé), si  $\varphi$  désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité récepteur 2, on peut écrire pour un réseau monophasé :

$$\Delta V = R.I \cos \varphi + X.I \sin \varphi \quad (\text{I.36})$$

$$\Delta V = R.I \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + X.I \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad (\text{I.37})$$

$$\Delta V = \frac{R.P_2 + X.Q_2}{V_2} \quad (\text{I.38})$$

On considère  $U$  étant la tension composée dans un réseau triphasé correspondante à  $V$ ,  $P$  et  $Q$  les transits triphasés des puissances, on obtient alors l'écart relatif de tension :

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{R.P + X.Q}{U^2} \quad (\text{I.39})$$

Pour les lignes de transport HT, nous pouvons supposer que  $R \ll X$  ( $R \rightarrow 0$ ). L'écart de tension entre deux points du réseau sera réduit à

$$\Delta U = \frac{X.Q}{U} \quad (\text{I.40})$$

Cette dernière relation montre bien que la chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par la charge.

### I.3.3. Augmentation des investissements :

C'est par rapport au dimensionnement des installations ; l'intensité  $I$  du courant qui circule dans un élément de réseau triphasé est égale à :

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3}U} \quad (\text{I.41})$$

La section des conducteurs (des lignes, des transformateurs) est définie par le courant admissible. Les transformateurs ou les câbles deviennent chers au fer et à mesure qu'ils ont de grandes caractéristiques en courant. Nous allons considérer une compensation au bout de la ligne, en produisant la puissance réactive juste au point de consommation. L'intensité du courant sur la ligne sera réduite par une réduction de  $Q$  par conséquent la caractéristique en courant de la ligne ou du transformateur démunie et par suite le prix de revient.

Par ailleurs le courant admissible dans un élément de réseau étant limité par les échauffements thermiques, tout transit de puissance réactive réduit les possibilités de transport de puissance active. Pour satisfaire une même consommation de puissance active, il faut donc augmenter la capacité des matériels utilisés ou leurs nombre, ce qui se traduit par une augmentation des investissements.

### I.3.4. Coté économique :

Le transit de l'énergie réactive à travers les réseaux de transport d'énergie n'arrange pas le distributeur. Etant donné que le courant admissible circulant dans un réseau est limité par des échauffements thermiques, tout transit de puissance réactive engendra une diminution du transport de la puissance active. Pour satisfaire une même consommation de puissance active, il faut augmenter la capacité et le nombre des matériaux utilisés, ce qui conduira à une augmentation des investissements.

## I.4. Principe de la compensation d'énergie réactive :

Les réseaux de transport et d'interconnexion en très hautes tension (THT) et haute tension (HT) permettent d'acheminer l'énergie électrique des centres de production jusqu'au consommateur à tout instant.

Précédemment nous avons vu que le transit de la puissance réactive engendre des perturbations (pertes joule et chutes de tension), or que cette puissance est indispensable pour faire fonctionner les machines et les transformateurs, il est donc nécessaire de produire l'énergie réactive auprès de la demande pour :

- Réduire les pertes joule et les chutes de tension.
- Permettre de transporter plus de puissance.
- Eviter le sur dimensionnement des réseaux.

## **I.5. Les grands consommateurs d'énergie réactive :**

### ***a- Machines à excitation (générateurs et moteurs) :***

Les machines fonctionnant avec l'électricité ont toujours besoin d'un courant magnétisant pour que le fonctionnement soit possible. Le courant magnétisant n'est autre que la partie réactive du courant ( $I_r = I \sin\phi$ ), il met en évidence la quantité d'énergie réactive demandée.

Le moteur asynchrone à rotor court-circuité peut être représenté en schéma simplifié comme un transformateur de puissance, d'où une consommation permanente et importante d'énergie réactive qui augmente avec le couple transmis.

### ***b- Systèmes d'électroniques de puissance :***

En électronique de puissance le facteur de puissance est différent du  $\cos\phi$  car le régime est alternatif non sinusoïdal. Les systèmes d'électronique de puissance sont connus avec un facteur de puissance relativement mauvais, cela se traduit par une grande consommation de puissance réactive.

Nous pouvons citer en plus, les locaux informatiques et les consommations d'énergie réactive faites dans les ménages par les récepteurs à base d'électronique de puissance (lampes LBC et autres).

### ***c- Industries :***

- Les industries utilisant la force motrice (utilisant les moteurs asynchrones et autres pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique ou en chaleur) font intervenir de considérable consommation d'énergie réactive.
- Les industries métallurgiques comme les aciéries et les industries de chemin de fer (traction électrique) consomment eux aussi de grandes quantités de puissance réactive selon leur principe de fonctionnement.

## **I.6. Compensation de l'énergie réactive des réseaux de transport :**

Les réseaux de transport et de répartition présentent des niveaux de tension très élevés et leurs caractéristiques seront forcément différentes de celles qui caractérisent les réseaux de distribution qui ont des niveaux de tension relativement bas. On distingue alors :

### **➤ Caractéristiques des réseaux de transport et de répartition :**

- Présence de groupes de production, raccordés pour la plus part au réseau THT, et qui constituent les sources de tension grâce aux forces électromotrices des alternateurs.
- Absence des clients raccordés directement au réseau HT, uniquement à travers des Transformateurs propres, ce type de consommateur dispose souvent de moyens de réglage de la tension sur leurs installations.
- Les réseaux THT et HT sont caractérisés par une structure maillée.

- Pertes et chutes de tension occasionnées essentiellement par le transit de la puissance réactive
- Sur les réseaux de transport et de réparation, on fait la compensation afin de réduire au minimum le transit de la puissance réactive et d'avoir un plan de tension aussi haut que possible ce qui va limiter les pertes joule tout en tenant compte de la tenue des matériaux (lignes, câbles, transformateurs).

➤ **Caractéristique des réseaux de distribution :**

- Absence des groupes de production.
- Présence de clientèle raccordée directement au réseau basse tension.
- Les réseaux de distribution sont caractérisés par une structure arborescente
- Les pertes et les chutes de tension sont essentiellement occasionnées par le passage de la puissance active.

Sur les réseaux de distribution, l'objectif de la compensation est de maintenir la tension aussi proche que possible de la valeur admissible en vue de réaliser une bonne utilisation des équipements électriques.

Sur les réseaux haute tension (HT), il existe des sommets à une tension tenue, et c'est le cas des sommets comportant des postes ou sont raccordées des groupes de production, qui en effet peuvent maintenir la tension constante aux bornes des alternateurs ; c'est le cas des secondaires des transformateurs THT/HT dont la tension peut être maintenue sensiblement constante grâce à l'action des régulateurs en charge.

La tension en tout autre sommet du réseau n'est autre que du sommet à tension tenue, diminue des chutes de tension à travers des lignes de transmission. Sur les réseaux THT et HT, ces chutes de tension sont principalement dues au transit de la puissance réactive. Donc pour contrôler la tension en ces sommets, il faut contrôler la cause qui donne naissance aux variations de cette tension. C'est-à-dire, contrôler le transit de l'énergie réactive; ce qui s'obtient par une localisation et une utilisation appropriée des moyens de compensation de cette énergie qui sont essentiellement des condensateurs et des inductances. Ainsi grâce à des condensateurs installés dans les postes HT/MT, le transit de la puissance réactive sur les réseaux de transport sera réduit par une compensation d'une grande partie de la consommation des charges. D'autre part grâce aux groupes ou inductances raccordées aux réseaux THT, les pertes réactives dans les ouvrages (lignes, câbles, transformateurs) sont compensées.

### **I.7. Description de l'instabilité en tension :**

On dit qu'un réseau d'énergie électrique est stable en tension dans des conditions d'exploitation données, lorsque suite à une perturbation petite, les tensions près des points de consommateurs après perturbation sont assimilables aux tensions d'avant perturbation.

Tout étant différent de l'état stable est dit instable. L'instabilité en tension est due au fonctionnement des régleurs en charge lorsque la tension du réseau diminue au-dessous d'une

certaine valeur critique. Ce phénomène se produit lorsque le réseau est très chargé, en raison des chutes de tension occasionnées par le transit des puissances active et réactive.

### **I.8. Phénomène d'écroulement de la tension :**

En pratique, la diminution de l'impédance de charge peut être le résultat soit d'une augmentation de la consommation de puissance, soit après la mise en action du régleur en charge du transformateur pour modifier le rapport de transformation afin d'élever la tension de la charge. En effet, quand la tension aux bornes de la charge baisse, pour la relever le régleur en charge entre en action pour changer le rapport de transformation ; cette baisse d'impédance engendre des chutes de tension supplémentaires du côté primaire. Au côté secondaire, deux actions à effets inverses arrivent en même temps : la première a l'effet d'une augmentation de tension provoquée par le changement de prise du régleur et la deuxième a l'effet d'une baisse de tension coté primaire provoquée par les chutes de tension.

Si la tension du primaire, malgré la diminution reste supérieure à la tension critique, l'effet du changement de prise prédomine et la tension de la charge sera augmentée. Par contre, si cette tension inférieure à la tension critique, l'action du régleur ne pourra pas compenser la baisse de tension du côté primaire; le régleur continu, alors à agir entraînant des chutes de tension de plus en plus importantes ; c'est le phénomène d'écroulement du plan de tension.

Les grandeurs, tension et de la puissance transmissible, peuvent également être représentées par les courbes des figures I..., qui donnent l'évolution de la tension de la charge en fonction de la puissance transmise.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons voulu mettre en évidence d'une part à travers les notions de puissances : la puissance réactive et l'importance du facteur de puissance (qui définit la consommation de puissance réactive) en exploitation des réseaux électriques ; d'autre part de faire paraître les raisons de compenser l'énergie réactive.

Le transport de puissance réactive à travers les réseaux de transports entraîne des pertes joules, des chutes de tension et une augmentation des investissements, l'exploitant est contraint de réduire le transport de puissance réactive. Par ailleurs le besoin d'énergie réactive est marqué par la consommation des charges ou du réseau : un point du réseau qui a un mauvais facteur de puissance présente des inconvénients mais cela peut être corrigé par l'apport de puissance réactive en ce point. Ainsi pour satisfaire à ce besoin de puissance réactive en évitant en même temps le transport de la puissance réactive on la compense.

## I. Introduction :

Les dispositifs de compensation sont constitués soit par des machines tournantes, soit par des condensateurs. Ces condensateurs élémentaires sont regroupés en série ou en parallèle pour constituer des batteries de condensateurs.

L'association des condensateurs et de bobines d'inductances commandés par des thyristors permet de réaliser des systèmes statiques, capables de produire ou d'absorber de la puissance réactive de manière continue entre deux limites.

## II.1. Batteries de condensateurs :

### II.1.1. Présentation :

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économiques et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux publics. Les moteurs synchrones peuvent également fournir de l'énergie réactive mais leur fonction principale, la force motrice, n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de puissance réactive.

Les batteries de condensateurs fournissent une partie de l'énergie réactive consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels :

- **Batteries de condensateurs HT** : raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes THT/HT, leur rôle essentiel est de compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT, mais une partie d'entre elles participent également à la compensation des charges ; leur puissance est de l'ordre de 20 à 30 MVAR et représente environ 20% du parc de condensateurs installés :
- **Batteries de condensateurs MT** : raccordées aux jeux de barres HT/MT des postes HT/MT ou THT/MT ; leur rôle principal est compenser l'appel total de l'énergie réactive fait par les réseaux de distribution aux réseaux de transport ; en fonction du réglage de tension de la MT, leur installation et dimensionnement sont fait individuellement pour chaque cas. En pratique, les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins de 2.4 ou 3 MVAR, chaque gradin à sa propre commande est l'ensemble dépend de la puissance des transformateurs HT/MT auxquels ils sont raccordés. Le dimensionnement de la taille des gradins est fait de manière à limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barres MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

### II.1.2. Les modes de compensation par batteries :

Dans une installation électrique les batteries de condensateurs peuvent être implantées à trois niveaux différents :

### A. La compensation globale :

Ce type de compensation convient pour une installation simple de moyenne puissance ; la batterie de condensateur est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la période de facturation de l'énergie réactive pour un fonctionnement normal du site.

Cette compensation représente l'avantage de :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Représenter la solution la plus économique parce que toute la puissance est concentrée en un point et le coefficient de foisonnement permet des batteries bien optimisées.

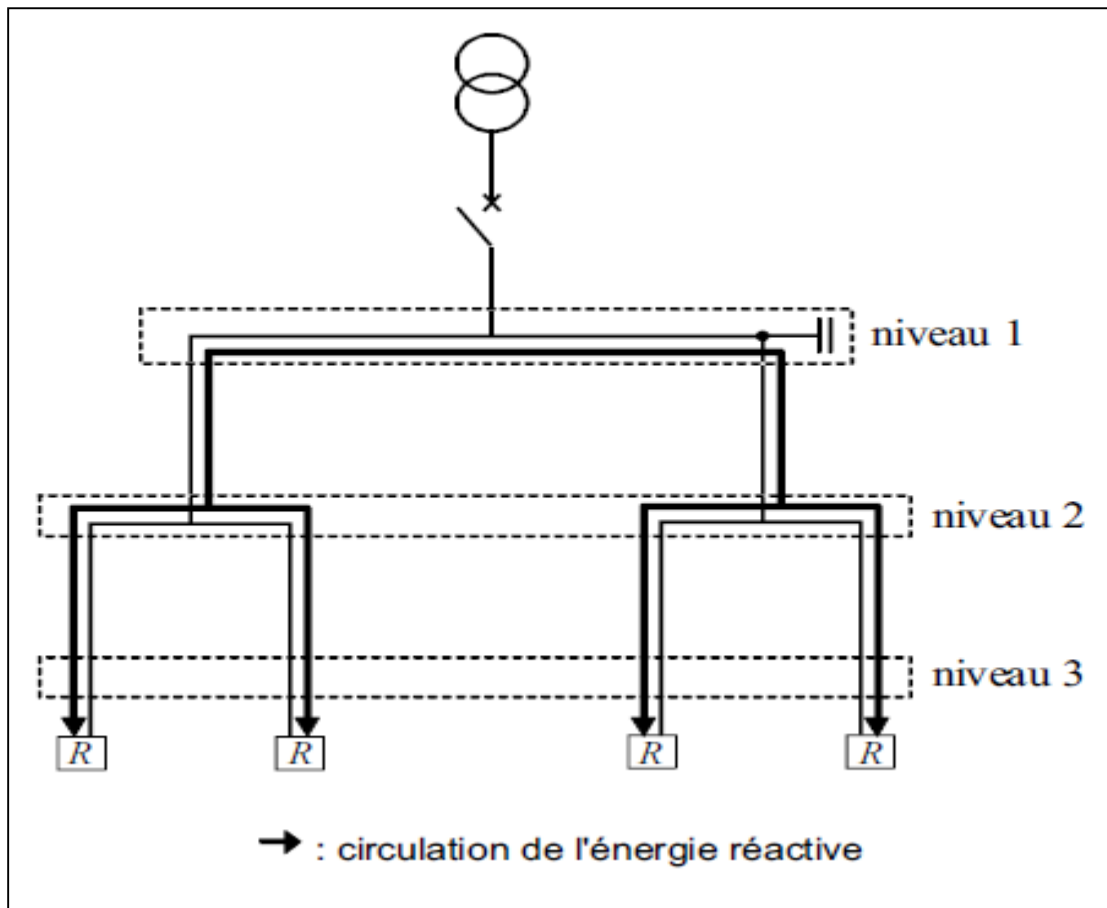


Figure II.1 : compensation globale.

### B. Compensation partielle ou par secteur :

Les condensateurs sont installés en tête du secteur d'installation à compenser. Elle convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

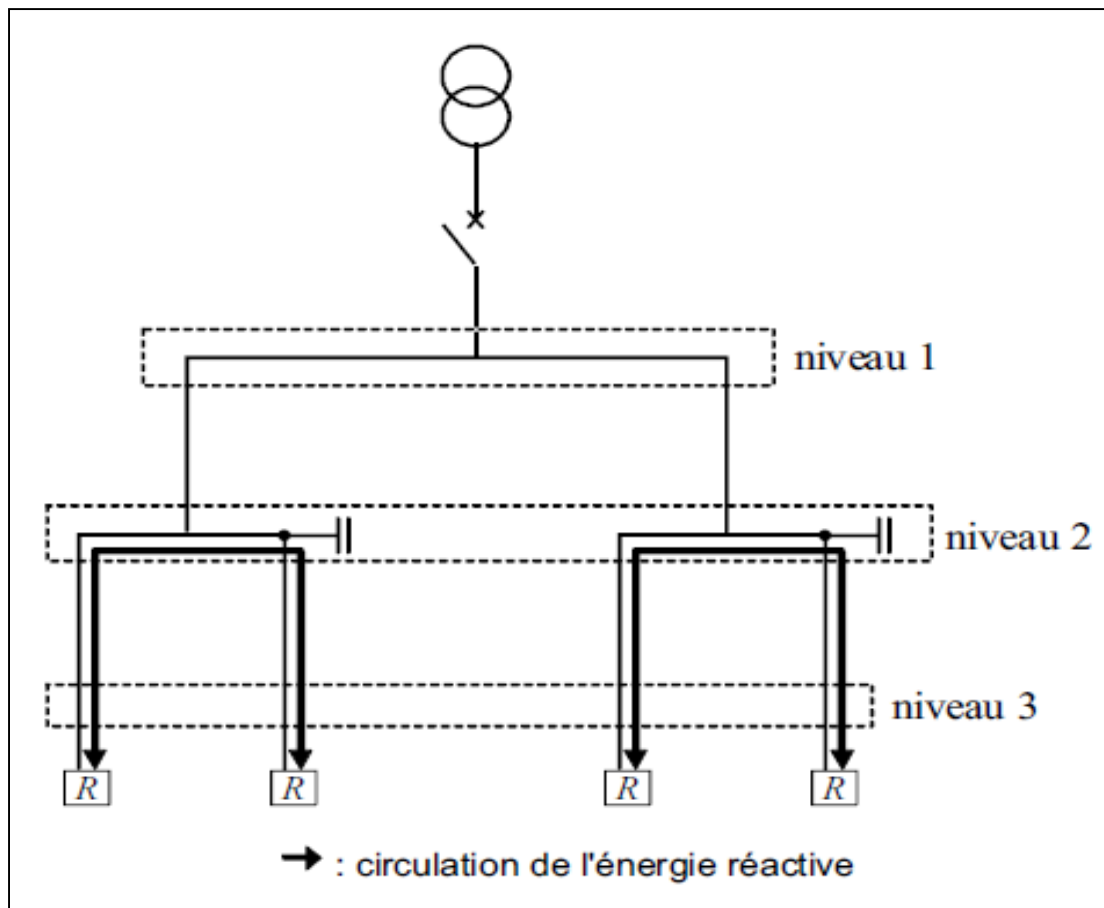


Figure II.2 : Compensation partielle.

### C. Compensation individuelle :

La batterie de condensateur est raccordée directement aux bornes de récepteurs. Elle est à envisager lorsque la puissance du récepteur est importante par rapport à la puissance du transformateur. Lorsqu'elle est possible, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins. C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantages mais qui est le plus coûteux.

Un complément en tête de l'installation peut être nécessaire au niveau du transformateur.

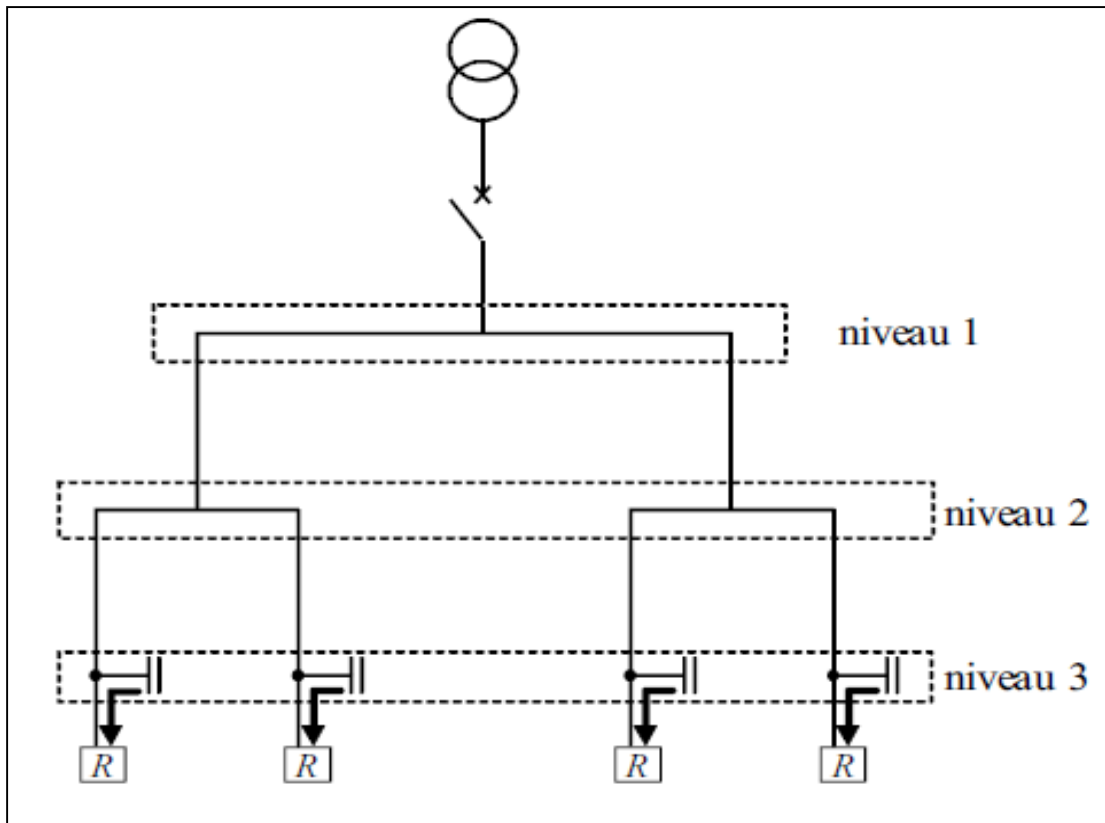


Figure II.3 : Compensation individuelle.

### II.1.3. Constitution de la batterie de condensateurs :

Chaque élément est formé de feuilles d'aluminium entre lesquelles est inséré un ensemble de trois ou quatre feuilles d'un papier spécial imprégné d'huile minérale, le tout est plié en accordéon ou enroulé. Dans le premier cas, l'élément est parallélépipédique, dans le second il est cylindrique.

Ces éléments sont disposés en séries puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile.

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt. Dans ce qui suit, nous allons donner ces deux types d'installation.

### II.1.4. Type d'installation :

#### a-Installation série :

L'installation des batteries de condensateurs en série permet de compenser les chutes de tension sur les longues lignes de transport d'énergie réactive (THT et HT). En diminuant la réactance effective de la ligne, la capacité de transit de la puissance active peut être augmentée en diminuant les chutes de tension. Considérons les calculs de la puissance de la batterie de condensateur à installer afin de compenser la chute de tension sur un réseau. La figure II.4 montre un modèle de réseau sur lequel un condensateur série est installé.

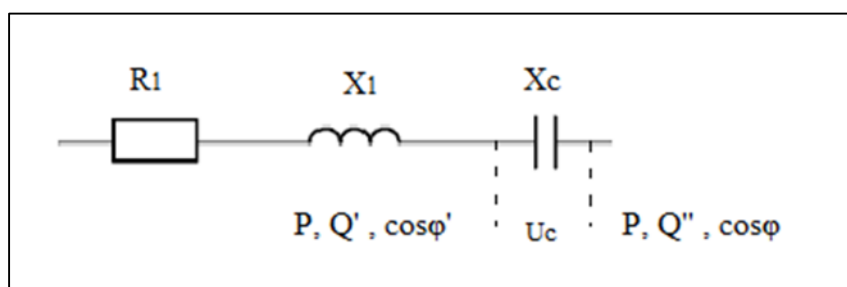


Figure II.4 : Modélisation d'une ligne compensée par un condensateur.

La puissance active P est considérée constante avant et après le condensateur, par contre les paramètres  $Q'$ ,  $U'$  et  $\cos\varphi'$  sont considérés à l'amont'',  $U''$  et  $\cos\varphi''$  à l'aval du condensateur.

Nous avons alors :

$$P = \sqrt{3} \cdot U' \cdot \cos\varphi' \cdot I \text{ de l'amont.} \quad (\text{II.1})$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U'' \cdot \cos\varphi'' \cdot I \text{ de l'aval.} \quad (\text{II.2})$$

$$\frac{P}{P} = 1 = \frac{U' \cdot \cos\varphi'}{U'' \cdot \cos\varphi''} \Rightarrow \cos\varphi'' = \frac{U''}{U'} \cos\varphi' \quad (\text{II.3})$$

$$\tan a = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 a}}{\cos a} \Rightarrow \tan\varphi'' = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi'}}{\cos \varphi'} = \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 \cos^2 \varphi'}}{U'' \cos \varphi'} \quad (\text{II.4})$$

Avec a, angle quelconque.

La puissance compensée est de

$$Q_c = Q' - Q'' = P (\tan\varphi'' - \tan\varphi') \quad (\text{II.5})$$

$$Q_c = P \left( \frac{\sin \varphi''}{\cos \varphi''} - \frac{\sqrt{U'^2 - U''^2 \cos^2 \varphi'}}{U'' \cos \varphi'} \right) \quad (\text{II.6})$$

$$Q_c = \frac{P}{\cos \varphi'} \left( \sin \varphi'' - \sqrt{1 - \left(\frac{U''}{U'}\right)^2 \cos^2 \varphi'} \right) \quad (\text{puissance compensée}) \quad (\text{II.7})$$

### b- Installation shunt :

Considérons maintenant le schéma de la figure II.5 qui représente un jeu de barres de puissance ( $P + jQ$ ) alimentant une charge à travers une ligne, les deux sont représentées par

une seule impédance ( $R+jLw$ ). La charge est supposée de mauvais facteur de puissance, d'où l'installation d'une batterie de condensateurs shunt de puissance ( $jQ_c$ ).

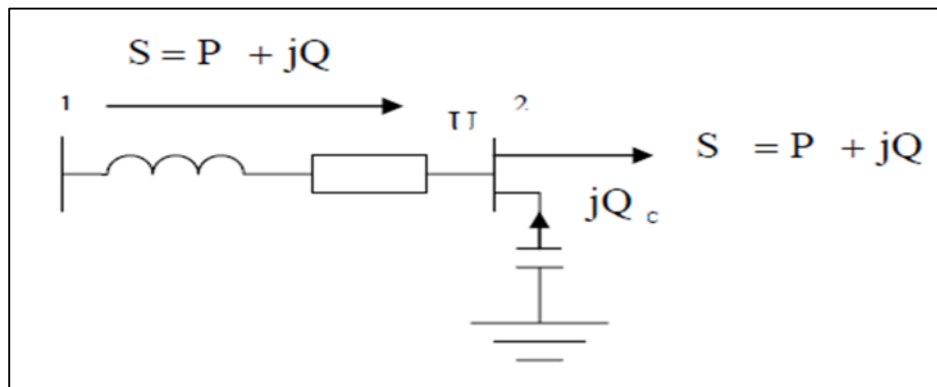


Figure II.5 : Batterie de condensateur shunt installée sur un jeu de barre.

### II.1.5. Raccordement des condensateurs au réseau :

La figure II.6, représente le schéma de branchement d'un condensateur série à travers des disjoncteurs. P étant un parafoudre pour assurer la protection et le transformateur TT permet la mise à la terre des charges partielles après le débranchement du condensateur.

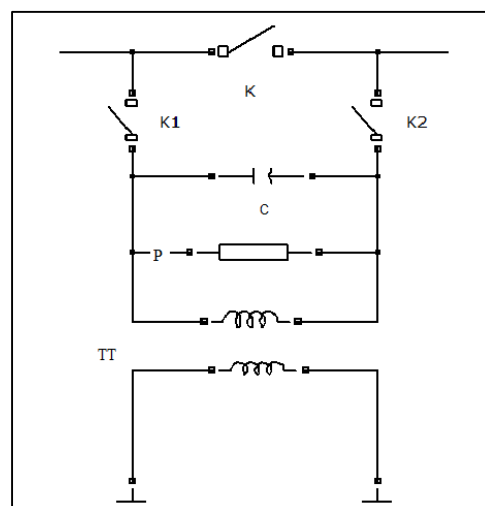


Figure II.6 : schéma de branchement d'un condensateur série et parallèle.

Les condensateurs shunt sont habituellement couplés en triangle avant d'être raccordés au réseau. Le choix du système triangle est fait pour des raisons économiques ; la puissance produite par des condensateurs en triangle est trois fois plus importante que la puissance produite par les mêmes condensateurs couplés en étoile. Le tableau II.1 donne les différents couplages des condensateurs shunt.

Couplage	Etoile(Y)	Triangle ( $\Delta$ )	comparaison
Impédance $3\sim(X_c)$ des condensateurs	$X_{cy} = \frac{V}{I}$	$X_{c\Delta} = \frac{3V}{I}$	$X_{c\Delta} = 3X_{cy}$

Puissance (Q) des condensateurs	$Q_y = 3VI \sin \varphi$	$Q_\Delta = \sqrt{3}UI \sin \varphi$	$Q_y = Q_\Delta$
---------------------------------	--------------------------	--------------------------------------	------------------

Tableau II.1 : différents couplages des condensateurs shunt.

La figure ci-dessous représente un gradin de condensateurs couplés en étoile sur une ligne triphasé :

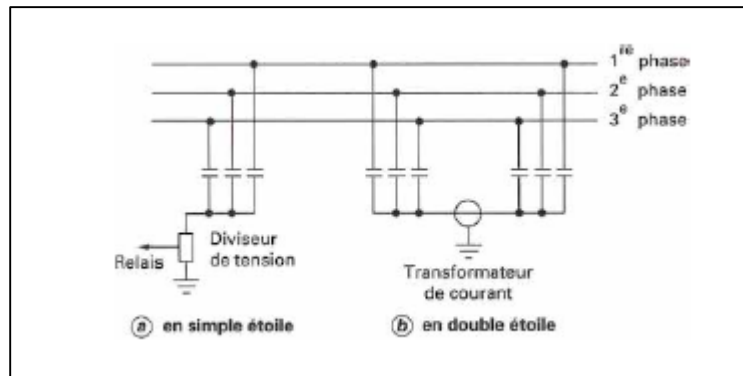


Figure II.7 : Schéma de couplage de condensateur shunt

Les batteries de condensateurs peuvent être raccordées en étoile, mais dans ce cas, le problème de surtension survient en cas de varié d'une phase.

- **Avantage des batteries de condensateurs :**

Les batteries de condensateurs présentent les avantages de tous les éléments statiques :

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- Pertes faibles.
- Elles occupent un faible volume
- Installation facile.

- **Inconvénients des batteries de condensateurs :**

Les inconvénients que présentent les batteries de condensateurs peuvent être résumés comme suit :

- Le contrôle de la puissance fournie par le condensateur ne se fait qu'en pas discret.
- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, ce qui peut résulter d'un vieillissement prématuré et parfois de claquage.
- Les condensateurs n'ont pas la rapidité de réponse nécessaire pour répondre aux phénomènes transitoires.

## II.2. Inductances :

Les inductances ont un rôle complémentaire au rôle des batteries de condensateurs pour réaliser la stabilité de la tension. En effet, lors des heures creuses en régime surchargé, la puissance réactive produite n'est pas consommée totalement par les charges. C'est pour cette raison que les inductances sont installées sur les lignes THT ou HT, pour emmagasiner

cet excédent d'énergie réactive et l'empêcher de transiter à travers les lignes. Ainsi les surtensions seront atténuées et en cas de besoin de cette énergie sera restituée au réseau. Pour comprendre cette technique, nous avons choisis l'exemple prit du réseau EDF.

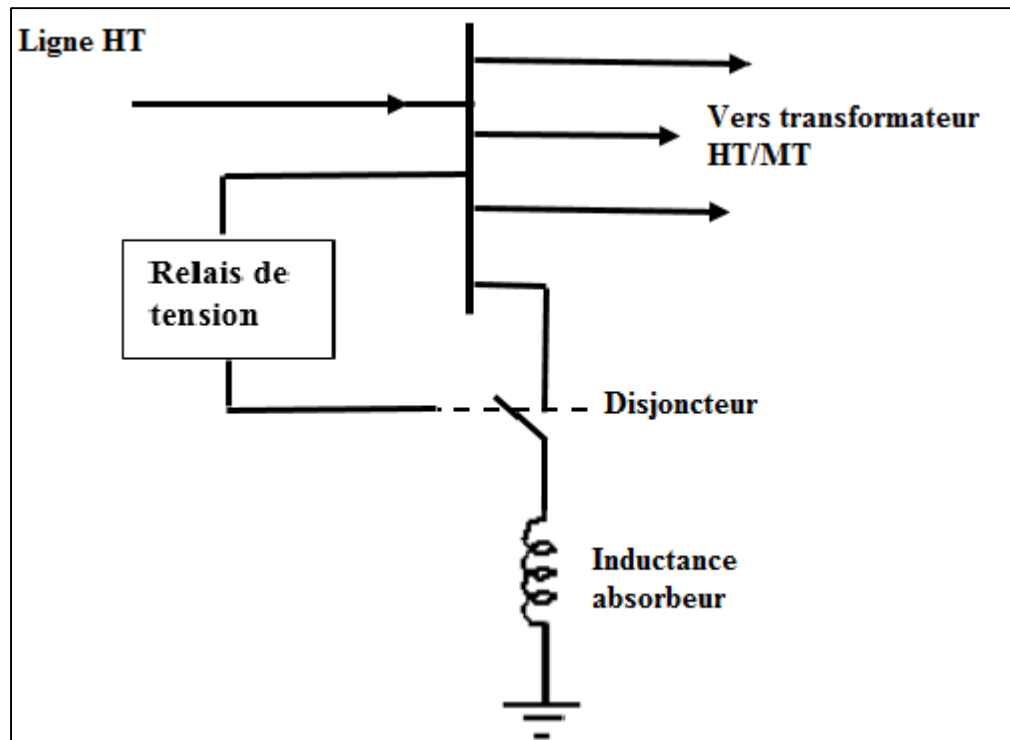


Figure II.8 : Schéma de montage d'un absorbeur sur un jeu de barres HT.

Le relais de tension connecte l'inductance au réseau dans le cas suivant :

En cas de tension supérieure à la tension maximale de service sur le jeu de barres, le relais qui est consigné à cette valeur exacte, détecte cette surtension qui est aussitôt absorbée par l'inductance après la fermeture du disjoncteur. Le passage du courant dans l'inductance crée une chute de tension qui fait diminuer la tension au niveau de jeu de barres à la tension de consigne. Le disjoncteur ne s'ouvrira que lorsque la tension revienne à une valeur de service.

#### II.4. Compensateurs synchrones :

Le compensateur synchrone est une machine synchrone fonctionnant en moteur à vide. Ses fonctionnements en régime surexcité ou sous-excité lui permettent respectivement de fournir ou d'absorber l'énergie réactive. Comme il n'entraîne aucune charge, le compensateur synchrone n'absorbe pratiquement aucune puissance active (aux pertes près). Cette méthode permet de contribuer au contrôle et à la stabiliser.

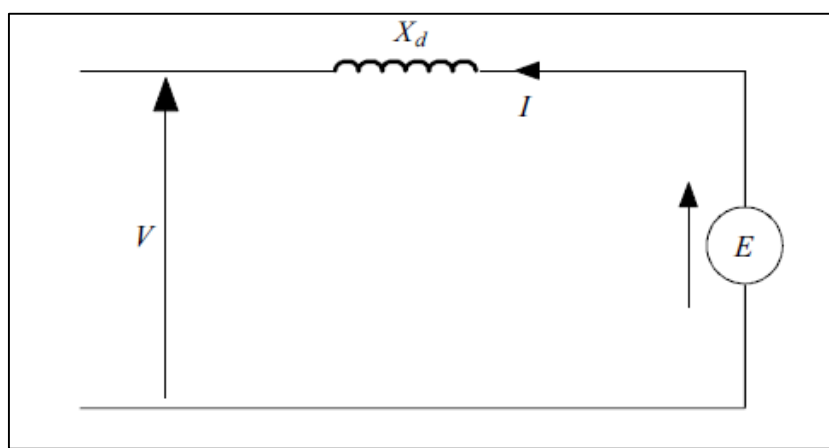


Figure II.9 : Schéma équivalent de la machine synchrones

D'après la théorie de potier, le modèle simplifié d'une machine synchrones est représenté sur la figure II.9 par une source de tension  $E$  en série avec une inductance

$$X_d = (R \ll X_d).$$

De la figure II.9, on tire l'équation des tensions suivante :

$$\bar{E} = \bar{V} + jX_d \bar{I} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$E$ , f e m due à l'excitation du compensateur synchrones.

$V$ , tension du réseau ;

$X_d$ , réactance de fuite de compensateur synchrones ;

$I$ , courant échangé avec le réseau ;

La puissance active consommée par le condensateur est

$$P = 3VI \cos \varphi$$

La puissance réactive aussi est :

$$Q = 3VI \sin \varphi$$

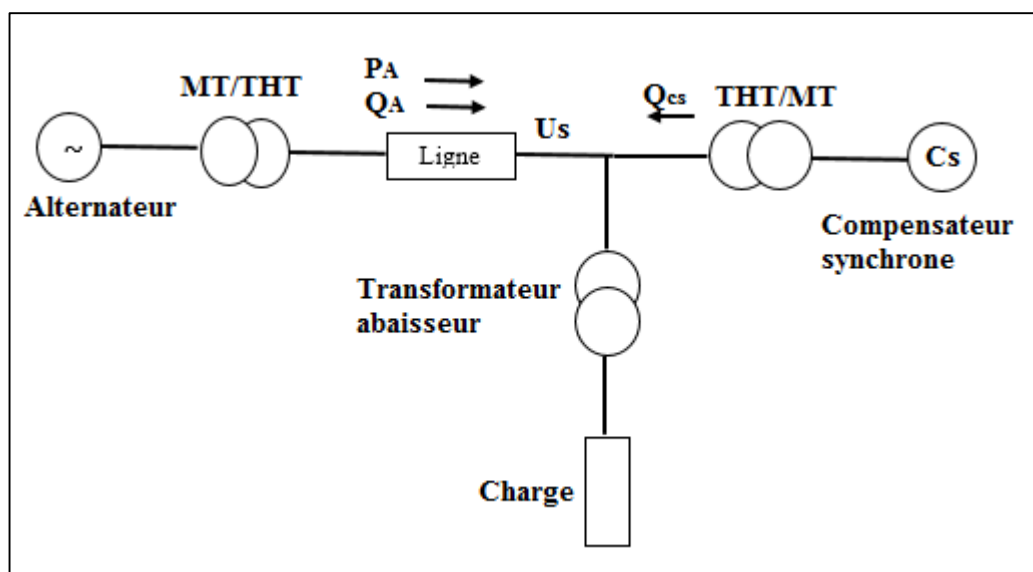


Figure II.11 : Schéma de branchement du compensateur synchrones sur le réseau.

Le raccordement du compensateur synchrone au réseau se fait à travers un transformateur survolteur comme le montre la figure II.11 ; le compensateur est branché à côté de la charge pour réduire la portée du transit de la puissance réactive.

#### II.4. Groupe thermique et hydraulique :

Les groupes thermiques et hydrauliques peuvent également participer à la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques. Grâce aux performances de leurs alternateurs notamment sur le plan dynamique, ces groupes qui constituent les sources de tension du réseau, peuvent contrôler la tension en absorbant ou en fournissant de l'énergie réactive, ce qui dépend des courants d'excitation des rotors des alternateurs.

Comme on va le voir sur la figure suivante, plusieurs zones de limitation de fonctionnement sont à prendre en considération en raison de :

- L'échauffement des conducteurs du rotor et des tôles des circuits magnétiques, c'est une limitation de quantité de puissance fournie (limite de courant du rotor)
- Des contraintes dues au courant du stator et à l'angle interne  $\delta$  qui doit être inférieur à  $\frac{\pi}{2}$  pour un fonctionnement stable à excitation constante et à tension du rotor fixe, c'est une limitation de puissance absorbée.

Les potentialités d'un groupe à absorber ou à fournir de l'énergie réactive dépendent également de la puissance active qu'il fournit de la tension aux bornes de son alternateur et de la prise du transformateur le reliant au réseau.

La modification de la production d'énergie réactive dans un groupe s'effectue en quelques dixièmes de seconde seulement. Il peut donc faire face aux fluctuations brusques de la demande. Cette performance dynamique fait du groupe un moyen accompli de compensation d'énergie réactive dans les réseaux de transport. Mais il reste qu'il ne crée par les transits de l'énergie réactive dans les réseaux.

L'alternateur étant une machine synchrone, on a donc utilisé le schéma équivalent de la figure précédente.

L'expression de la force électromotrice interne de l'alternateur est :

$$\bar{E} = V_s + jX_d \bar{I} \quad (\text{II.9})$$

L'expression de la puissance active produite par l'alternateur est :

$$P = \frac{3V_s}{X_d} . E \sin \delta \quad (\text{II.10})$$

L'expression de la puissance réactive absorbée ou fournie par l'alternateur est :

$$Q = \frac{3.E.V_s}{X_d} \cos \delta - \frac{3V_s^2}{X_d} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

E : force électromotrice interne

I : courant statorique.

P : puissance active fournie par l'alternateur.

Q : puissance réactive absorbée ou fournie par l'alternateur.

$V_S$  : tension aux bornes du stator.

$\delta$  : angle interne.

$X_d$  : réactance de l'alternateur.

$\varphi$  : angle de phase.

$P_n, Q_n, E_n, \varphi_n$  : Valeurs nominales.

En fonction de l'angle de phase  $\varphi$ , l'alternateur absorbe ou fournit de l'énergie réactive :

Si  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ , l'alternateur fournit de la puissance réactive.

Si  $-\frac{\pi}{2} < \varphi < 0$ , l'alternateur absorbe de la puissance réactive.

## II.5. compensateurs statiques d'énergie réactive (dispositifs FACTS) :

### II.5.1. concept FACTS : un projet EPRI.

FACTS (flexible AC transmission System), système flexibles de transmission à courant alternatif. C'est un projet lancé en 1988 par EPRI (Electric Power Research Institute), qui est un consortium dédié à la recherche dans le domaine de l'exploitation de l'énergie et regroupe un certain nombre de compagnies. Ce projet vise surtout à trouver des moyens capables d'améliorer les capacités des réseaux de transport en augmentant leur flexibilité.

La technologie FACTS utilise l'électronique de puissance et particulièrement les thyristors à ouverture par gâchette, GTO, qui permettent d'atteindre des temps de réponses nettement inférieurs à ceux obtenus pour les systèmes mécaniques et leur état statique réduit largement leur maintenance.

Les transits de la puissance réactive ont des effets directs sur le niveau de tension dans le réseau. Un transit de puissance non contrôlé, peut causer une instabilité en tension en raison des chutes de tension et des pertes joule occasionnées.

Les dispositifs FACTS ont pour objectifs de contrôler la tension et le transit de la puissance dans les réseaux afin d'augmenter leur capacité de charge jusqu'à leurs limites thermiques maximales.

Pour comprendre comment agissent ces dispositifs, prenons l'exemple suivant :

On suppose que les pertes sont négligeables lors du transit de la puissance du nœud (1) au nœud (2). La puissance active, transmise s'écrit alors en fonction des tensions aux deux extrémités du déphasage entre elle  $\delta_{12}$  et de la réactance de la ligne X comme le montre l'expression :

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (\text{II.12})$$

Cette équation nous montre que si l'on trouve un moyen de contrôler un, deux, voire trois des paramètres qui caractérisent l'expression, c'est-à-dire tension, déphase et impédance, nous pouvons alors contrôler la puissance transmissible par la ligne.

Le contrôle de ces paramètres se fait par les moyens de la compensation statique. Le mot statique est relatif à l'absence d'éléments tournants parmi ses dispositifs qui sont constitués d'ensemble de condensateurs et d'inductances commandés par thyristors. Parmi les dispositifs FACTS les plus utilisés on peut citer quelques types.

## II.5.2. Quelques dispositifs de type FACTS :

### II.5.2.1. Les condensateurs commutés par thyristors :

#### ➤ TSC : Thyristor Switched Capacitor

Le condensateur n'est pas commandé en phase mais simplement enclenché et déclenché un nombre entier de  $\frac{1}{2}$  périodes. Grâce à la précision du réglage de l'instant de mise en conduction des thyristors, la plupart des phénomènes transitoires sont supprimés. La puissance réactive injectée n'est pas modulable, on va moduler cette puissance grâce à une inductance réglable.

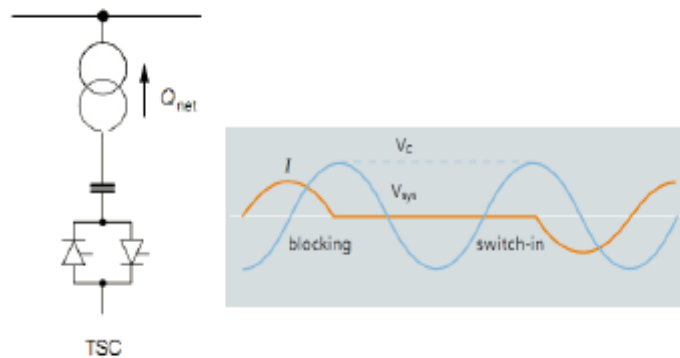


Figure II.12 : présentation d'un TSC

#### ➤ TCR : Thyristor Controlled Reactor

Le TCR ne peut absorber que l'énergie réactive, puisque il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristors tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins de demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage  $\alpha$  permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

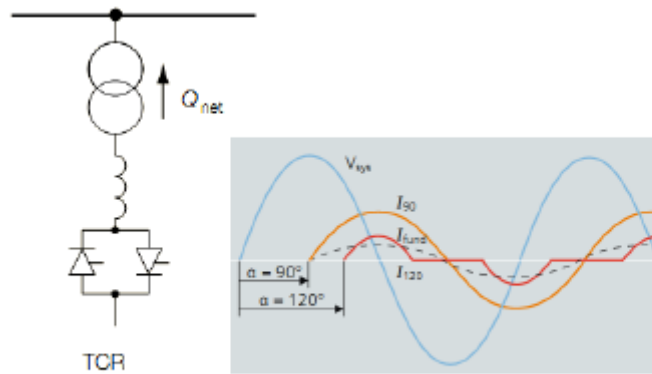


Figure II.13 : présentation d'un TCR

Pour les angles supérieurs à 90°, ce dispositif génère des harmoniques. On ajoute des filtres harmoniques

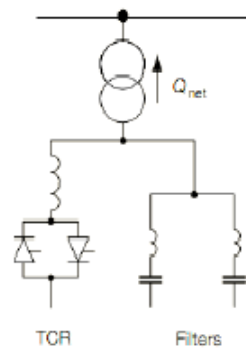


Figure II.14 : présentation d'un TCR avec filtres harmoniques

### II.5.2.2. Compensateur statique de puissance réactive

➤ **SVC : Static Var Compensator :**

On arrive alors à la structure suivante :

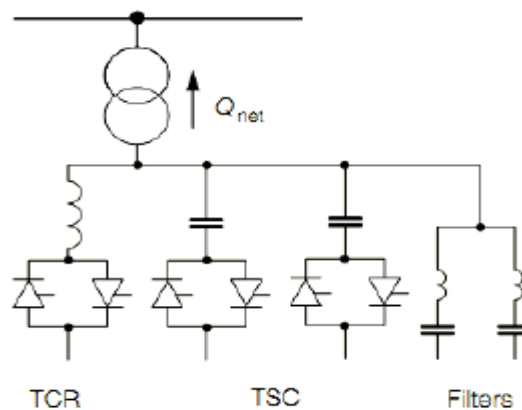


Figure II.15 : structure d'un SVC

Chaque branche du TSC permet d'injecter la puissance réactive  $Q_c$ . Le TCR absorbe la puissance réactive  $Q_L$  ajustable de  $Q_{Lmax}$  ( $= -Q_c$ ) à 0. Ainsi on peut ajuster graduellement la puissance réactive injectée de 0 à  $2Q_c$ .

De plus, lorsque les TSC sont déclenchés et en commandant simplement le TCR, ce compensateur absorbe de la puissance réactive. Cela permet, lorsque le réseau est peu chargé, d'éviter les remontées en tension sur les lignes.

Pour piloter le SVC, le gestionnaire de réseau envoie une tension de consigne au SVC. Classiquement la puissance réactive injectée par les SVC est réglable de -100 Mvar à +200 Mvar. Grâce au temps de réponse très faible, le SVC améliore les régimes transitoires des lignes en cas de court-circuit, de réjection de charges...

### II.5.2.3. Compensateur Synchrone Statique

#### ➤ STATCOM : Static Synchronous Compensator

Le STATCOM est composé d'une source d'énergie continue, ou d'un condensateur, associé à un convertisseur statique à base de semi-conducteurs du type IGBT. Ce convertisseur permet de régler le niveau  $V_s$  de la tension en sortie du convertisseur et maintenir le courant de sortie  $I_s$  en quadrature avec  $V_s$ .

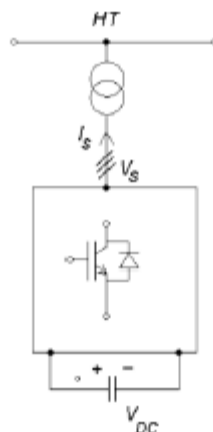


Figure II.15 : structure d'un STATCOM

### II.5.2.4. Condensateur série commandé par thyristors :

#### ➤ TCSC : Thyristor Controlled Serie Condensator

En déviant, du courant  $I_c$  qui traverse le condensateur, une partie  $I_v$  dans une bobine commandée par des thyristors, on obtient un condensateur de capacité réglable :  $X_c = U_c / U_L$ . La structure est la suivante :

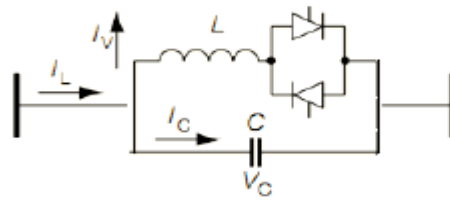


Figure II.16 : structure TCSC

L'impédance de la ligne est réglable. On peut répartir les flux de puissance entre les lignes des réseaux maillés afin d'y minimiser les pertes.

### Conclusion :

Plusieurs moyens sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive, certains participent à la stabilité des systèmes compensés, d'autres au contraire créent de nouvelles contraintes au système.

Le choix du moyen de compensation doit répondre aux exigences fixées dès le départ et atteindre aussi l'objectif de compensation, de régulation ou du maintien de la tension proche des conditions idéales de fonctionnement.

Ces moyens utilisés pour la compensation de l'énergie réactive sont différents dans leur conception et leurs performances. L'évolution technique des charges et l'accroissement du niveau de consommation énergétique des abonnés, imposent plus de rapidité lors des échanges de l'énergie réactive. D'où, l'application de moyens à performances dynamiques avancées tels que les systèmes FACTS.

**Introduction :**

Les réseaux de distribution modernes doivent faire face aux nouveaux défis et aux nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique, le principal changement pour le réseau concerne la nature des charges connectées, d'une part les charges passives classiques ont subi une évolution très importante et d'autre part de nouvelles charges actives ont été connectées au réseau.

Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes dans le réseau électrique, ces perturbations peuvent être classées en deux catégories, qui sont :

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées, les creux de tension et les surtensions.

Dans ce premier chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, ainsi que l'étude des caractéristiques des harmoniques et on cite les différentes origines des harmoniques dans le réseau électrique.

**III.1 Qualité de l'énergie électrique :**

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

**➤ Qualité de la tension :**

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

**➤ Amplitude :**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de 10% autour de la valeur nominale.

Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions. Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- Les variations de tension, Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.

➤ **Fréquence :**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la norme EN 50160 précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle  $50\text{Hz} \pm 1\%$  pendant 99,5% de l'année, et  $-6\% - 4\%$  durant 100% du temps. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

➤ **Forme d'onde :**

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

➤ **Symétrie :**

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

### **I.1.2 Qualité du courant :**

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de  $\frac{2\pi}{3}$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

## I.2 Les perturbations électriques dans les réseaux électriques :

### I.2.1 Les variations de tension :

La variation de la tension autour de la valeur nominale est fonction de la structure et de la charge du réseau (longueur des conducteurs et variation de la charge) et des systèmes régulateurs du réseau public (ou privé).

En Europe, la norme indique qu'en exploitation normale, pour chaque période d'une semaine, 95% des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans une plage de tension  $U_n \pm 10\%$ .

Dans les pays en voie de développement, il est possible d'observer fréquemment des variations plus fortes que  $\pm 20\%$ .

### I.2.2 Déséquilibre de tension :

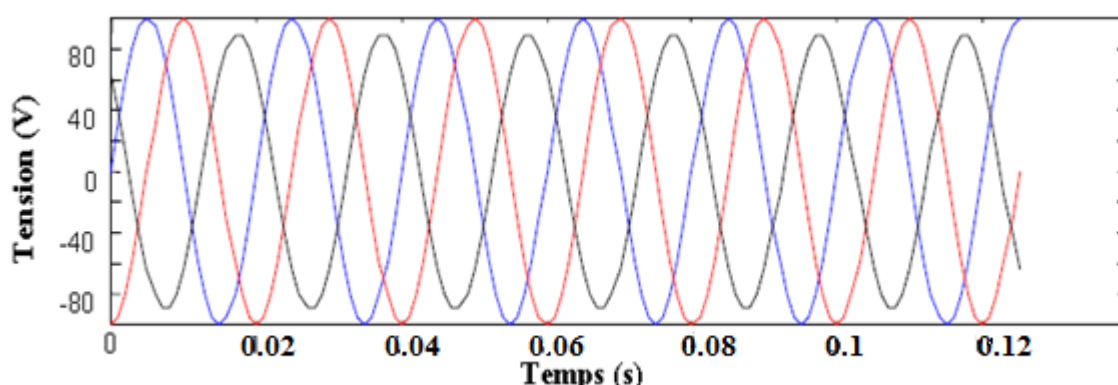


Figure III.1 : déséquilibre de tension

L'inégalité en amplitude des tensions des trois phases est due à l'inégalité des puissances appelées sur chaque phase. Ce déséquilibre résulte essentiellement de la présence de fortes charges monophasées raccordées de manière non uniforme au réseau.

### III.2.3 Les surtensions :

On qualifie de surtension toute tension fonction de temps qui dépasse la tension de crête de régime permanent.

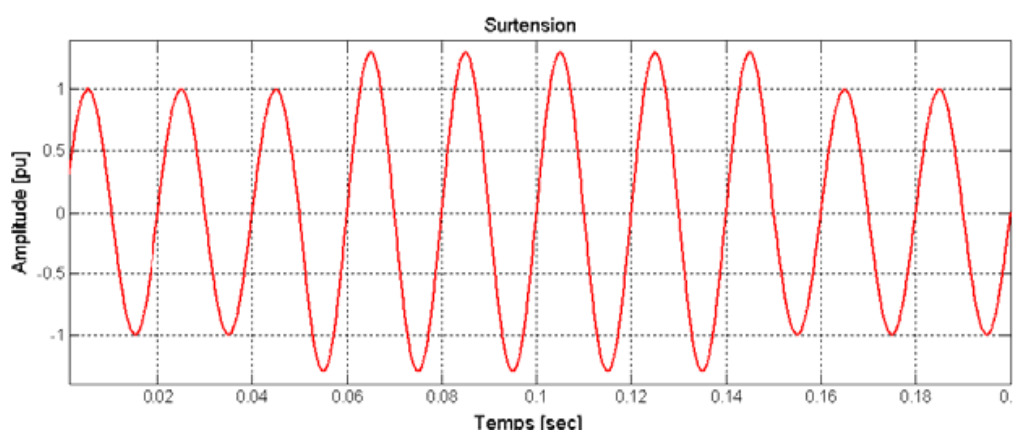


Figure III.2 Exemple de surtension

Elles sont dues aux coups de foudres directs (qui tombent sur une ligne ou une Structure) et indirects (qui tombent sur la terre et augmentent son potentiel).

### III.2.4 Creux de tension et coupures brèves :

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps. Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

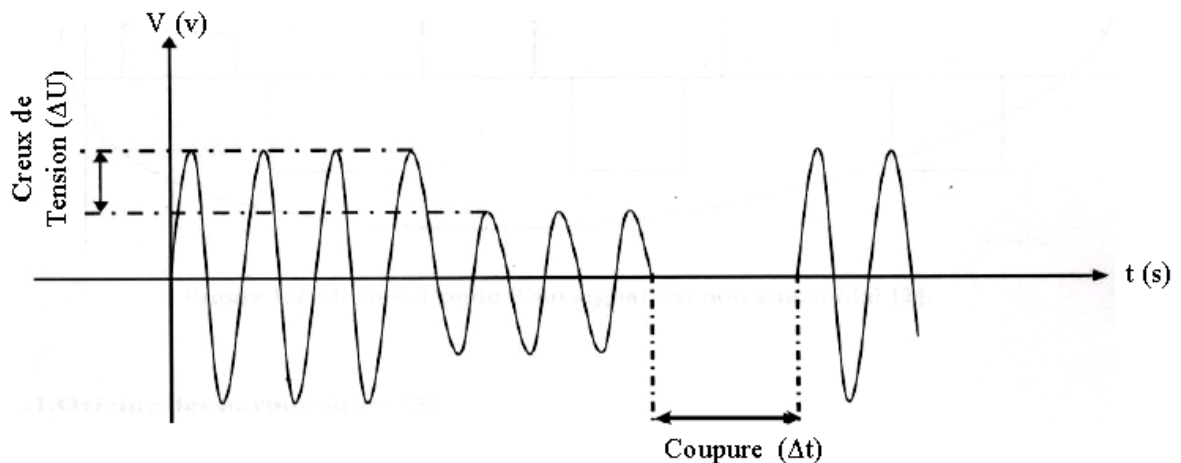


Figure III.3. Creux de tension et coupures brèves

### III.2.5 Fluctuation de tension :

C'est une variation rapide de tension comprise dans la plage normale de tension en fonctionnement normal du réseau.

Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc...etc.

### III.2.6 Variation de fréquence :

La variation de la fréquence du réseau qui est normalement fixée, est observable sur les perturbations des vitesses des moteurs ainsi que la précision des appareils de mesure.

### III.3 Les harmoniques :

#### III.3.1 Définition des harmoniques :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau.

La pollution harmonique est un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler.

#### III.3.2 Les perturbations harmoniques :

Les signaux (tension et courant) relevés sur le réseau sont des signaux déformés et loin d'être des sinusoïdes parfaites.

Un signal déformé est la superposition d'un signal fondamental (à 50 Hz) et des signaux harmoniques de fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental (100, 150, 200, 250, ...etc.). En pratique on s'intéresse qu'aux harmoniques significatifs (jusqu'au rang 40).

#### I.3.3 Caractéristique des perturbations harmonique :

Les charges peuvent être classées en deux familles principales :

- Les charges linéaires
- Les charges non linéaires

##### ➤ Charge linéaire :

Si l'on alimente une charge linéaire par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

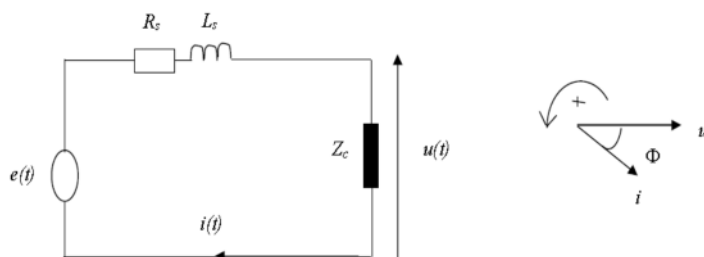


Figure III.4.1 : Schéma de connexion du réseau avec une charge linéaire

$L_s$ : inductance de la source ;  
 $Z_c$ : impédance de la charge.

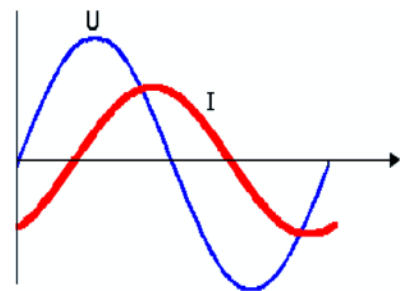


Figure III.4.2 : charge linéaire

##### ➤ Charge non linéaire :

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal (Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques).

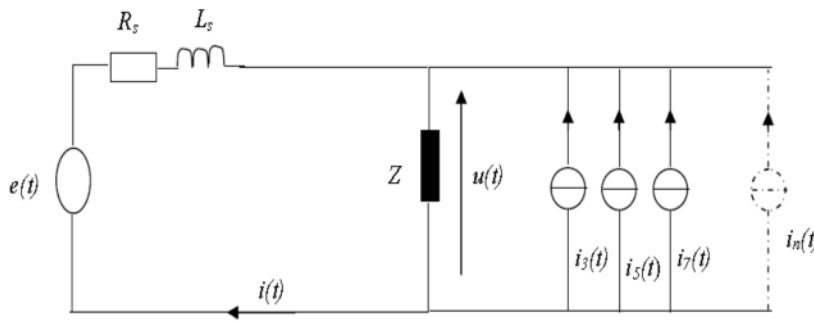


Figure III.5.1 : Schéma global du réseau et d'une charge non linéaire

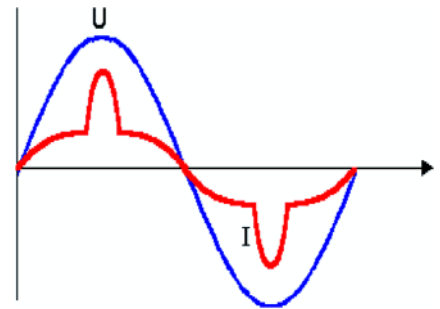


Figure III. 5.2 : charge non-linéaire

**III.4 Caractéristique d'un signal :**

**III.4.1 Rang d'un harmonique :**

Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental, généralement la fréquence industrielle 50Hz ou 60Hz. Par principe, le fondamental  $f_1$  au rang 1.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \tag{III.1}$$

**III.4.2 Représentation spectrale :**

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié. La figure ci-dessous montre un exemple de spectre.

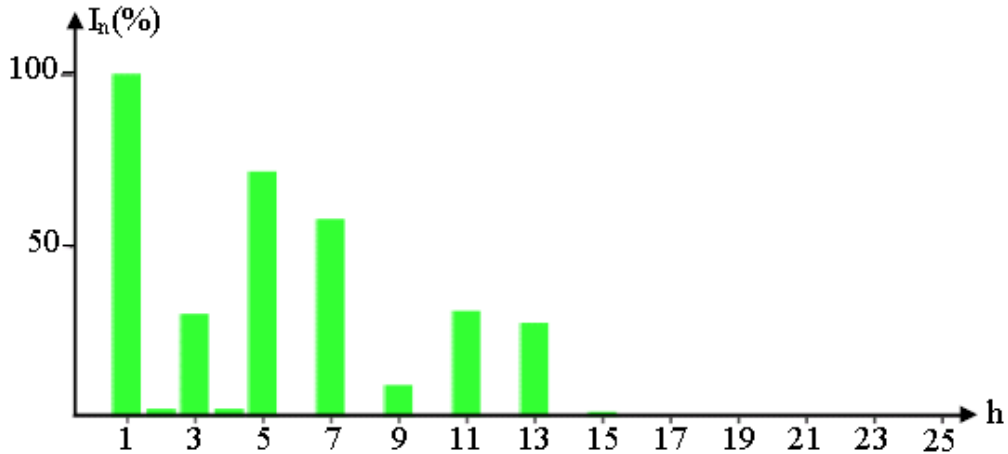


Figure III.6. : Spectre harmonique d'un signal.

### III.4.3 Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier :

Sur le plan mathématique, on peut décomposer tout signal périodique en une série sinusoïdes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale du signal. Cette série se nomme série de Fourier, d'après le mathématicien français Joseph Fourier du début du XIX<sup>ème</sup> siècle.

Si  $G(t)$  est un signal à décomposer en série de Fourier, la série s'écrit comme suite :

$$G(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n\omega t) \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$A_0$  : composante continue ou valeur moyenne du signal, généralement nulle en distribution électrique en régime permanent.

$A_n$  et  $B_n$  : Amplitudes crêtes des composantes harmoniques de rang  $n$ .

$\omega$  : Pulsation fondamentale.

En électrotechnique, on utilise habituellement les valeurs efficaces plutôt que les valeurs crêtes.

Par conséquent, l'équation précédente devient :

$$G(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{2}} \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\sqrt{2}} \sin(n\omega t) \quad (\text{III.3})$$

On obtient les coefficients  $A_n$  et  $B_n$  par résolution analytique ou numérique des intégrales suivantes :

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

$$A_n = \frac{2}{T\sqrt{2}} \int_0^T G(t) \cos(n\omega t) dt \quad (\text{III.4})$$

$$B_n = \frac{2}{T\sqrt{2}} \int_0^T G(t) \sin(n\omega t) dt$$

Où  $T$  correspond à la période du signal qui est égale à  $\frac{2\pi}{\omega}$  ou à  $\frac{1}{f}$ .

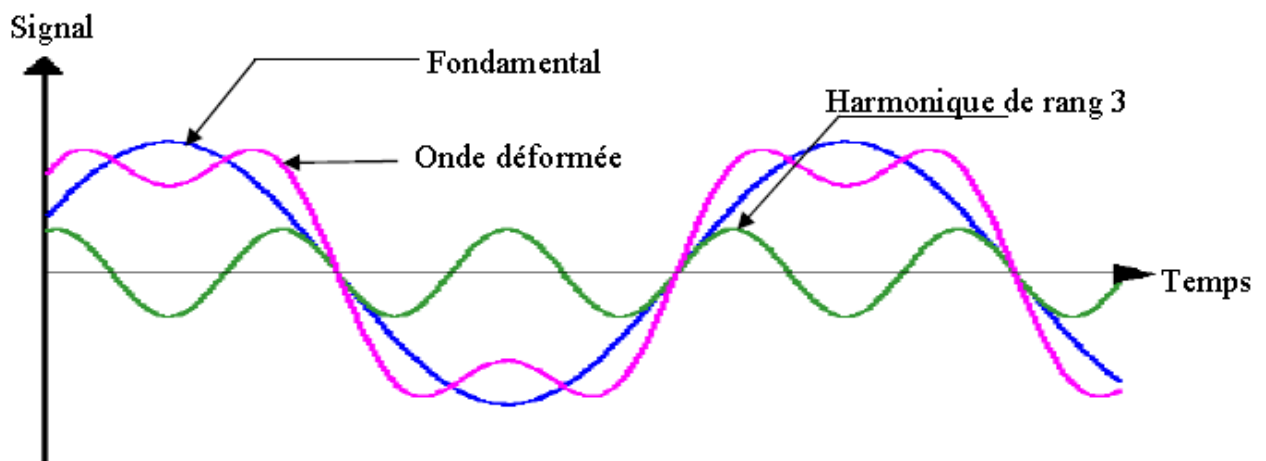


Figure : III.7. Onde déformée et sa décomposition

**III.5 valeur caractérisant un signal déformé :****III.5.1 valeur efficace d'une grandeur déformée :**

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal  $G(t)$  de période  $T$  est l'évaluation de sa valeur efficace :

$$G_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T G(t)^2 dt} \quad (\text{III.5})$$

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction périodique est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit :

$$G_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (G_h)^2} \quad (\text{III.6})$$

$G_h$ : Valeur efficace de la tension harmonique du rang  $h$ .

**Remarque :**

Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est donc possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace.

**III.5.2 Le taux de distorsion harmonique TDH :**

Le facteur de distorsion harmonique noté **TDH** est établi pour donner une idée sur l'amplitude de la perturbation harmonique ; il est donné par l'expression suivante :

$$\text{TDH} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{V_h}{V_1} \right)^2} \quad (\text{III.7})$$

$V_1$  : Valeur efficace de la tension fondamentale.

$V_h$ : Valeur efficace de la tension harmonique du rang  $h$ .

Ou encore par :

$$\text{TDH} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (\text{III.8})$$

$I_1$  : Valeur efficace du courant fondamental.

$I_h$ : Valeur efficace du courant harmonique du rang  $h$ .

➤ **Le facteur de distorsion :**

Le facteur de distorsion noté  $F_{dis}$  donné par l'équation, nous renseigne sur la puissance déformante engendrée par les harmoniques, voir l'équation.

$$F_{dis} = \frac{I_{C1}}{I_C} \quad (III.9)$$

$I_{C1}$  : La valeur efficace du courant fondamental de charge.

$I_C$  : La valeur efficace du courant de charge.

$$D = S.[1 - (F_{dis})^2] \quad (III.10)$$

$D$  : Puissance déformante.

$S$  : Puissance apparente.

Le facteur de distorsion  $F_{dis}$  vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

### III.5.3 Les inter-harmoniques :

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale (130Hz, 170Hz, 220Hz.....) c'est-à-dire situées entre les harmoniques.

Certains sont émis par les charges non linéaires d'autres sont injectés intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et ainsi piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.

### III.5.4 Les sources de pollution harmonique :

#### III.5.4.1 Les charges domestiques :

Les charges domestiques ont des puissances unitaires bien inférieures à celles des charges industrielles. Mais comme elles sont nombreuses et peuvent fonctionner en même temps (le pic observé lors du journal de 20h en est un parfait exemple) pendant une longue durée, elles peuvent fortement perturber les formes d'ondes du courant et de la tension. Les appareils qui contribuent le plus à la distorsion des grandeurs électriques sont les récepteurs de télévision, les ordinateurs, les appareils commandés par des triacs (gradateur de lumière, équipements électroménagers) et les lampes fluorescentes.

Les appareils électroniques grand public et les lampes à ballast sont en général alimentés par des ponts redresseurs à diode avec une forte capacité pour filtrer la tension redressée. Tous les appareils équipés par ces convertisseurs absorbent des courants sous forme d'impulsions de courant, la Figure III.8 montre la tension et le courant absorbés par une lampe basse consommation.

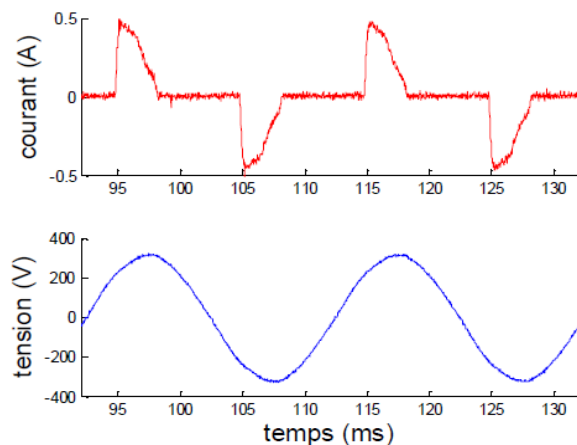


Figure III.8 : La tension et le courant absorbés par une lampe basse consommation 15W-230V.

### III.5.4.2 Les charges industrielles :

Dans ces charges industrielles, on va retrouver tous les convertisseurs de puissance (Redresseur, onduleur), les fours à arc, les fours à induction et d'autres matériels. Les appareils équipés de convertisseurs statiques représentent une part importante de la pollution harmonique générée par les charges industrielles, et ceci est d'autant plus vrai que leur nombre et la puissance installée ne font qu'augmenter (variateur de machine asynchrone, redresseur sur charge RL pour alimenter une machine à courant continu...). La Figure III.9 montre la tension et le courant absorbés par un variateur pour moteur asynchrone, avec notamment un courant riche en harmoniques.

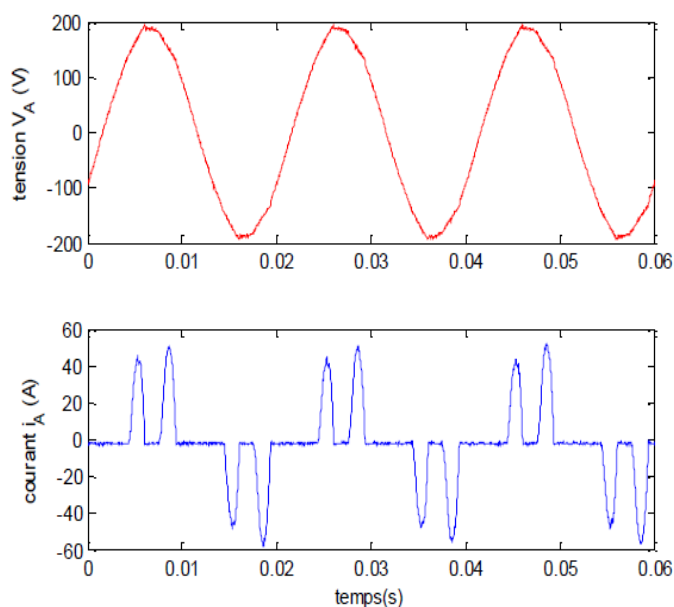


Figure III.9.: La tension et le courant absorbés par un variateur 1270V-6kVA pour moteur asynchrone (mesures).

### III.6. Méthodes et procédés d'atténuation harmonique :

Pour l'amélioration des installations industrielles et le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique, il existe plusieurs solutions :

#### III.6.1. Utilisation d'une inductance (self) série :

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

#### I.6.2 Filtres passifs d'harmoniques :

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges.

Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie.

Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace.

#### Filtre résonant :

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur la figure (III.10.).

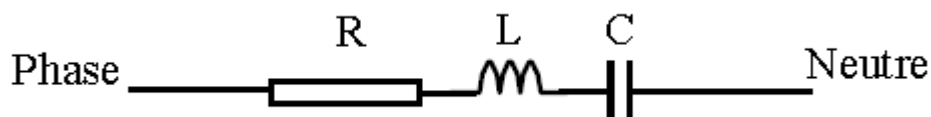
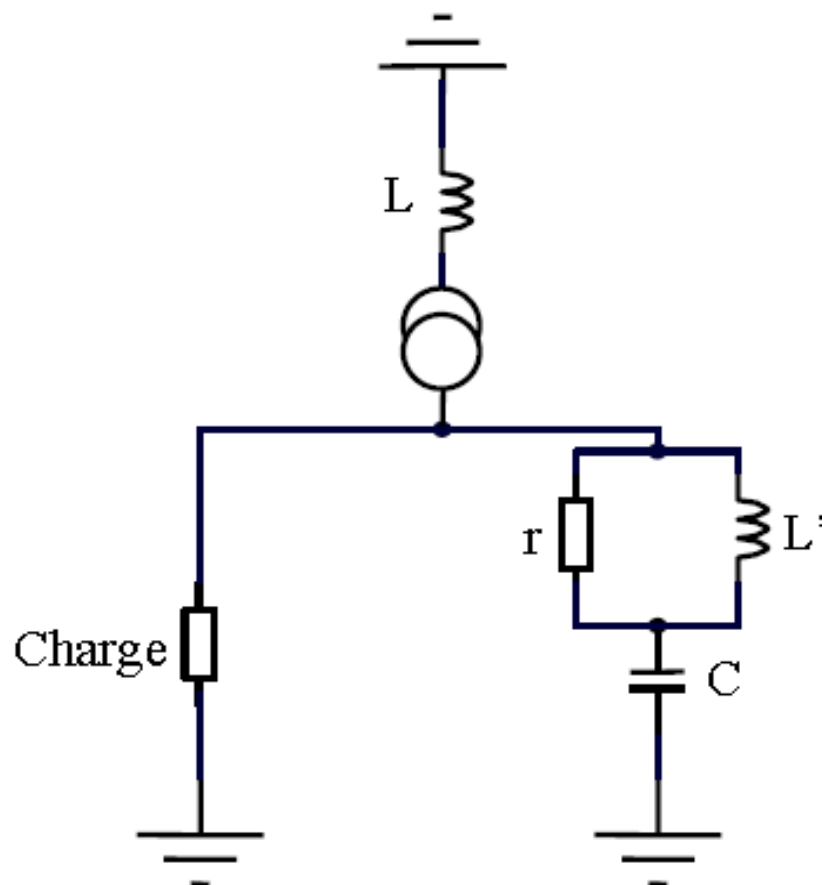


Figure III.10 : Structure du filtre résonant.

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11<sup>ème</sup>.

#### III.6.3 Filtre amorti :

La figure (III.11.) montre le montage de ce type de filtre, En plus de difficulté de dimensionnement des filtres et à coût global donné, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de  $h=13$ ).



**Figure III.11.** Schéma équivalent monophasé d'un filtre amorti.

#### I.6.4 Filtrage actif :

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

**III.6.5 Filtrage hybride :**

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types des perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations, différentes solutions de dépollution ont été présentées. Les solutions classiques (de base) ne sont pas très efficace pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvres, telles que le filtrage, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance, ces solutions peuvent être installées pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser de la puissance réactive.



## Introduction :

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade de développement (conception), qu'au cours de fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Dans ce chapitre nous allons présenter un modèle de simulation, composé d'une source de tension, d'une ligne triphasé, d'un convertisseur (redresseur), charges, filtres, et compensateur.

Le but de cette simulation c'est de montrer d'une manière qualitative l'apport d'un filtre et d'un compensateur à un réseau électrique pour la régulation de la tension et la compensation de l'énergie réactive.

Les filtres harmoniques triphasés sont des éléments parallèles utilisés dans les systèmes de puissances pour diminuer la distorsion de la tension et pour élever le facteur de puissance.

Des composants non linéaires comme les convertisseurs d'électronique de puissance génèrent des courants harmoniques qui seront injectés dans le système de puissance ; ces courants en traversant l'impédance du système produisent des tensions harmoniques. Les filtres réduisent la déformation de l'onde de tension en détournant les courants harmoniques dans les chemins de faible impédance.

Les filtres harmoniques sont conçus pour être capacitifs à la fréquence fondamentale et sont utilisés pour produire de la puissance réactive requise par les convertisseurs à fin d'élever le facteur de puissance.

### IV.1. Filtres utilisés dans notre simulation :

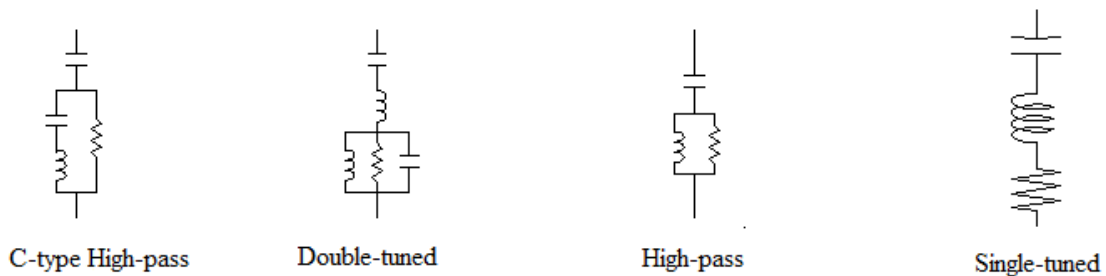
Afin d'obtenir une déformation acceptable des ondes de tension et de courant, plusieurs bacs de filtres à différents types sont usuellement connectés en parallèle. Les types les plus communément utilisés sont :

- Les filtres passe-bande qui sont utilisés pour piéger les harmoniques de rangs faibles ; 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 11<sup>ème</sup>, 13<sup>ème</sup> etc... Ces filtres peuvent être accordés à une seule fréquence (Single-tuned-filter).
- Les filtres passe-haut qui sont utilisés pour filtrer les harmoniques de rang élevés et couvrent un large éventail de fréquence.
- Un type spécial de filtre passe-haut nommé le type C sont utilisés pour fournir la puissance réactive et éviter les résonances parallèles. Comme ils filtrent également les harmoniques d'ordre bas (tel que le 3<sup>ème</sup>) tout en maintenant les pertes nulles à la fréquence fondamentale.

Les filtres d'harmoniques triphasés passifs sont des circuits RLC. Les valeurs des résistances, des inductances et des capacités sont déterminées en fonction du type du filtre ainsi que sur les paramètres suivants :

- La puissance réactive à la fréquence fondamentale ;
- Les fréquences sur lesquelles les filtres sont accordés ;
- Le facteur de qualité déterminé par la valeur de la résistance ;

Les quatre types de filtres sont modélisés de la manière suivante :



#### IV.2. Description du modèle :

La figure IV.1 représente l'ensemble de la structure du bloc à étudier, composé :

- D'une source de tension triphasée à trois fils.
- D'un double pont de redresseurs à tout thyristor (pont de Graetz) alimentant une charge (R-L).
- D'un transformateur triphasé connecté à l'entrée de la charge non linéaire.
- D'un bloc de commande pour générer l'angle  $\alpha$  de la commutation des thyristors.
- D'une charge linéaire (Rd) triphasé déséquilibrée.
- D'un ensemble de filtres triphasé (type pass haut, double raccordements) pour réduire les harmoniques : 3, 11,13 et 24 respectivement
- D'un compensateur de puissance réactive.

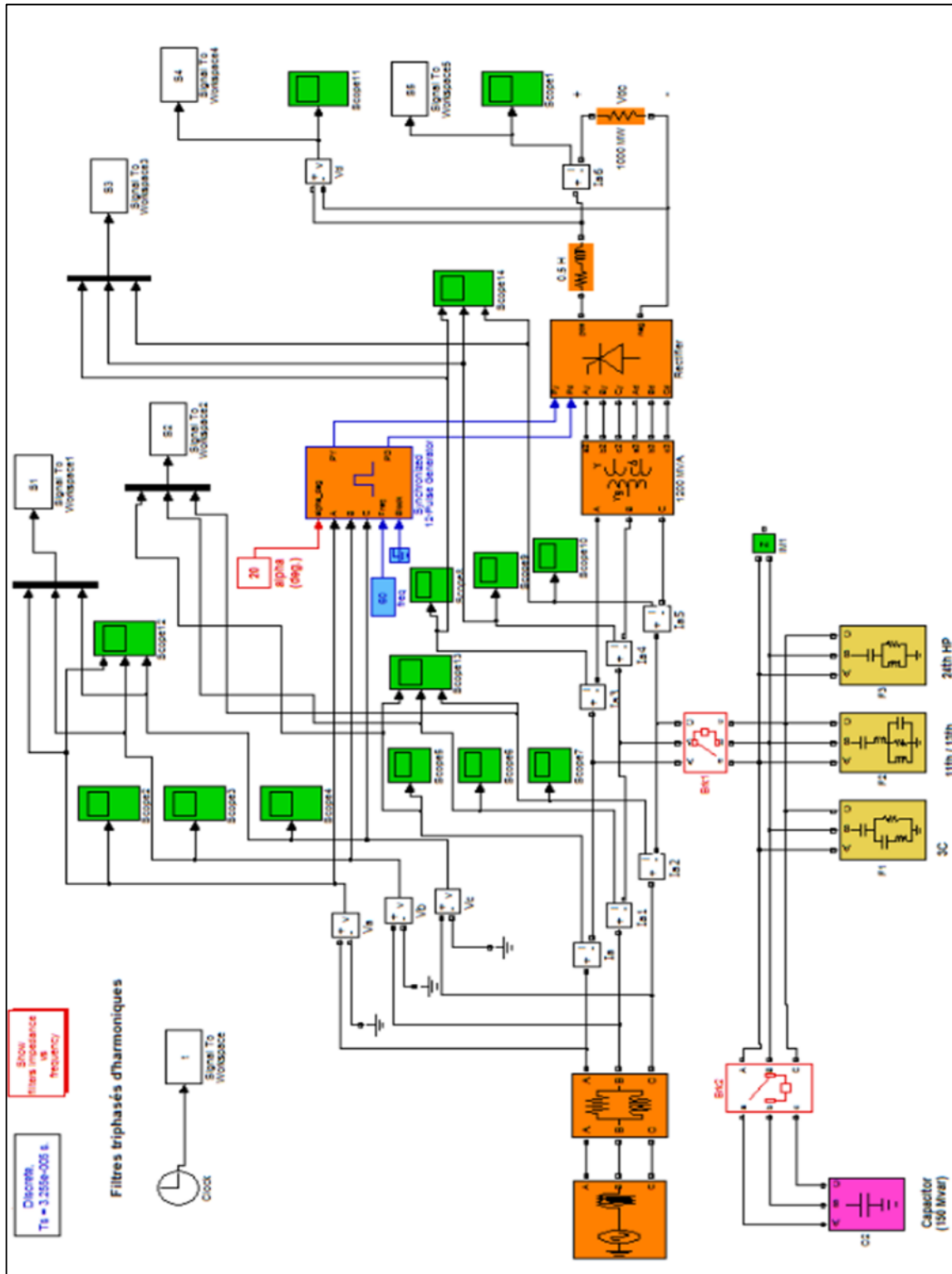


Figure IV.1 : modèle de base.

## IV.3. Caractéristiques du modèle :

Blocs	Caractéristique	
Sources	U=500 kV	
	Ls=98.03 mH	
Lignes	f = 60 hz	
	R= 26.07ohms	
Transformateurs	L =48.86 mH	
	Enroulement 1	V1=500*0.9kV
		R1=0.0025 pu
		L1=0 pu
	Enroulement 2	V2=200kV
		R2=0.0025 pu
		L2=0.24 pu
	Enroulements 3	V2=200 kV
		R2= 0.0025 pu
		L2= 0.24 pu
Rm=500 pu		
Lm=500 pu		
Pont tout thyristors	Rs= 2000 ohm	
	Cs= 0.1 $\mu$ F	
Impédance de lissage	R= 1 ohm	
	L=0.5ohms	
Charge	R=250 ohms	
	P= 1000 MW	
Filtres	Filtre 1	f = 3*60 Hz
		Q = 150 MVAR
		Facteur de qualité : 2
	Filtre 2	f = 11*60 ; 13*60 Hz
		Q= 150 MVAR
		Vn = 500kV
		Facteur de qualité : 20
	Filtre 3	f = 24*60 Hz
		Q = 150 MVAR
Facteur de qualité : 7		
Compensateur	Un = 500 kV	
	f = 60 Hz	
	Ql=0	
	Qc=-150 MVAR	

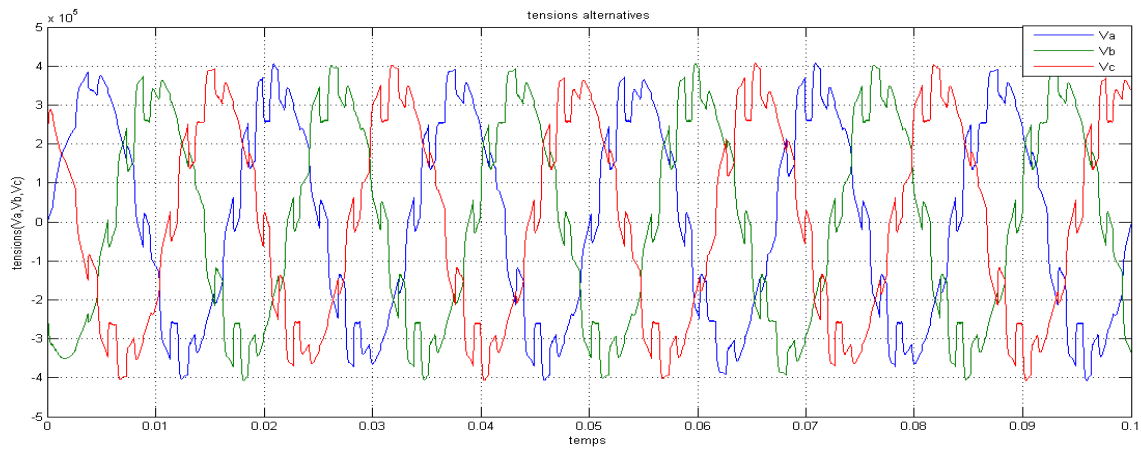
**IV.4. Résultats des simulations :**

Le convertisseur est modélisé pour fonctionner en mode redresseur, on prend l'angle d'amorçage des thyristors  $\alpha$ . Cette méthode consiste à simuler le modèle de base avec et sans filtrage, avec et sans compensation, enfin on agissant sur l'angle d'amorçage et à chaque fois on visualise les tensions et les courants alternatifs des phases.

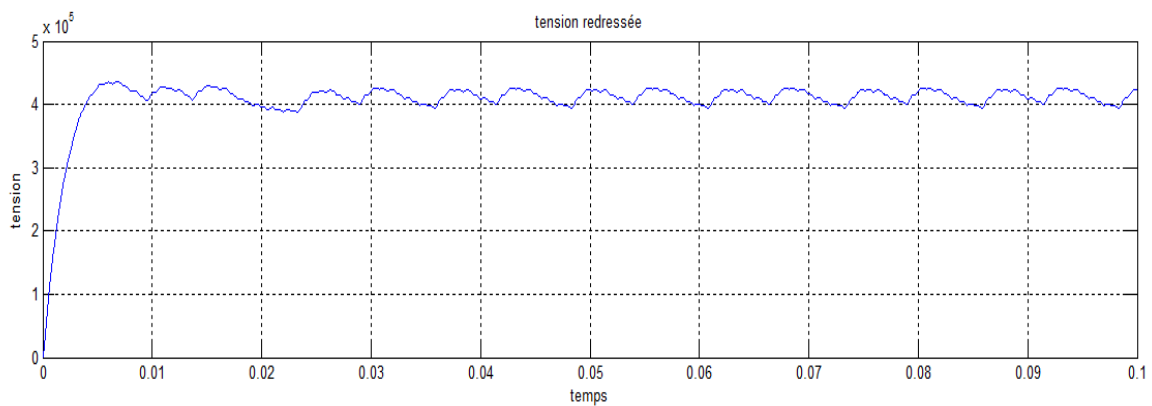
**IV.4.1. Système sans filtrage et sans compensation :**

$\alpha=20^\circ$

➤ **Tensions :**



**Figure IV.2 : Tensions alternatives des phases a b c**



**Figure IV.3 : Tension redressée.**

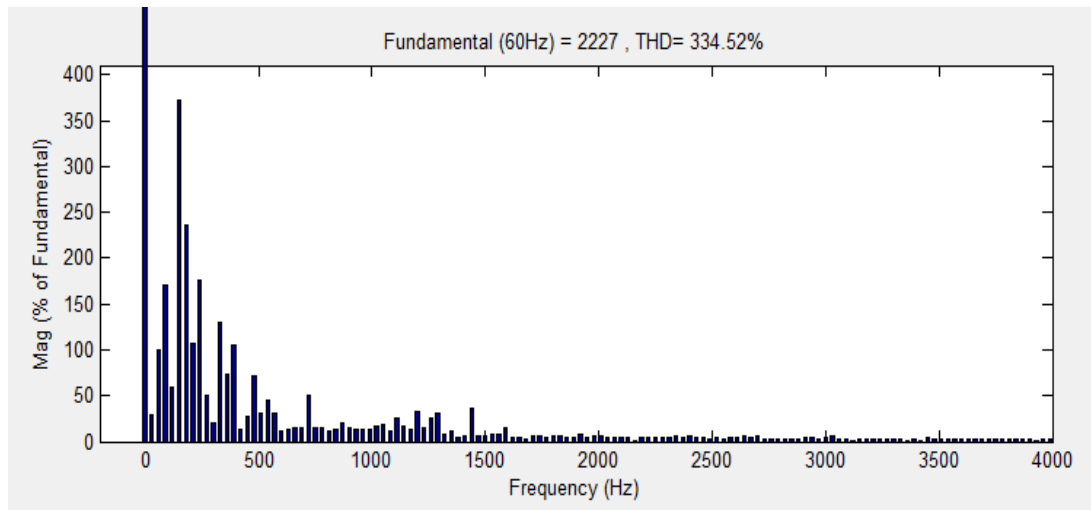


Figure IV.4 : Spectre d'harmoniques de tension redressée.

➤ Courants :

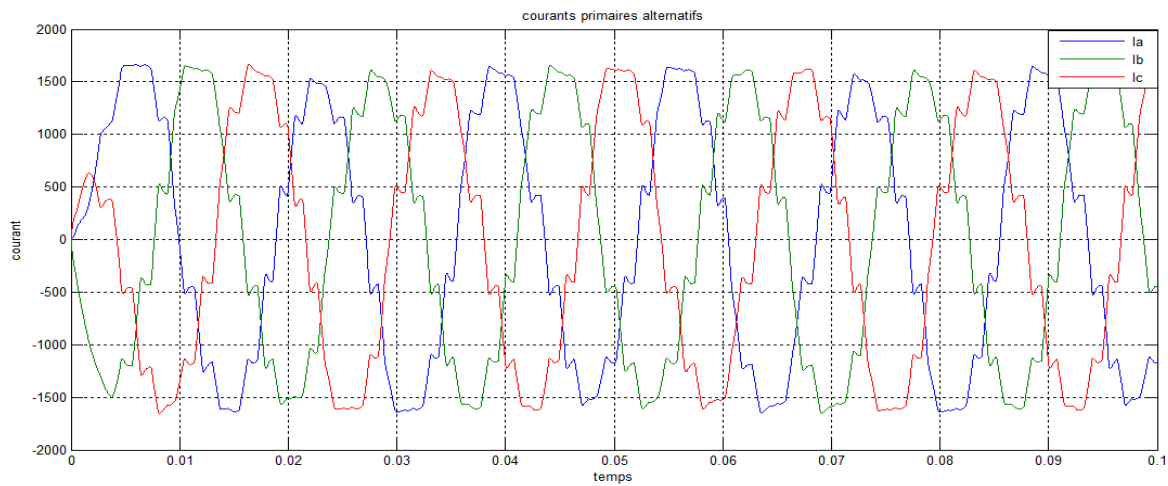


Figure IV.5 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.

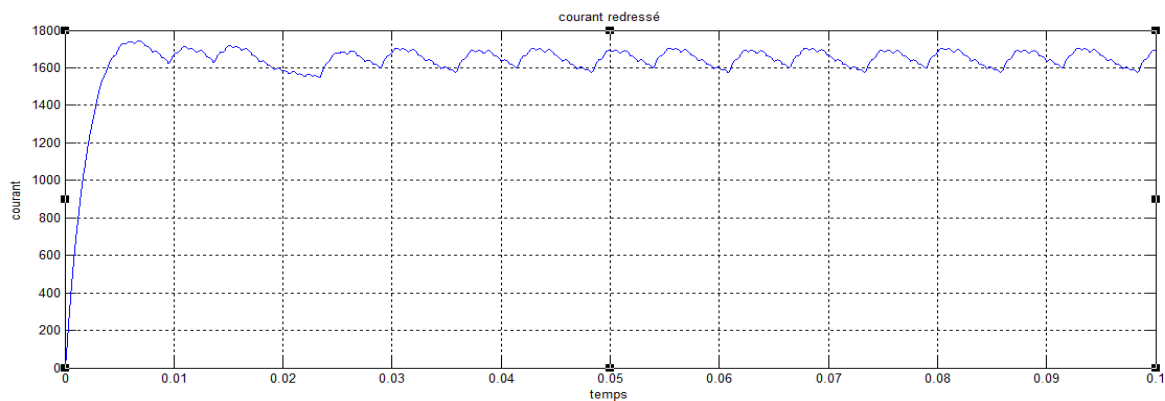


Figure IV.6 : Courant redressé.

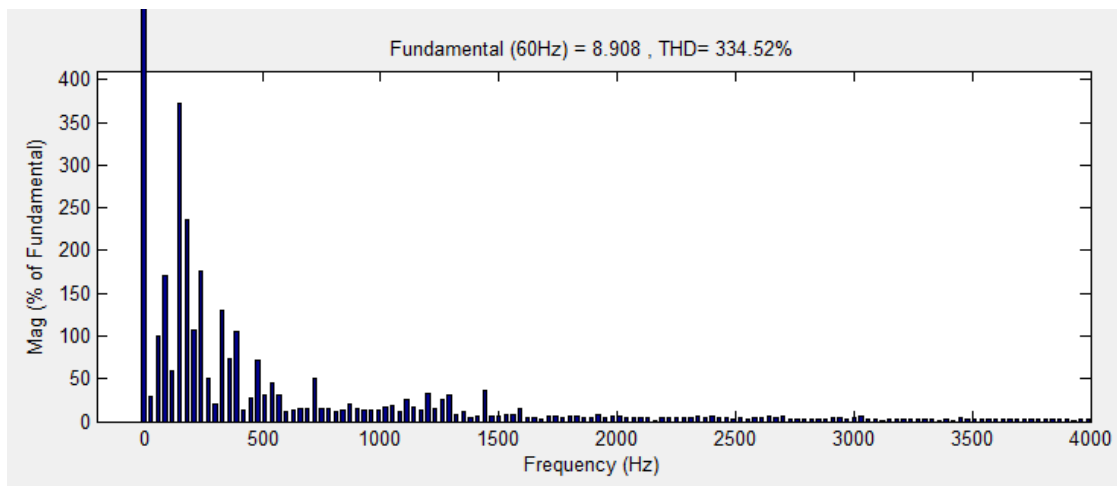


Figure IV.7 : Spectre d'harmonique du courant redressé.

$\alpha=40^\circ$

➤ Tensions :

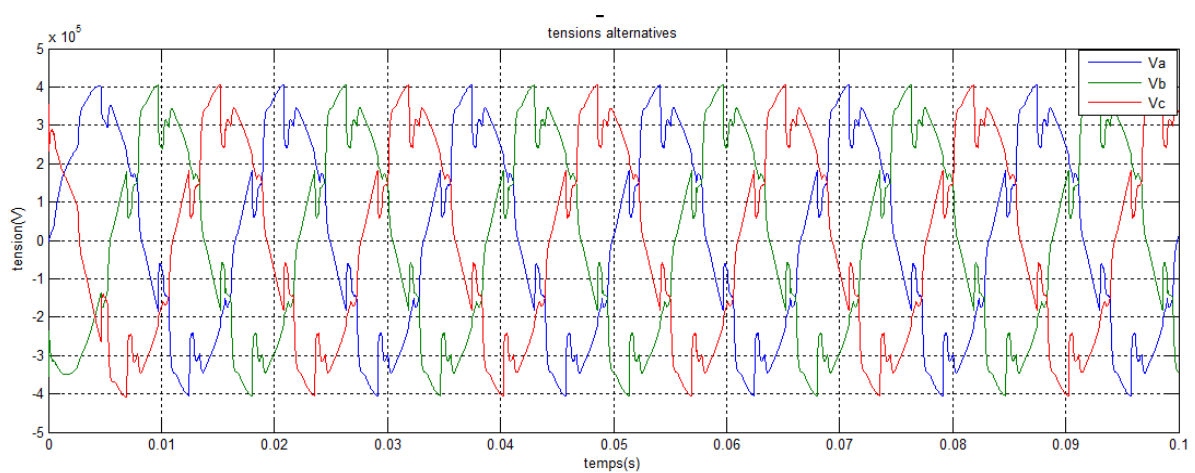


Figure IV.8 : Tensions alternatives des phases a b c.

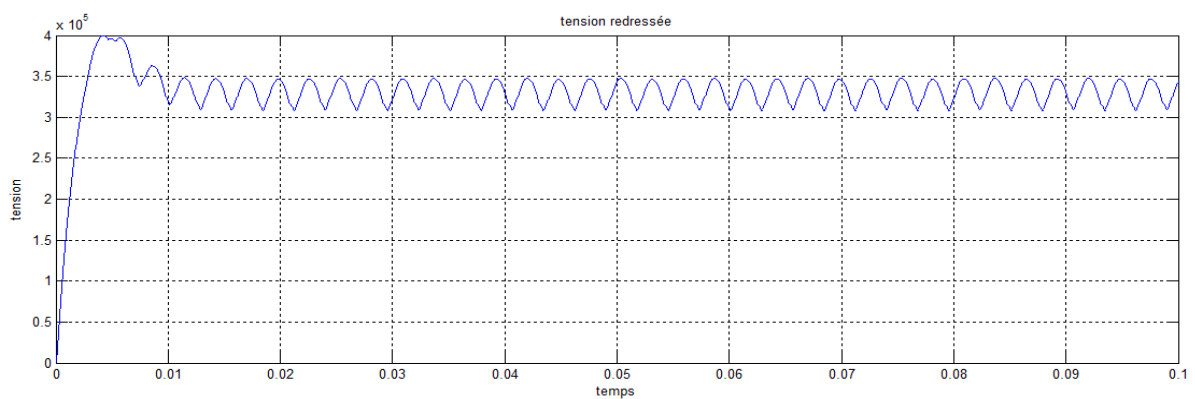


Figure IV.9 : tension redressée.

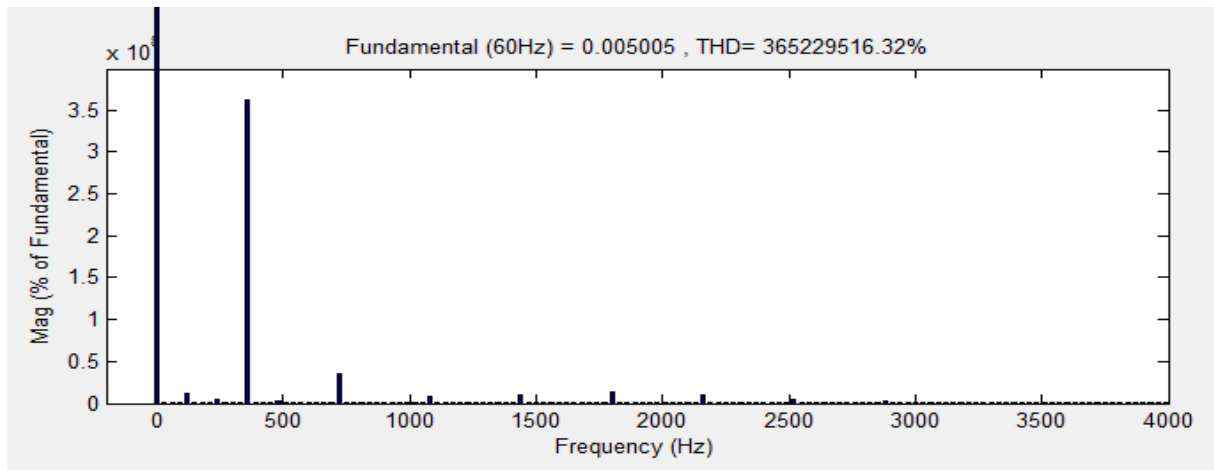


Figure IV.10 : spectre d'harmonique de la tension redressée.

➤ Courants :

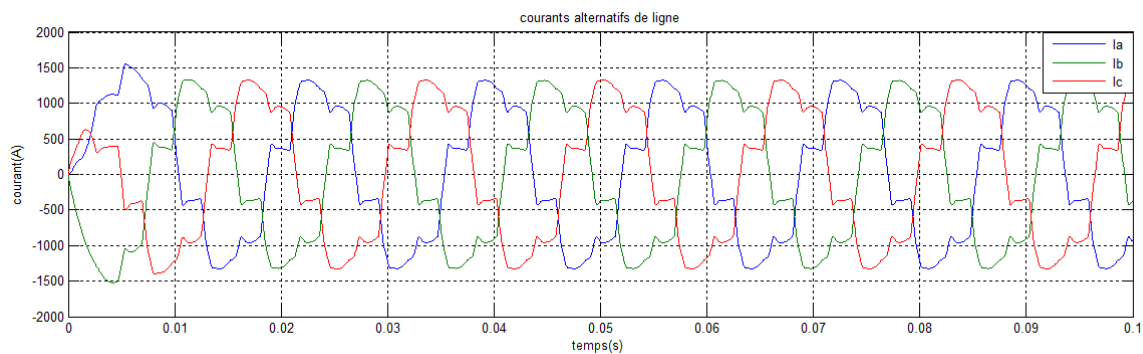


Figure IV.11 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.

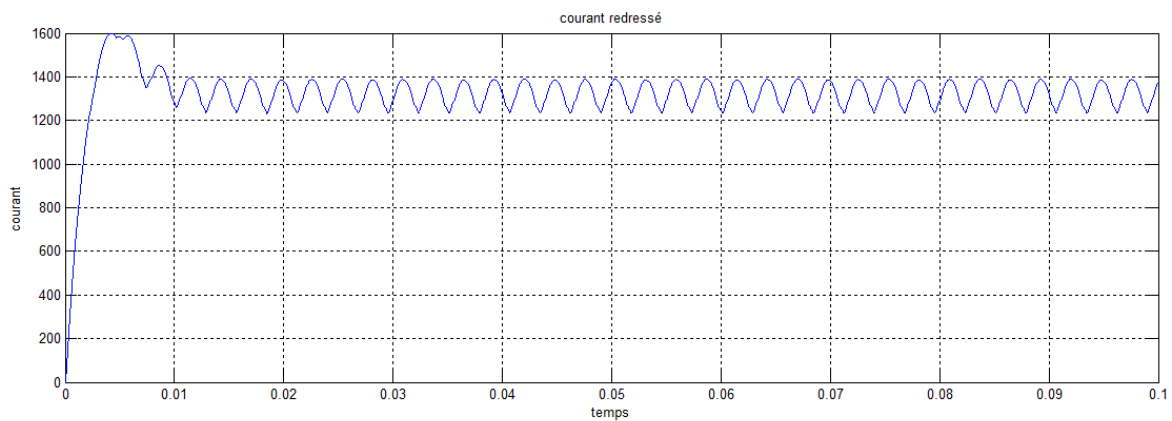


Figure IV.12 : courant redressé.

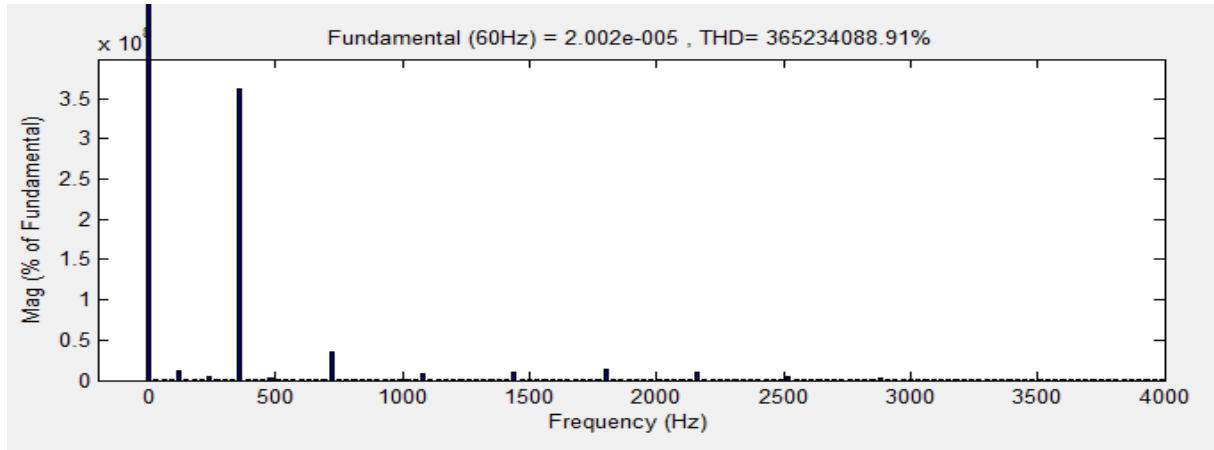


Figure IV.13 : spectre d'harmonique du courant redressé.

$\alpha=80^\circ$

➤ Tensions :

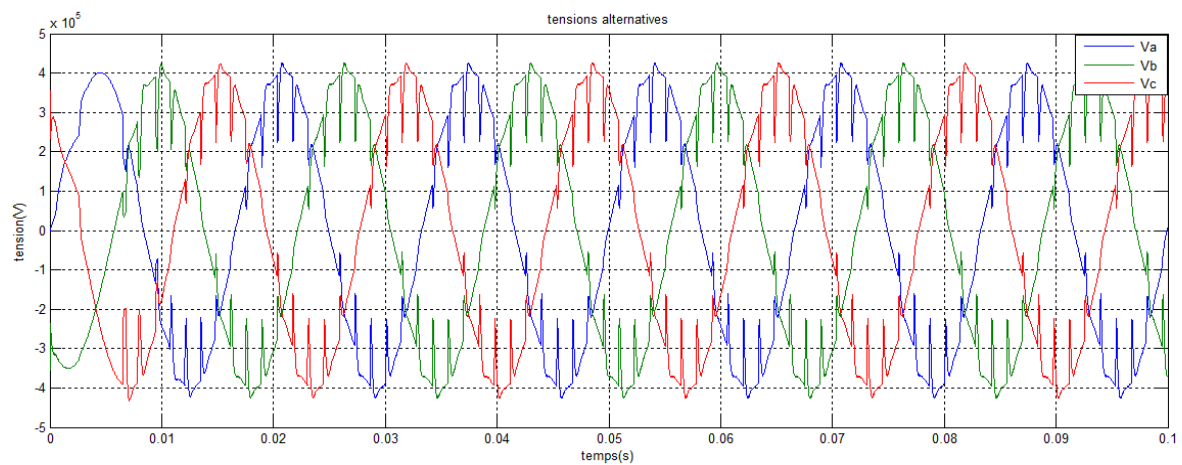


Figure IV.14 : tension alternatives des phases a b c.

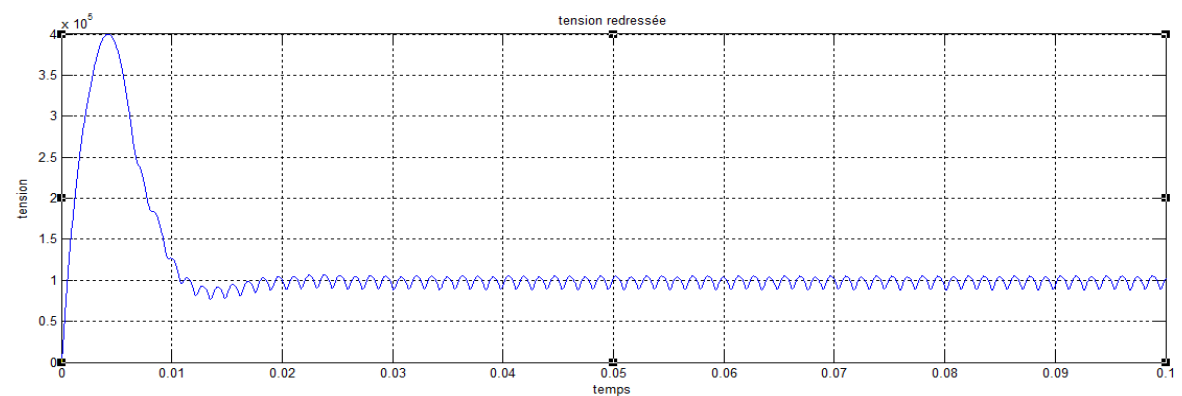


Figure IV.15 : courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.

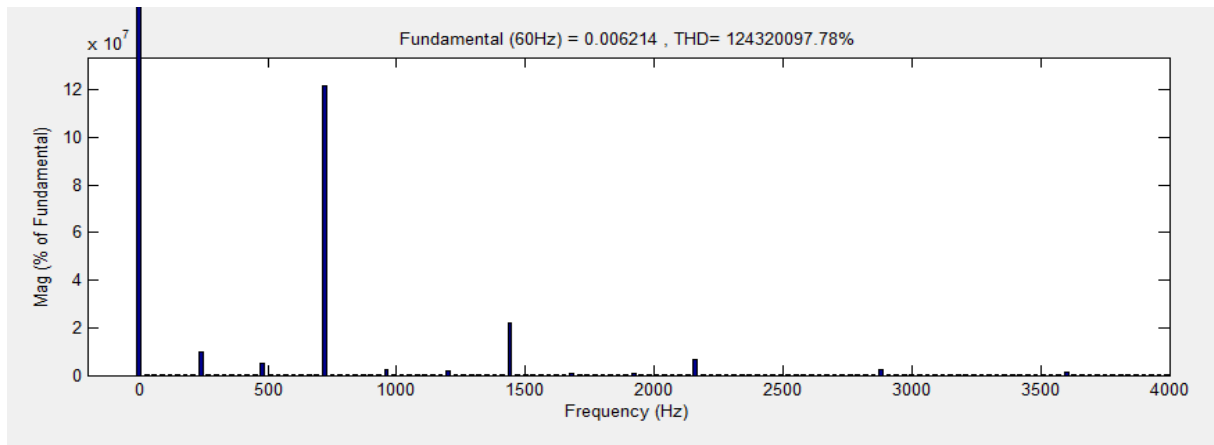


Figure IV.16 : spectre d'harmonique de la tension redressée.

➤ Courants :

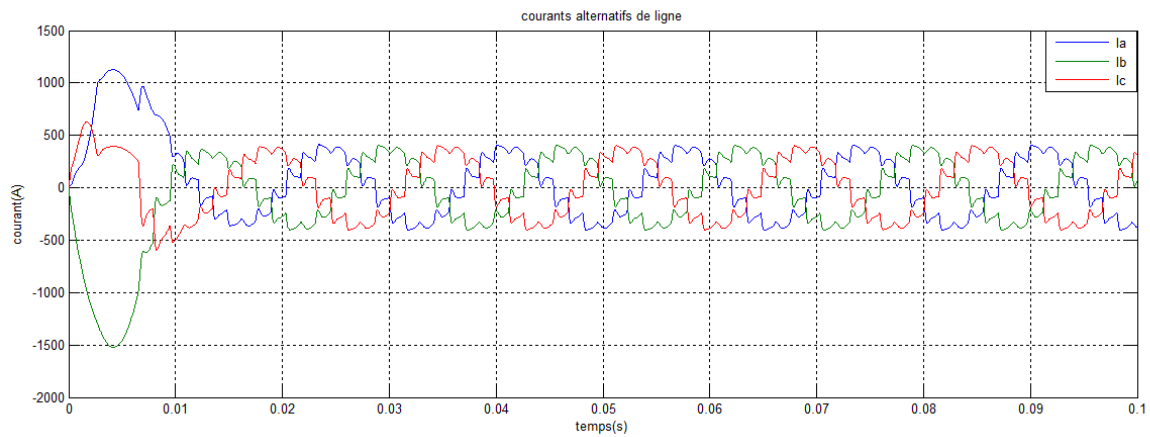


Figure IV.17 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.

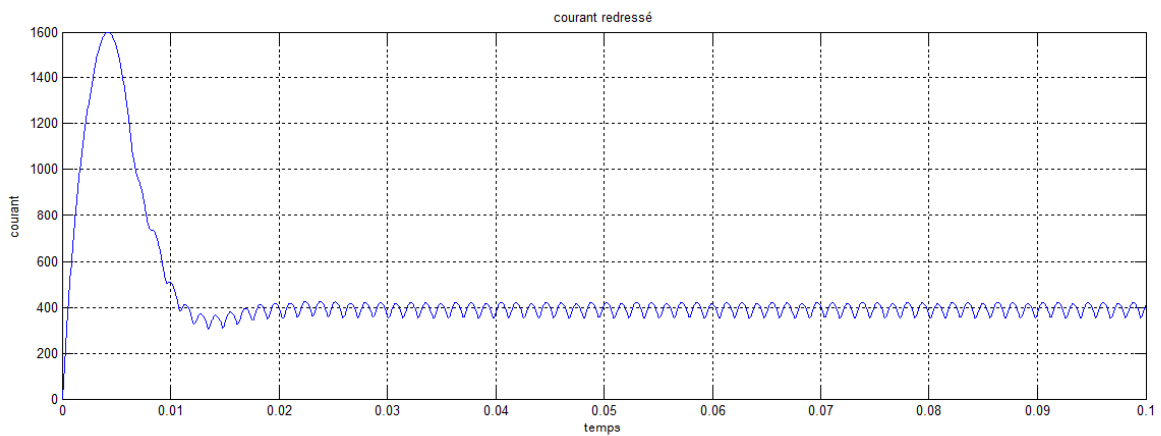


Figure IV.18 : Courant redressé.

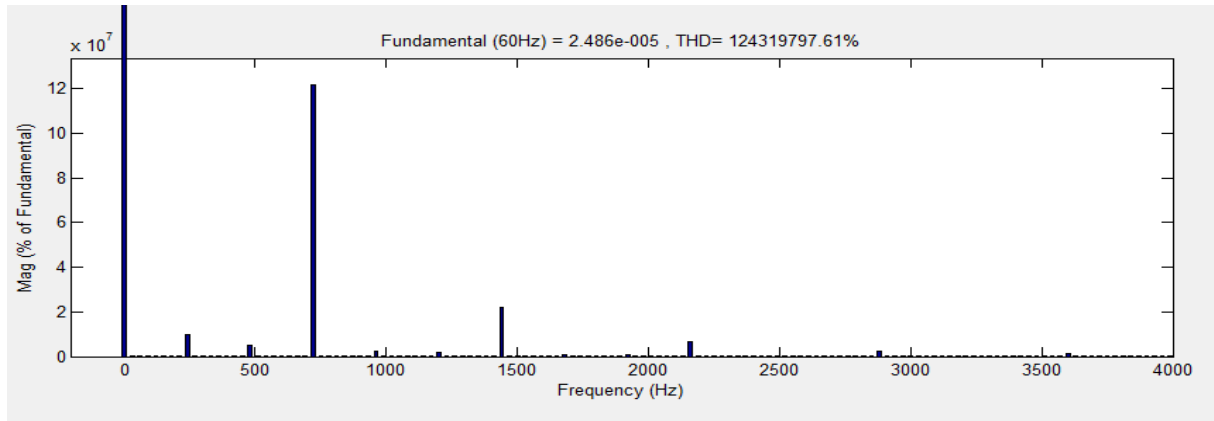


Figure IV.19 : spectre du courant redressé.

$\alpha=90^\circ$

➤ Tensions :

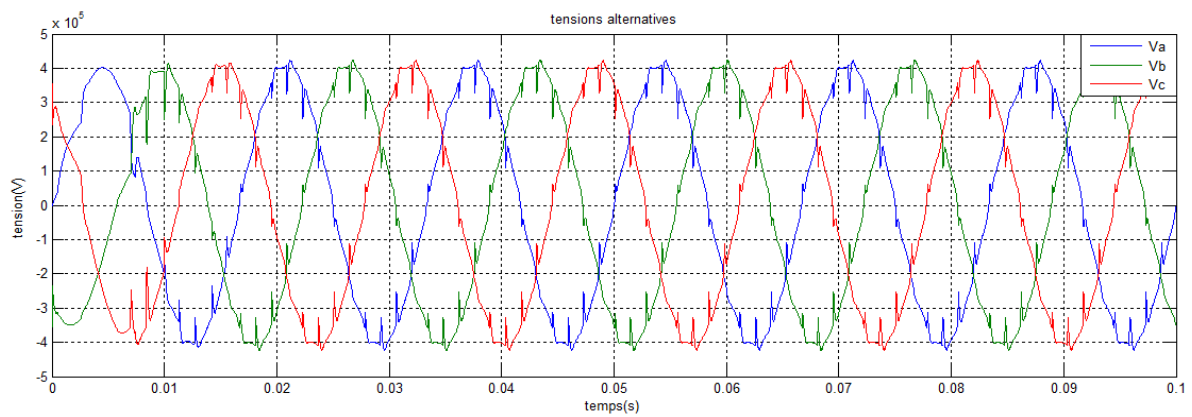
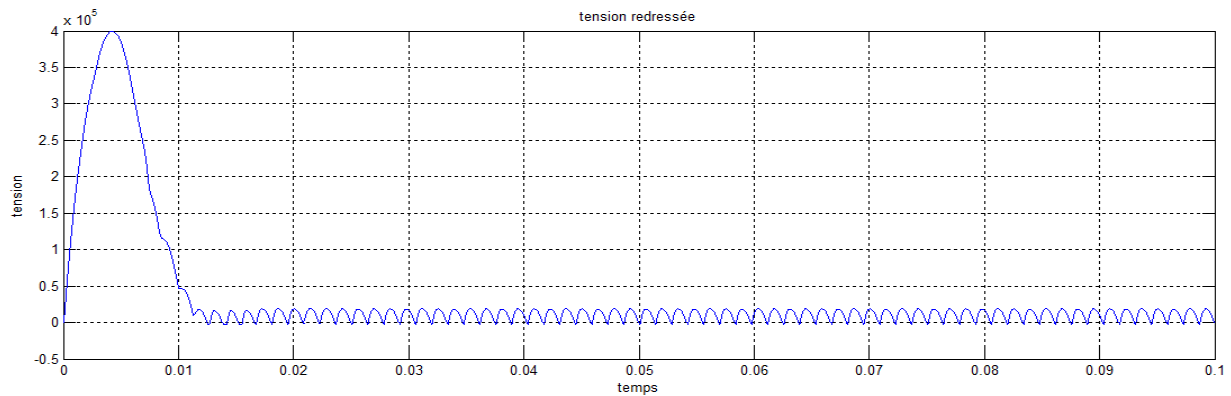


Figure IV.20 : Tensions alternatives des phases a b c.



figureIV.21 : tension redressée.

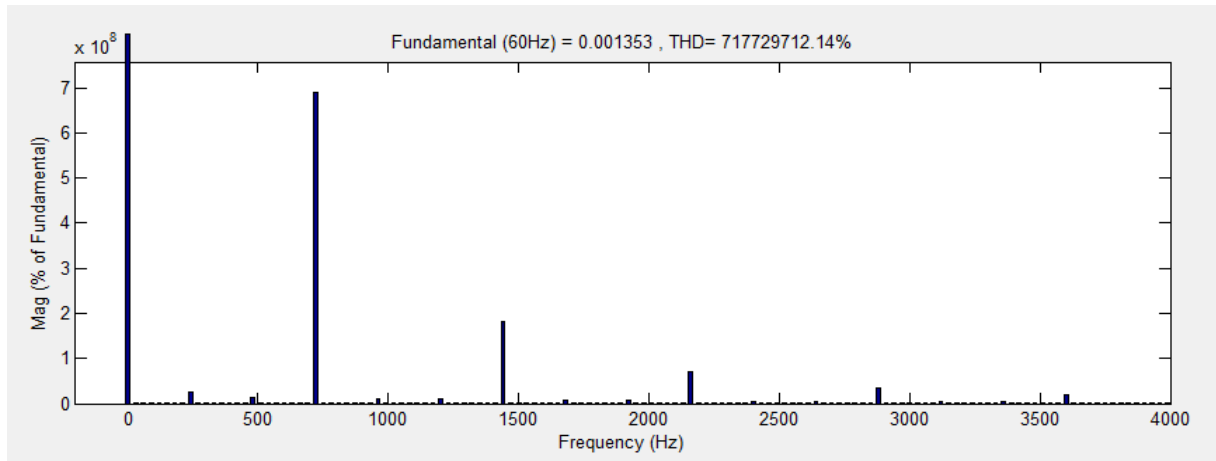


Figure IV.22 : spectre d'harmonique de la tension redressée.

➤ Courants :

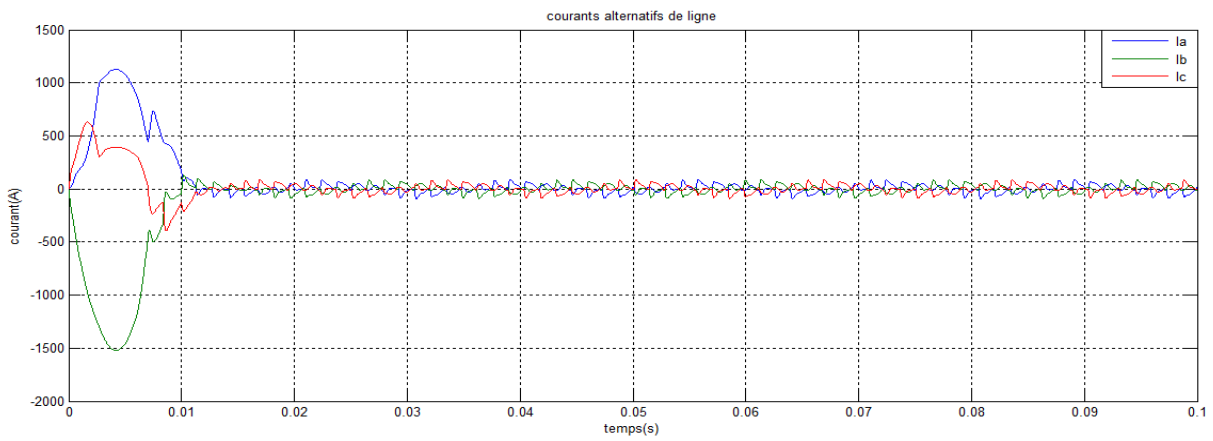


Figure IV.23 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.

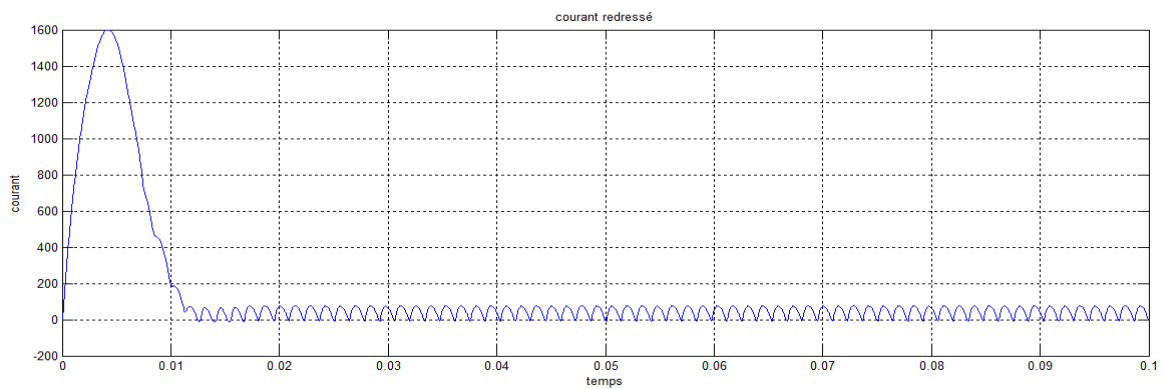
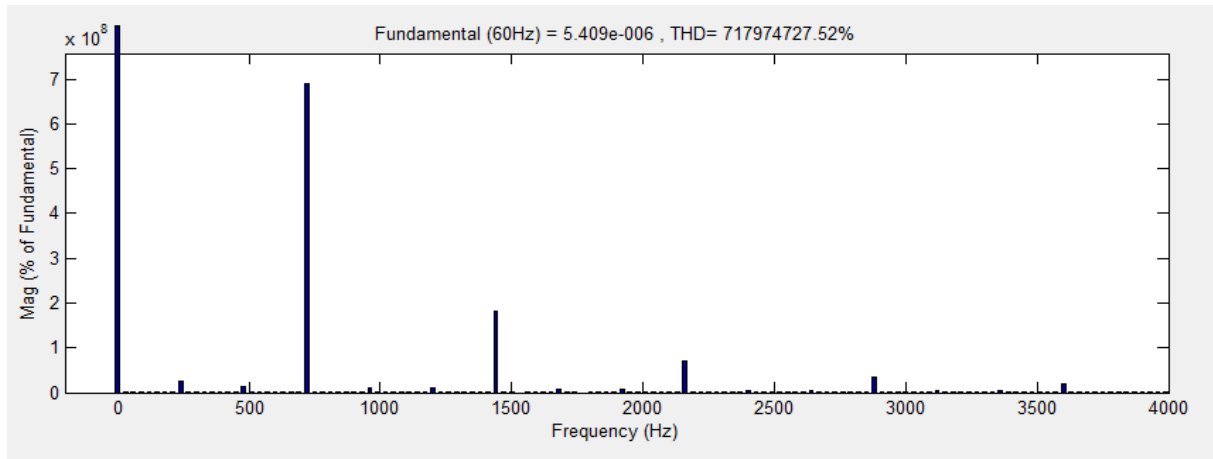


Figure IV.24 : Courant redressé.



**Figure IV.25 : spectre d'harmonique du courant redressé.**

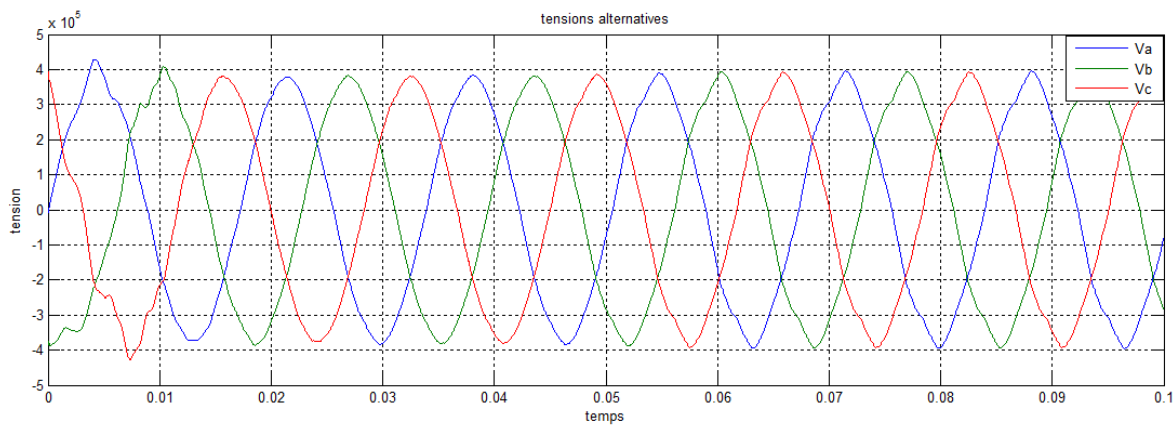
Les tensions alternatives des phases sont fortement perturbées, leurs formes sont non sinusoïdales, mais alternatives, cela due à la présence du redresseur qui génère ces signaux perturbateurs appelés harmoniques. Ce qui est également visible dans les courbes des courants alternatifs des phases.

Ces harmoniques se propagent vers la source engendrant des chutes de tension dans le réseau pour limiter ces perturbations on place les filtres et les compensateurs.

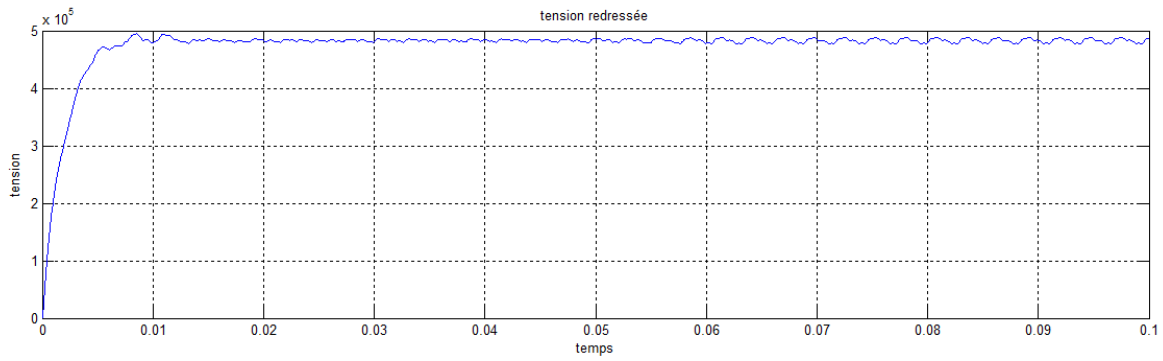
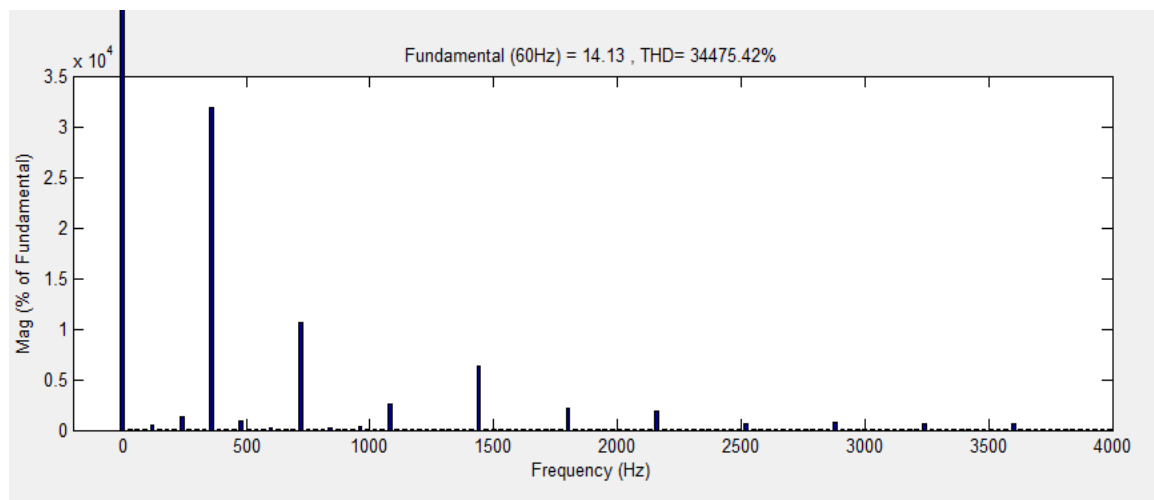
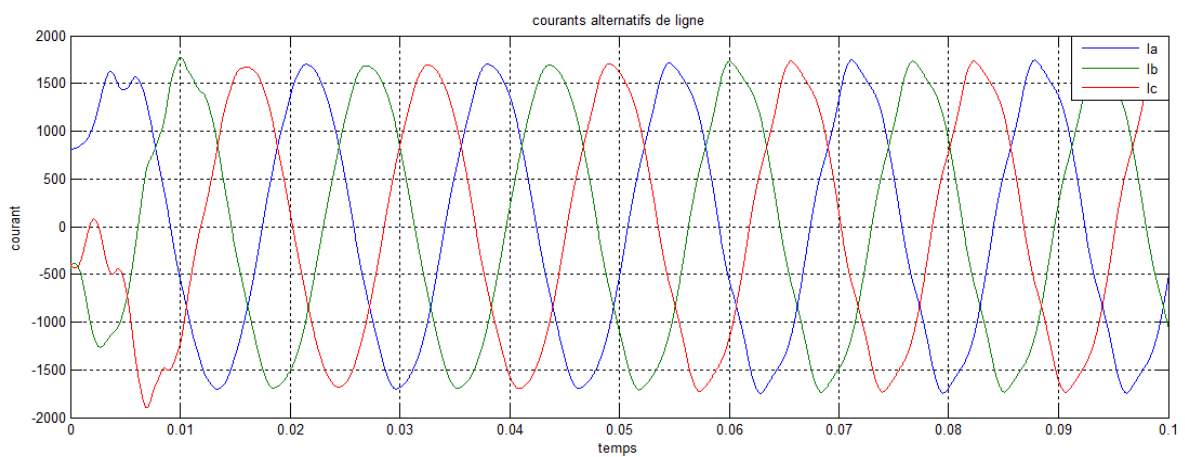
#### IV.4.2.Système avec filtrage et sans compensation :

$$\alpha=20^\circ$$

##### ➤ Tensions :



**Figure IV.26 : Tensions alternatives des phases a b c.**

**Figure IV.27 : tension redressée.****Figure IV.28 : Spectre d'harmonique de la tension redressée.****➤ Courants :****Figure IV.29 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.**

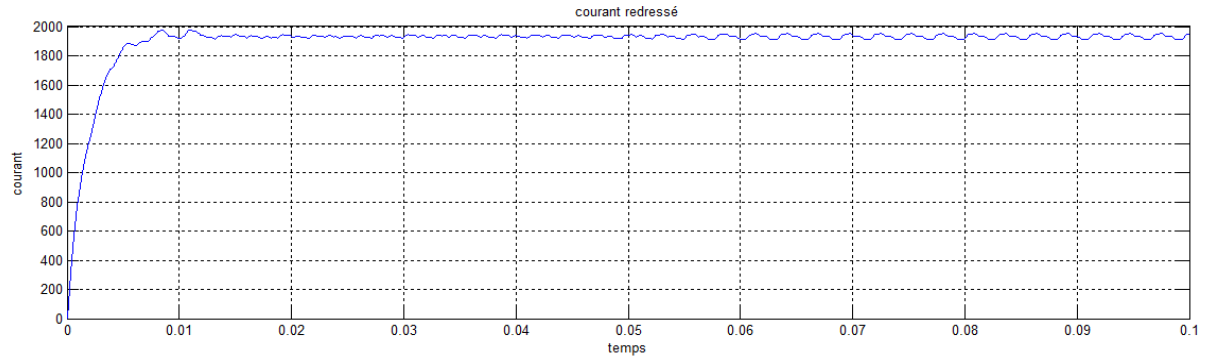


Figure IV.30 : courant redressé.

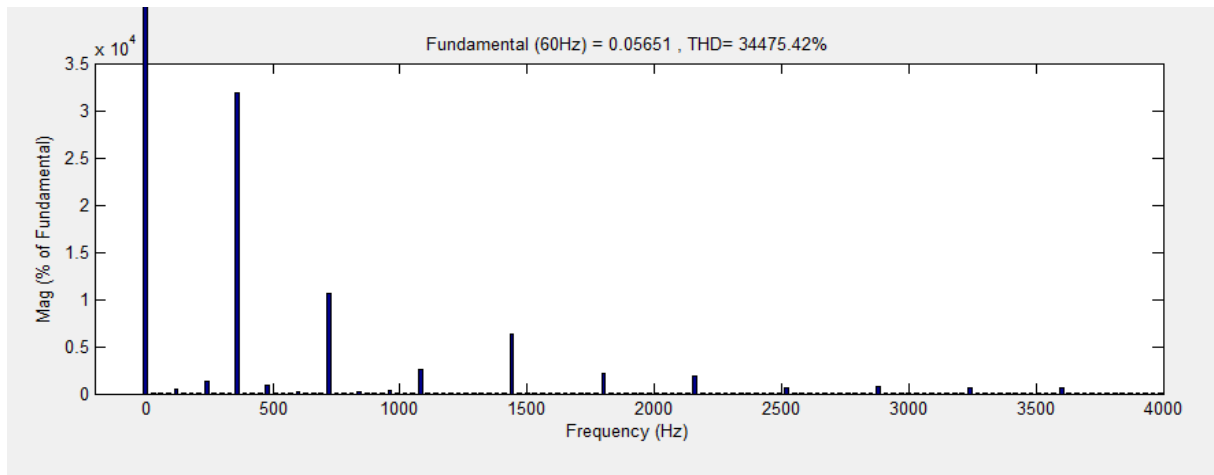


Figure IV.31 : spectre d'harmonique du courant redressé.

$\alpha=40^\circ$

➤ Tensions :

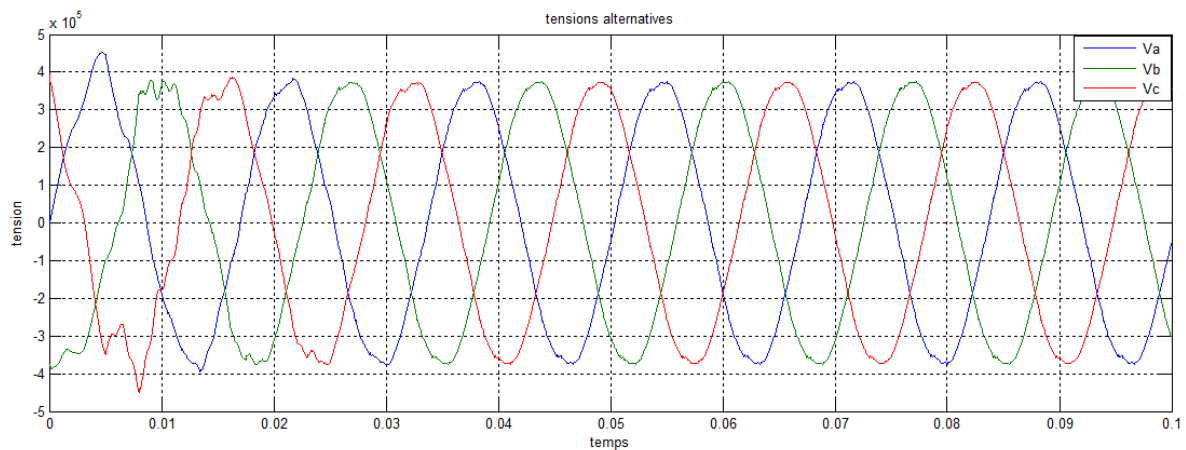


Figure IV.32 : Tensions alternatives des phases a b c.

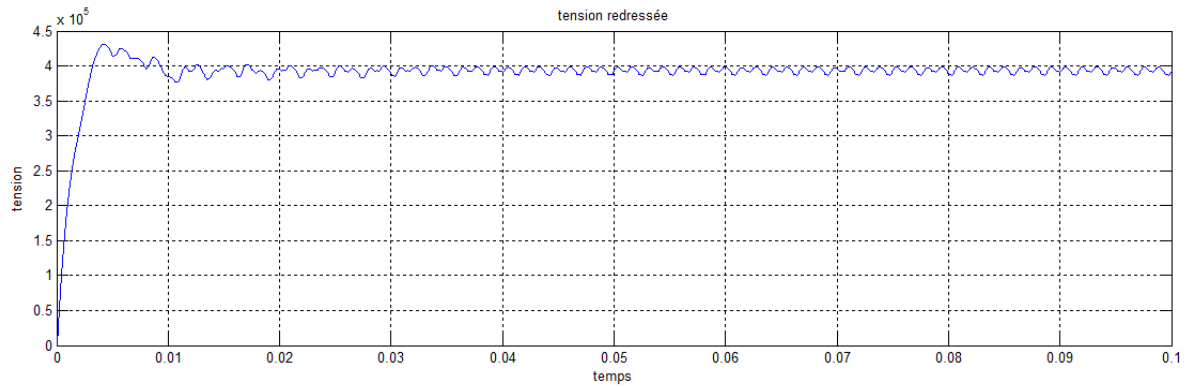


Figure IV.33 : Tension redressée.

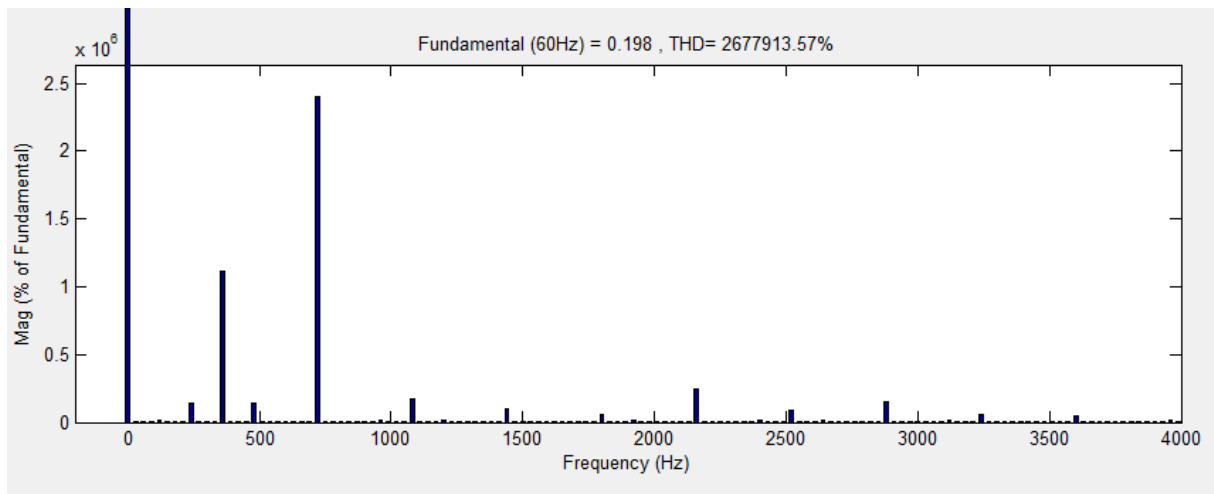


Figure IV.34 : spectre d'harmonique de la tension redressée.

➤ **Courants :**

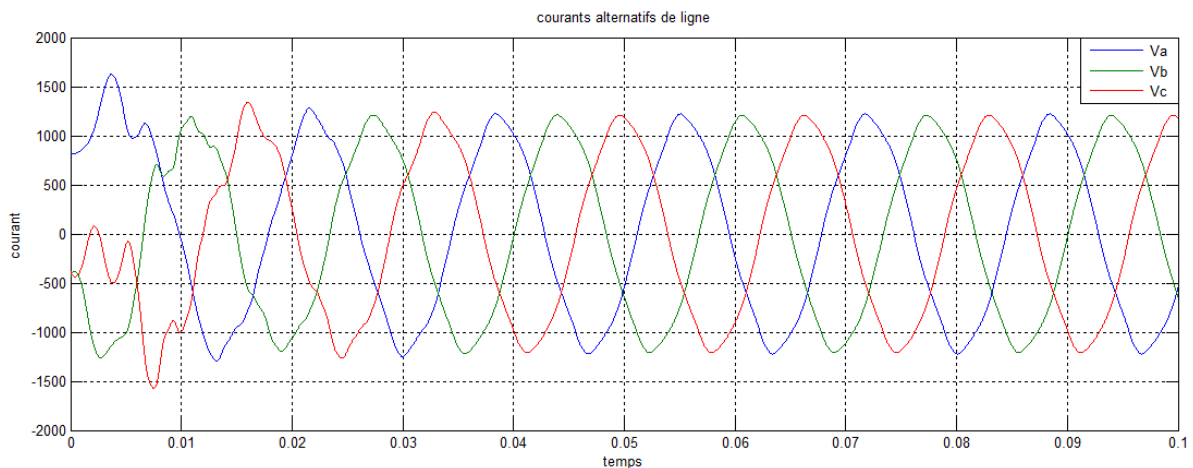


Figure IV.35 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.

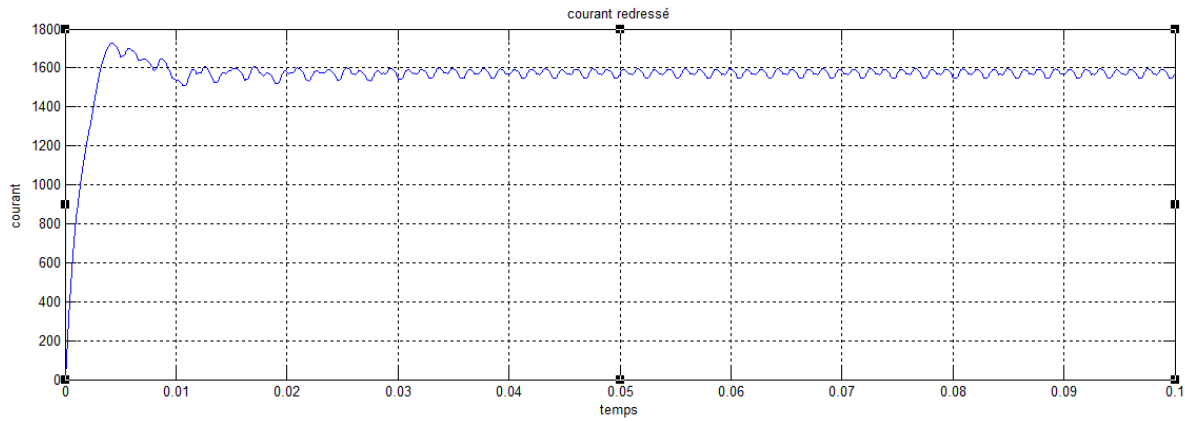


Figure IV.36 : Courants redressés.

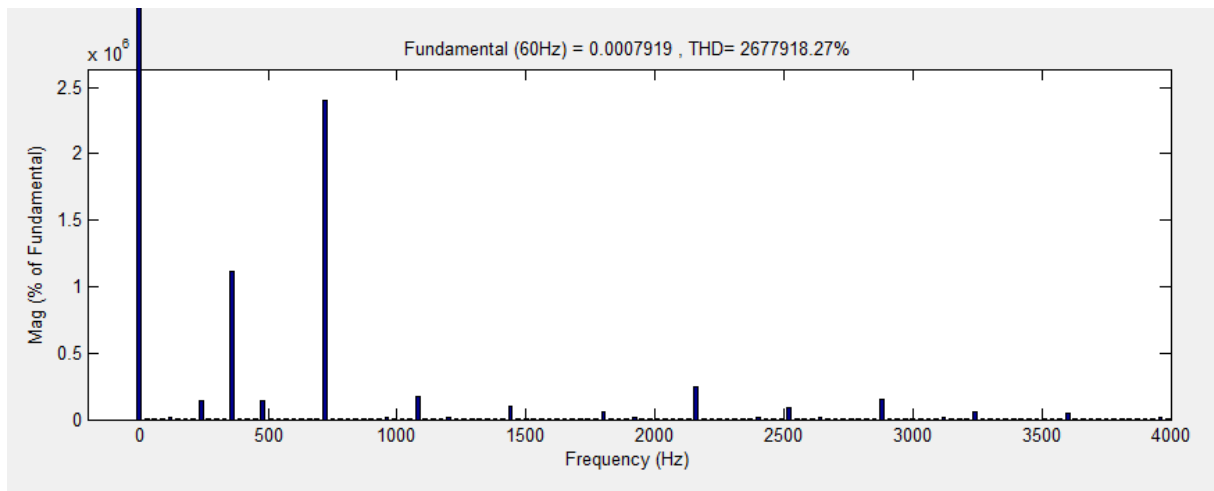


Figure IV.37 : spectre d'harmonique du courant.

$\alpha=80^\circ$

➤ Tensions :

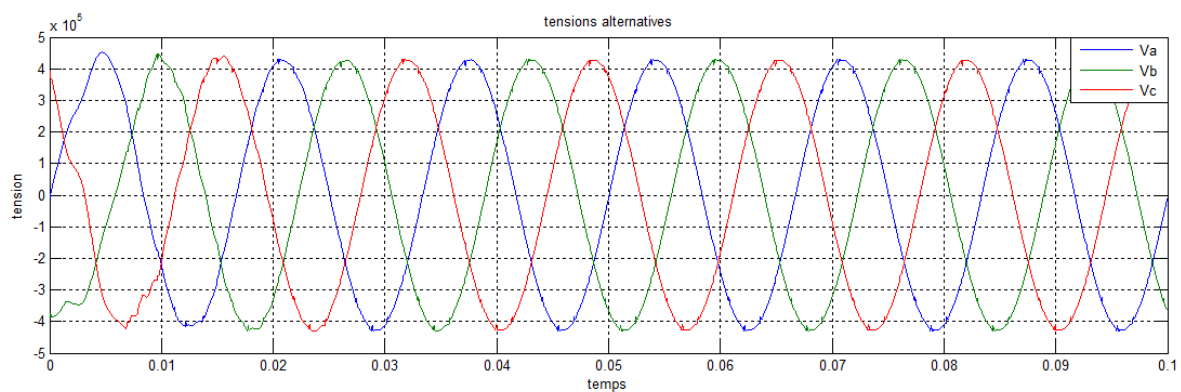
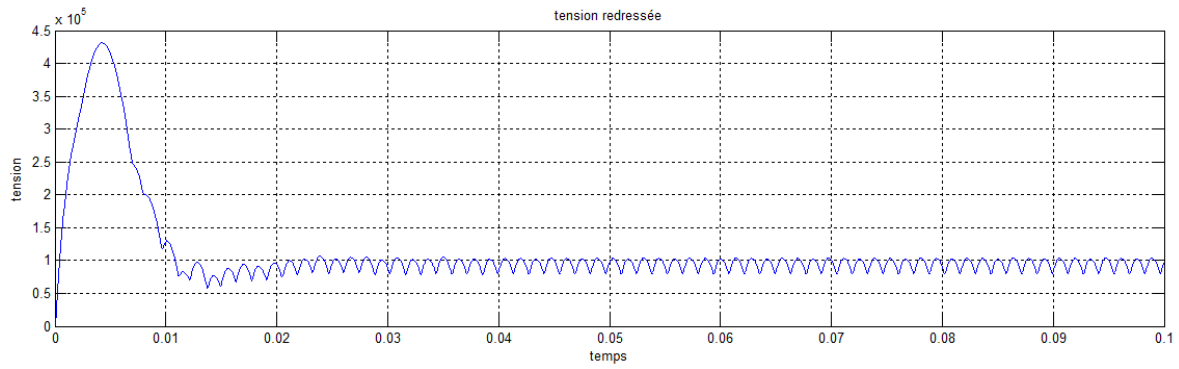
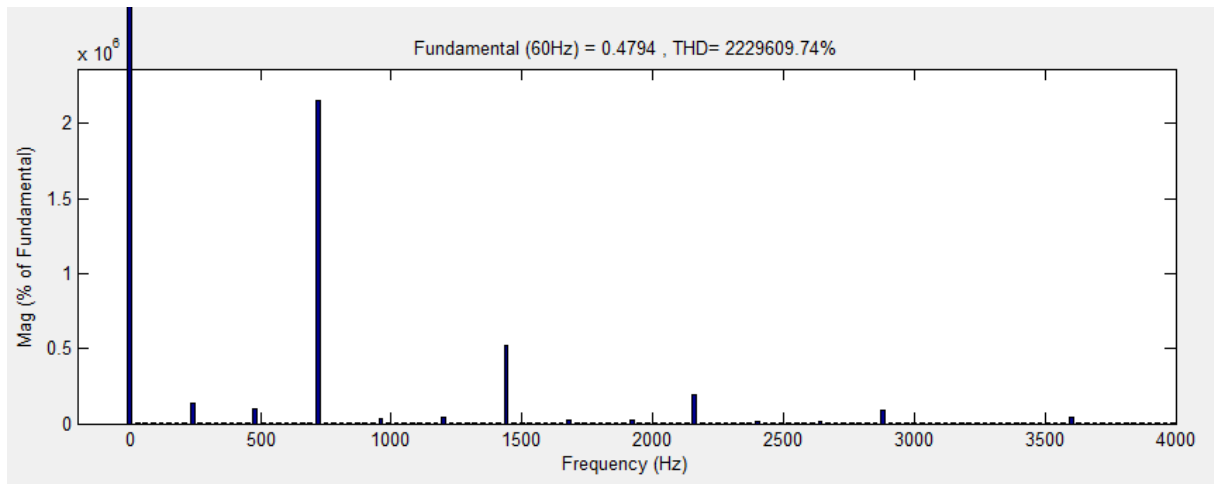


Figure IV.38 : Tensions alternatives des phases a b c.

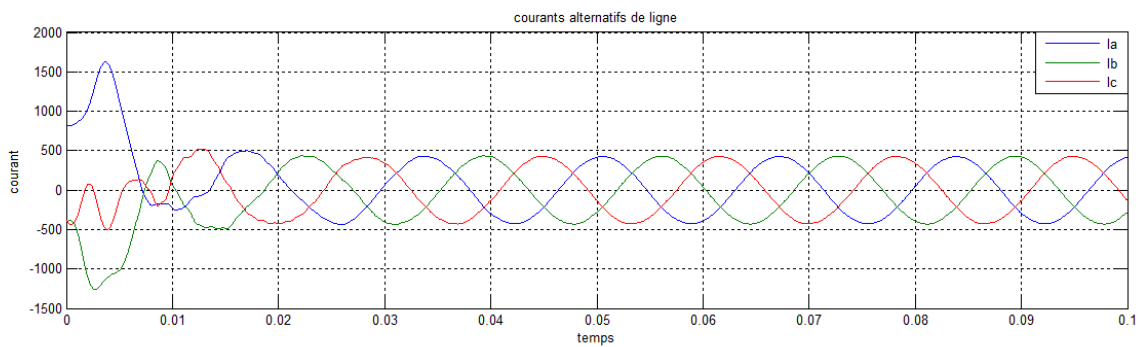


**Figure IV.39 : Tension redressée.**



**Figure IV.40 : spectre d'harmonique de la tension redressée.**

➤ **Courants :**



**Figure IV.41 : courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.**

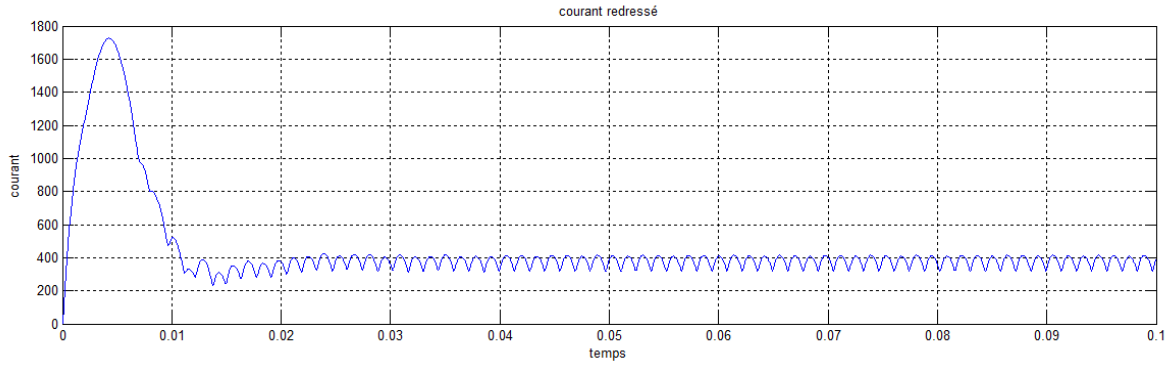


Figure IV.42 : courant redressé.

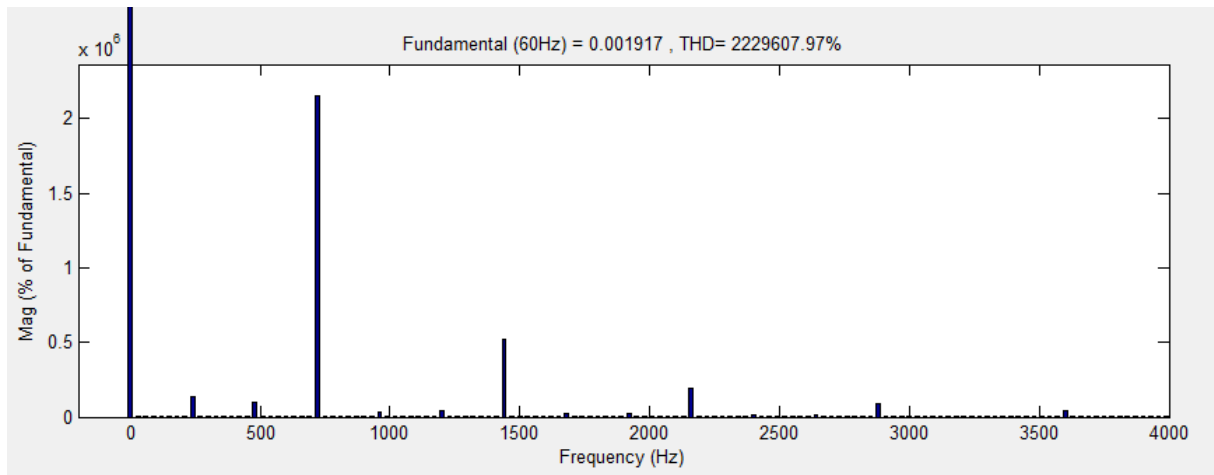


Figure IV.43 : Spectre d'harmonique du courant.

$\alpha=90^\circ$

➤ Tensions :

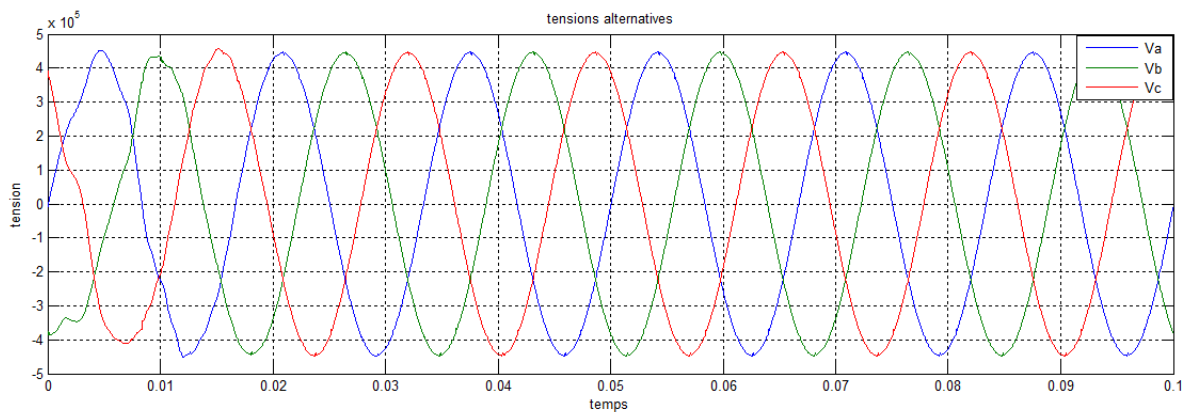
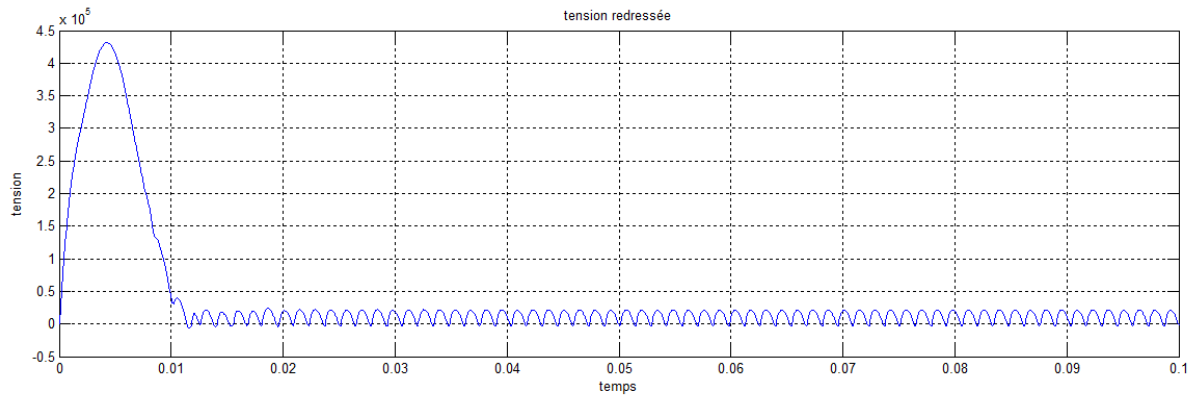
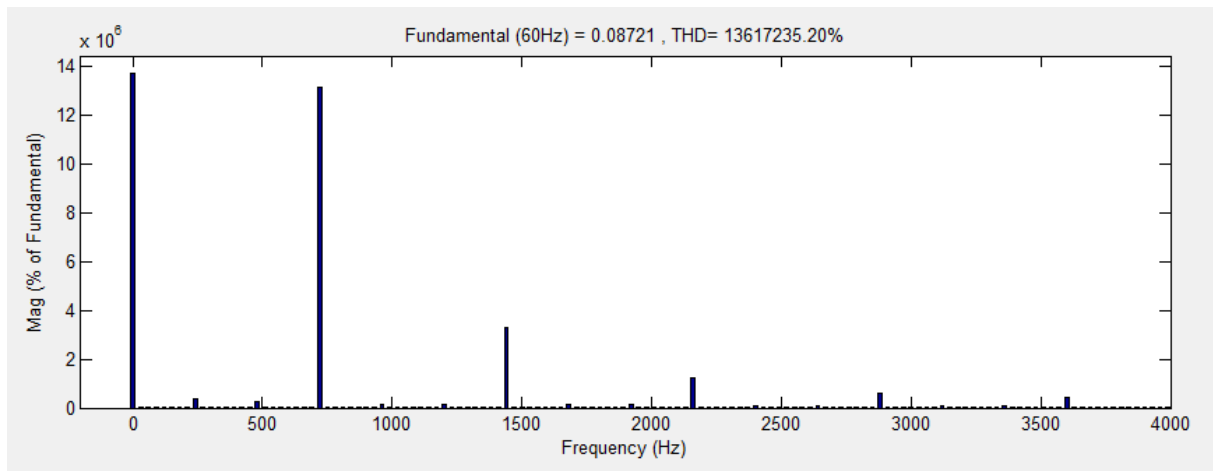
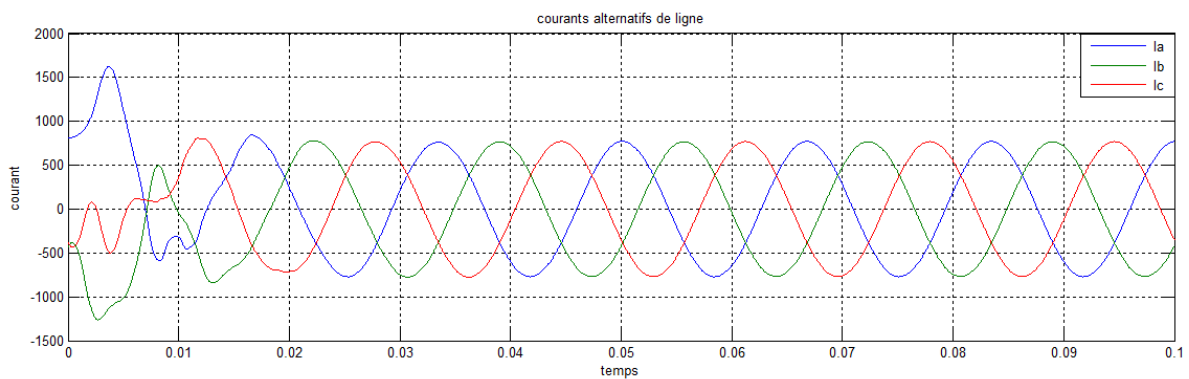


Figure IV.44 : Tensions alternatives des phases a b c.

**Figure IV.45 : Tension redressée.****Figure IV.46 : Spectre d'harmonique de la tension redressée.**

➤ **Courants :**

**Figure IV.47 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.**

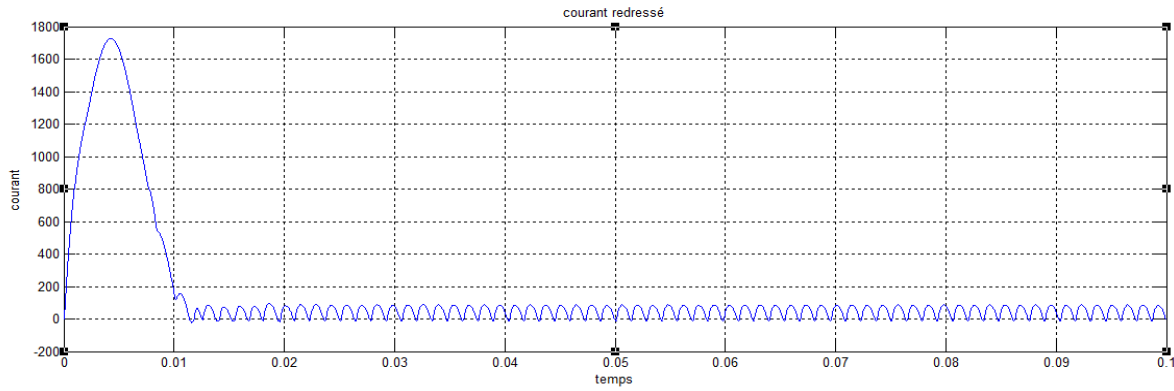


Figure IV.48 : courant redressé.

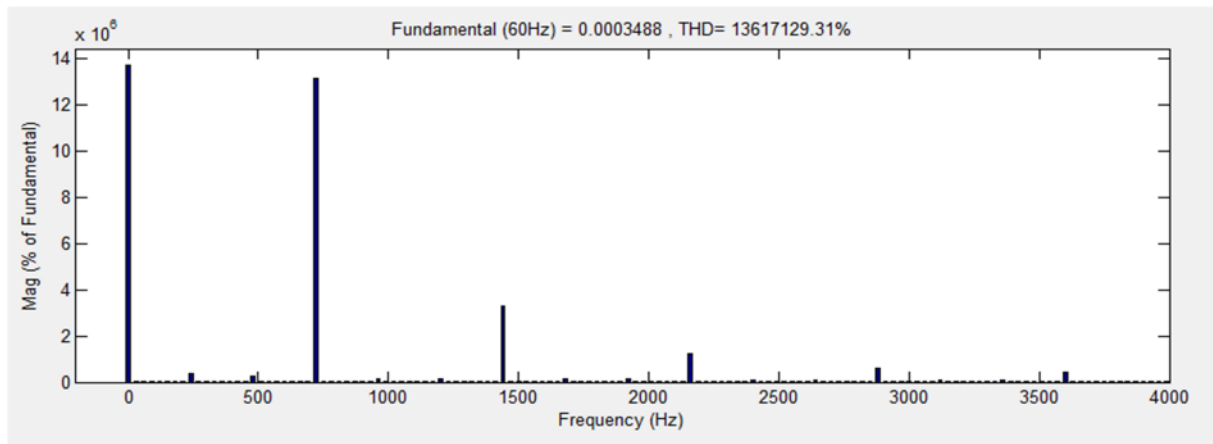


Figure IV.49 : spectre d'harmonique du courant redressé.

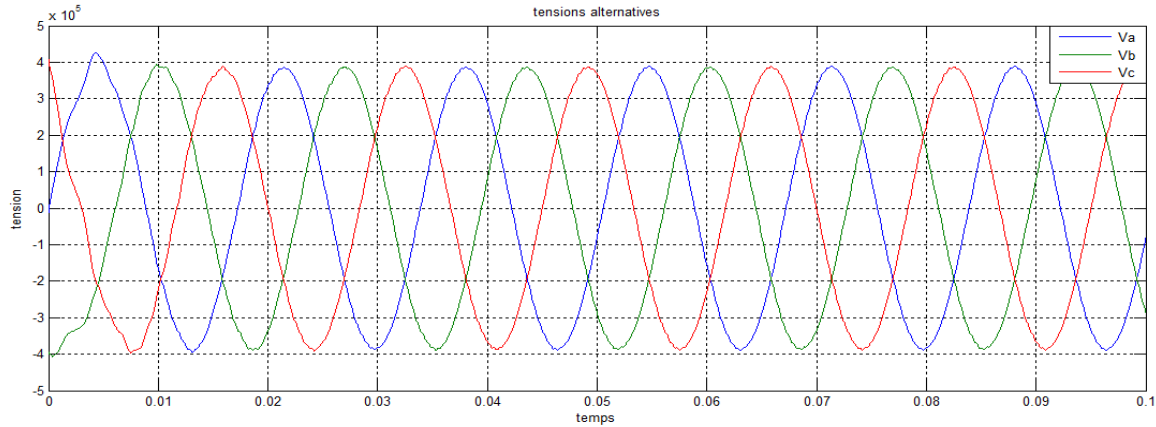
Les courbes des tensions et des courants alternatifs des phases sont presque lisses, ont des formes sinusoïdales, cela grâce à la présence des filtres qui ont pour rôle d'éliminer les harmoniques. Mais ça reste une légère déformation aux sommets des sinusoides.

Le filtrage dans le réseau est très important pour éviter les incidents que causent les harmoniques.

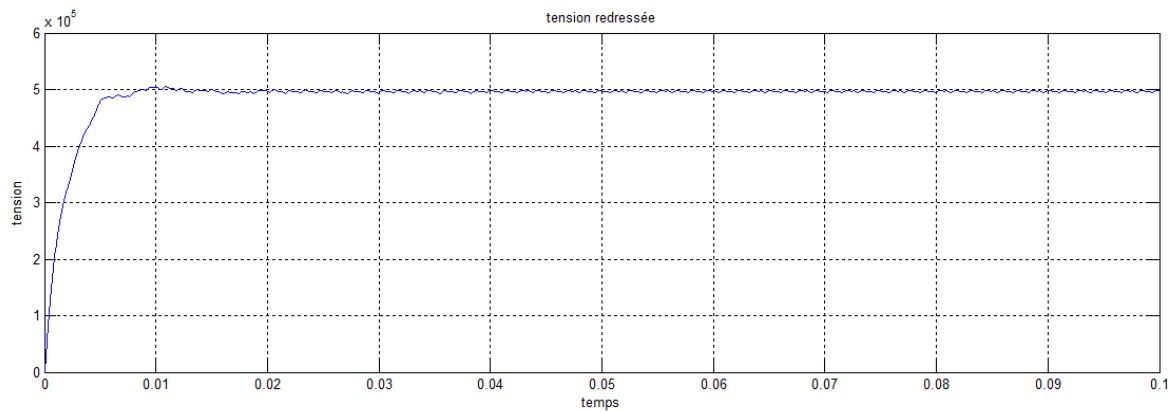
**IV.4.3. Système avec filtrage et avec compensation :**

$\alpha=20^\circ$

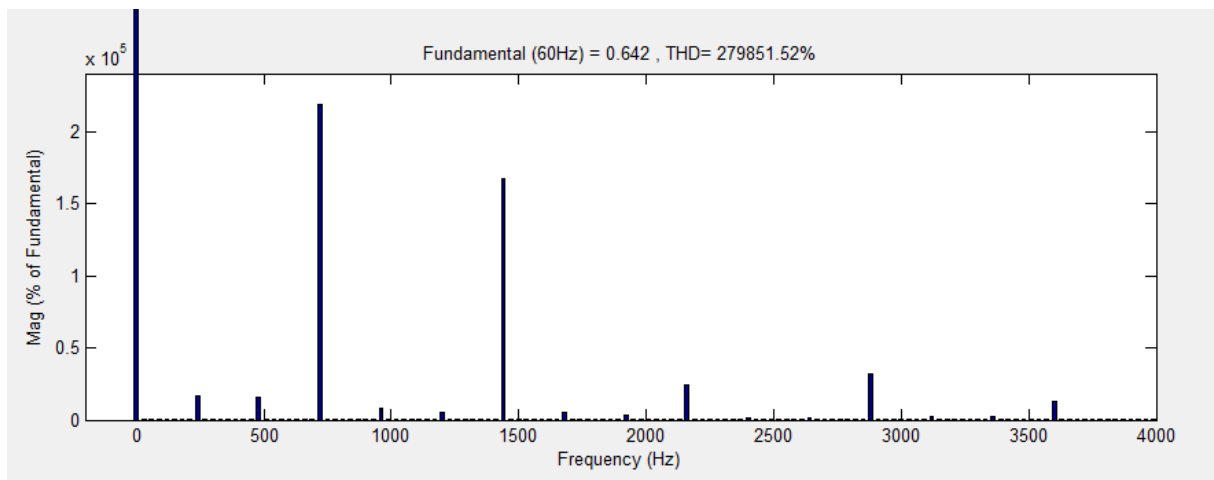
➤ **Tensions :**



**Figure IV.50 : Tensions alternatives des phases a b c.**

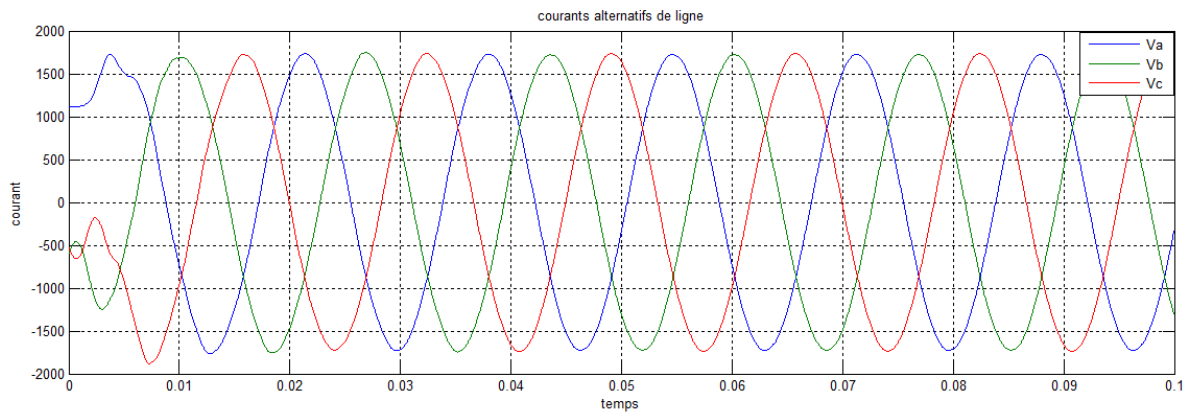


**Figure IV.51 : Tension redressée.**

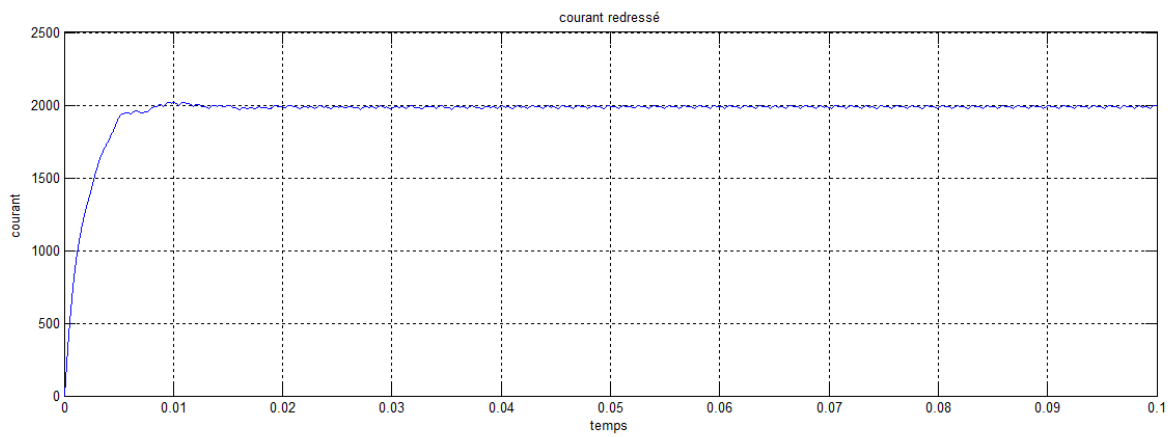


**Figure IV.52 : spectre d'harmonique de la tension redressée.**

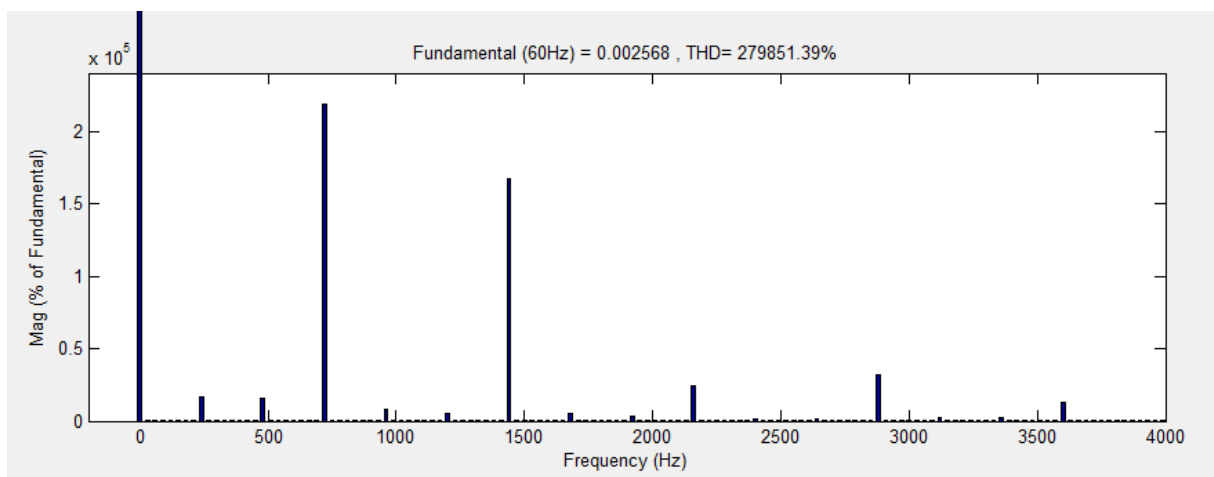
➤ **Courants :**



**Figure IV.53 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.**



**Figure IV.54 : Courant redressé.**



**Figure IV.55 : Spectre d'harmonique du courant.**

$\alpha=40^\circ$

➤ Tensions :

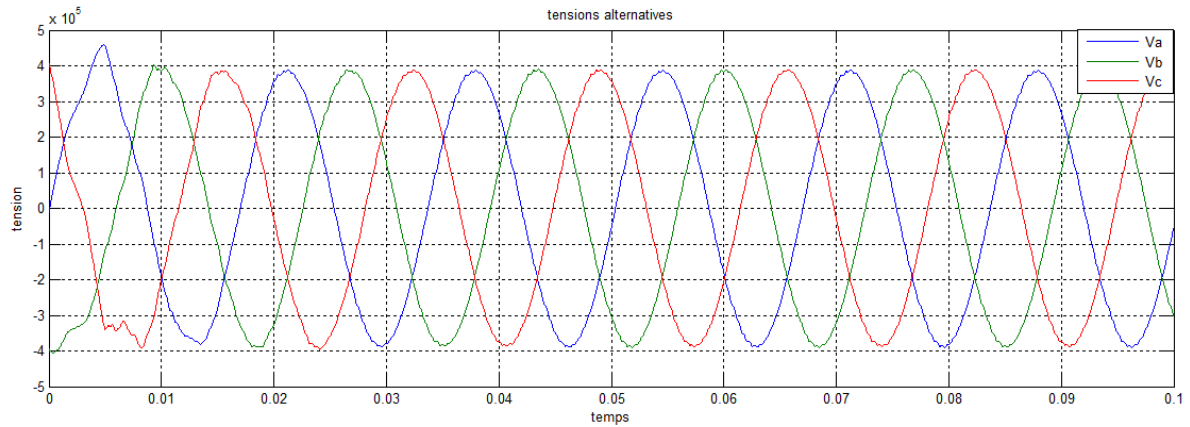


Figure IV.56 : Tensions alternatives des phases a b c.

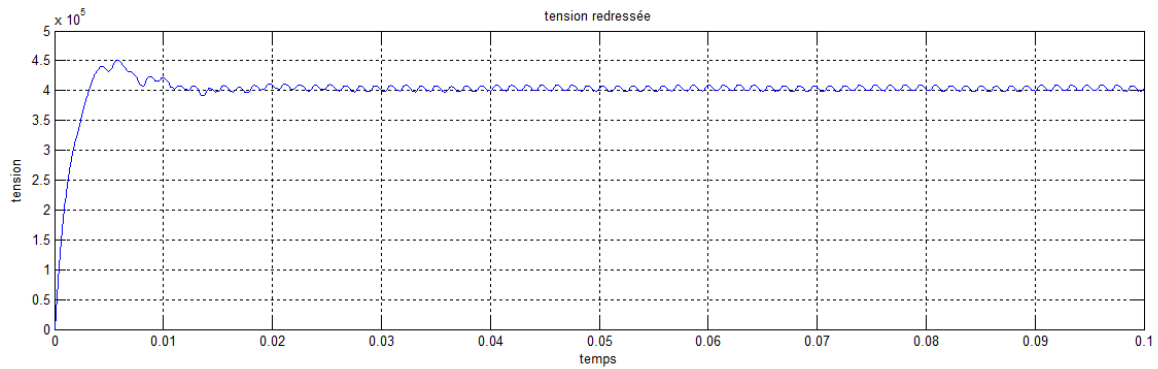


Figure IV.57 : tension redressée.

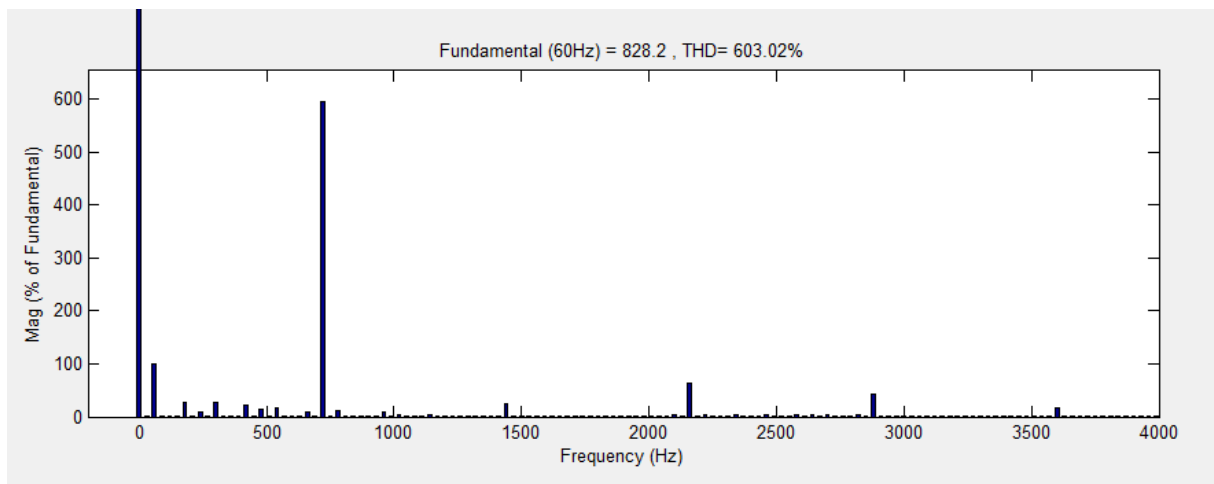
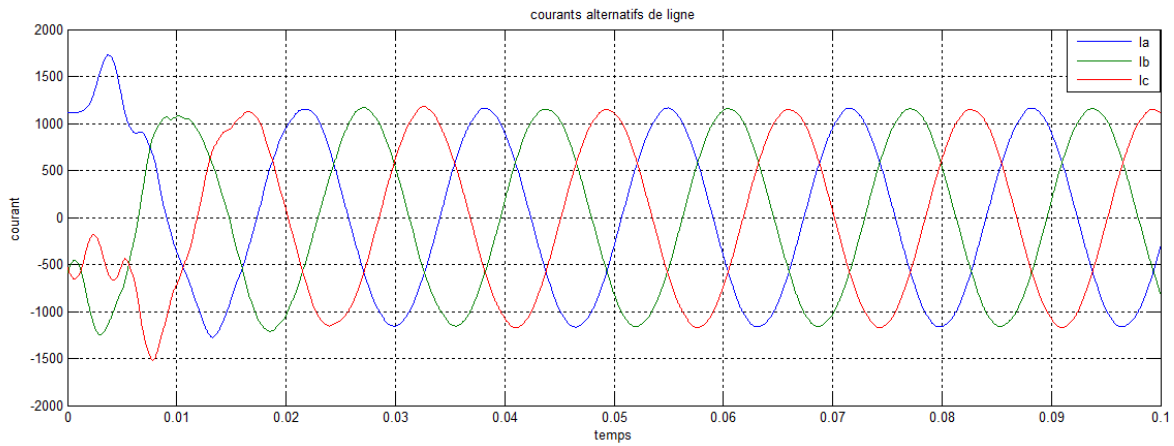
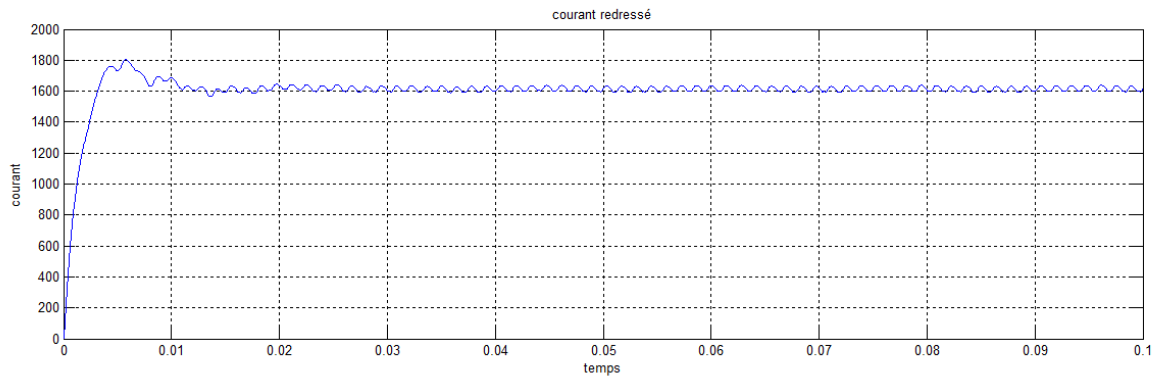


Figure IV.58 : Spectre d'harmonique de la tension redressée.

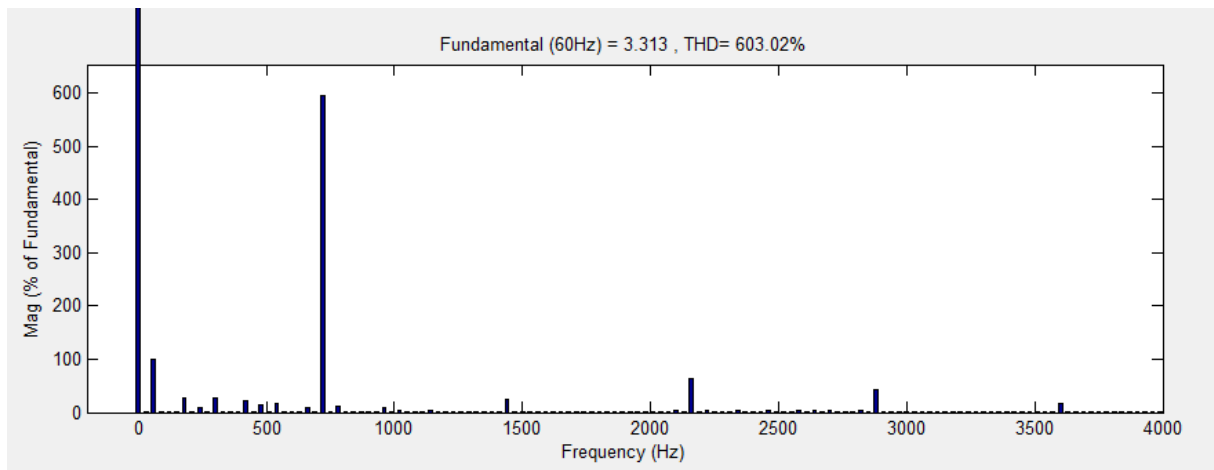
➤ **Courants :**



**Figure IV.59 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib ,Ic.**



**Figure IV.60 : Courant redressé.**



**Figure IV.61 : Spectre d'harmonique du courant redressé.**

$\alpha=80^\circ$

➤ Tensions :

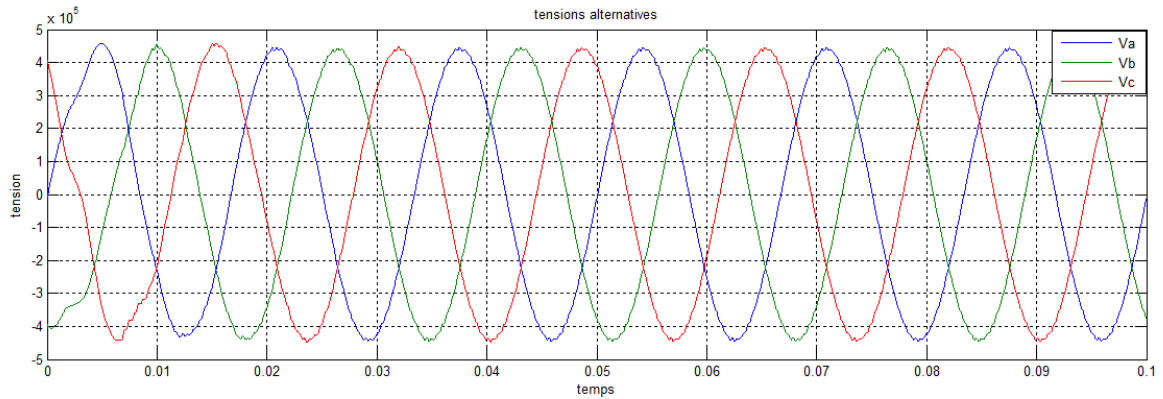


Figure IV.62 : Tensions alternatives des phases a b c.

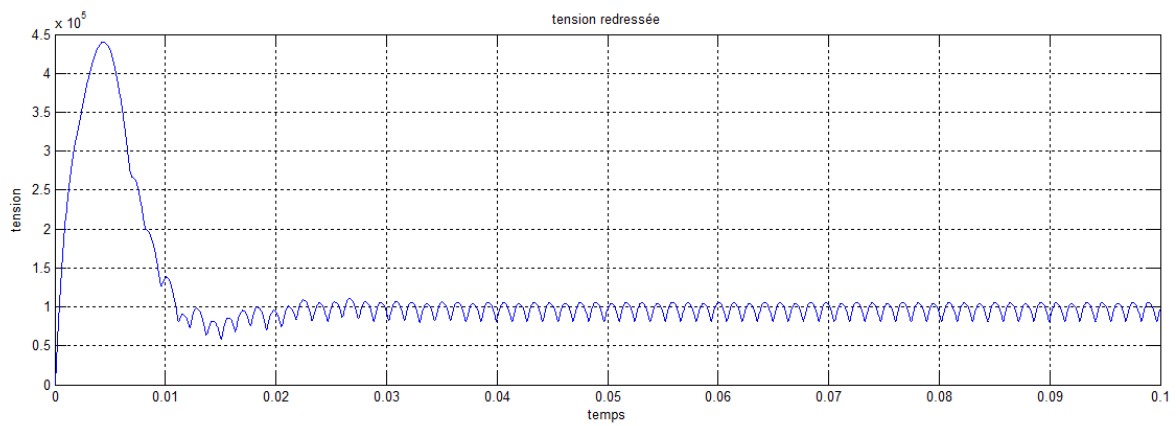


Figure IV.63 : Tension redressée.

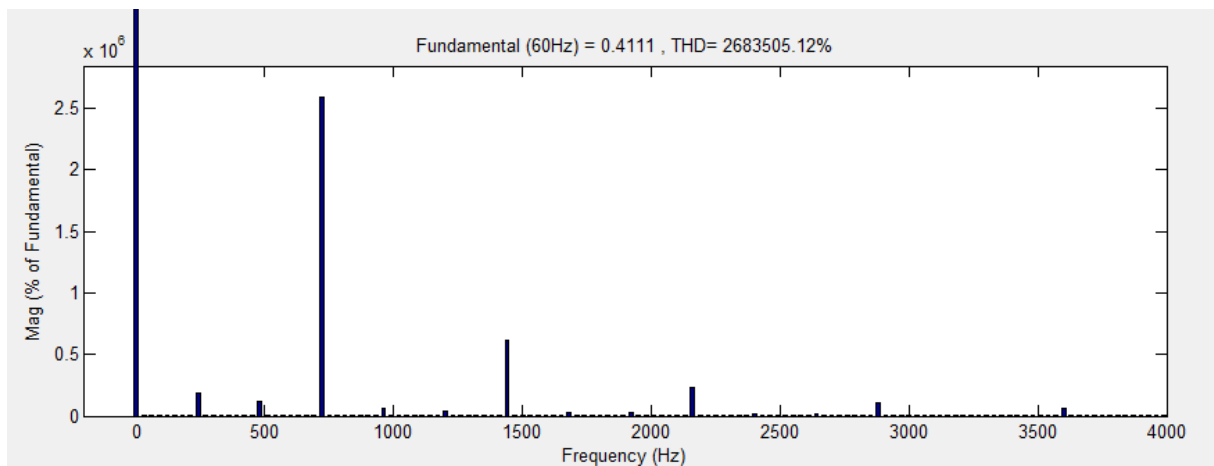
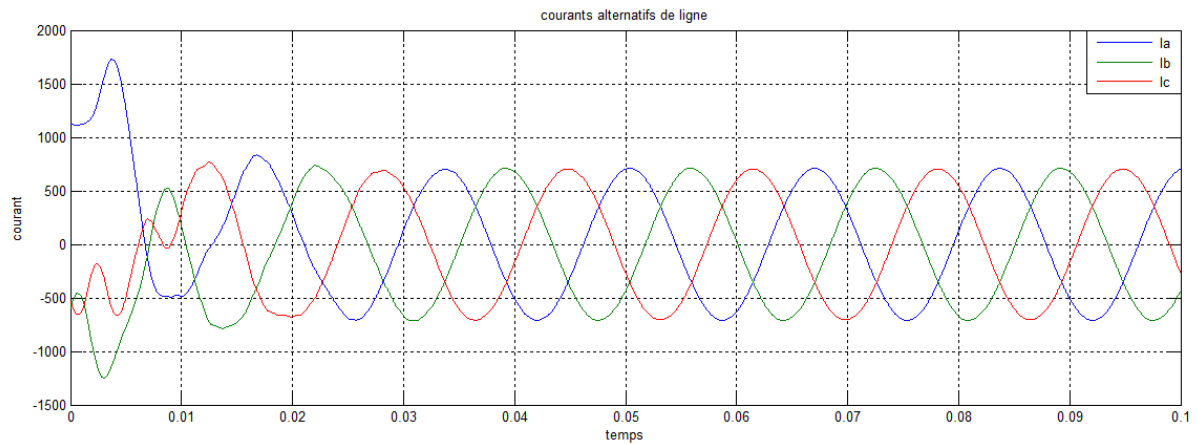
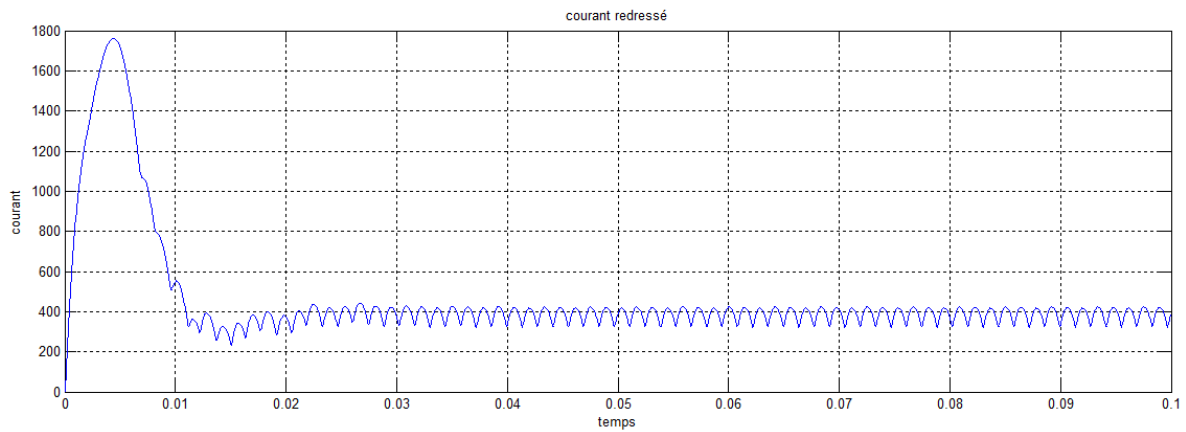


Figure IV.64 : spectre d'harmonique de la tension redressée

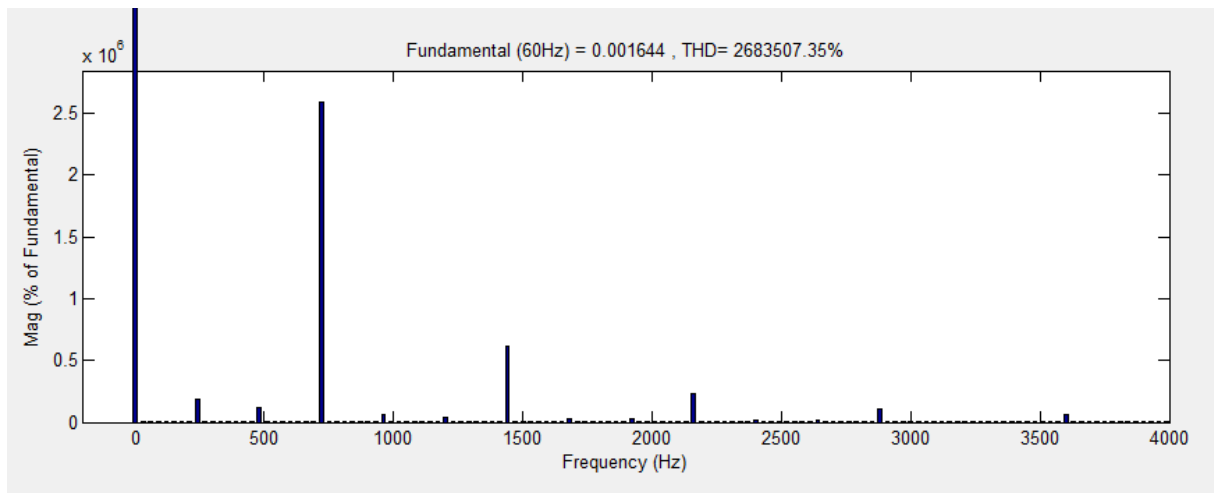
➤ **Courants :**



**Figure IV.65 : Courants alternatifs des lignes Ia, Ib, Ic.**



**Figure IV.66 : Courants redressé.**



**Figure IV.67 : Spectre d'harmonique du courant redressé.**

$\alpha=90^\circ$

➤ Tensions :

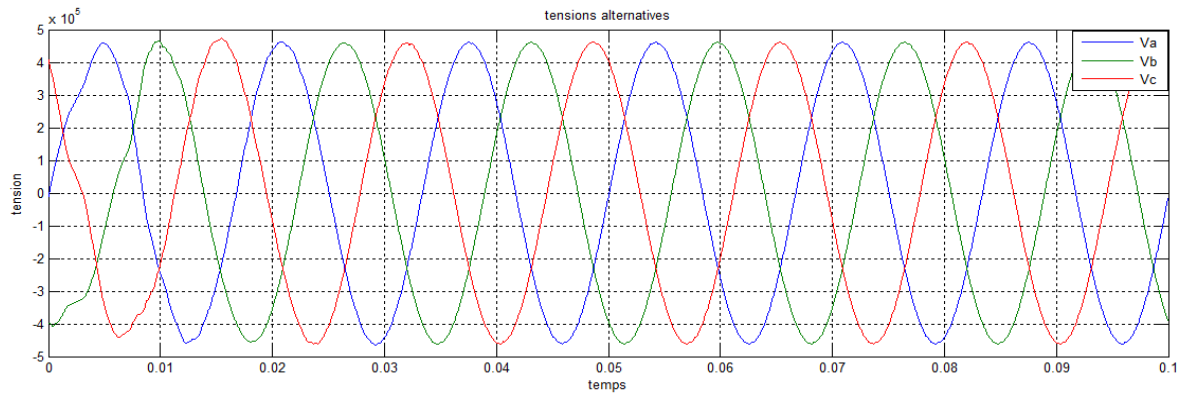


Figure IV.68 : Tensions alternatives des phases a b c.

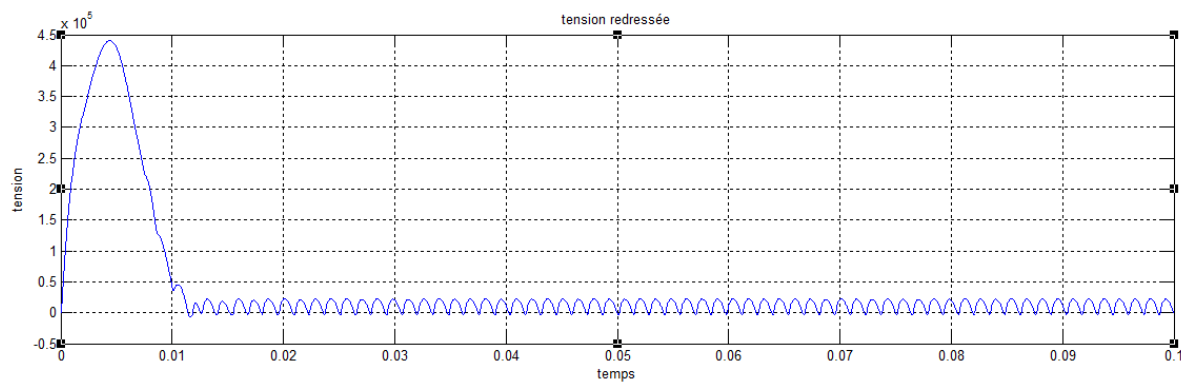


Figure IV.69 : Tension redressée.

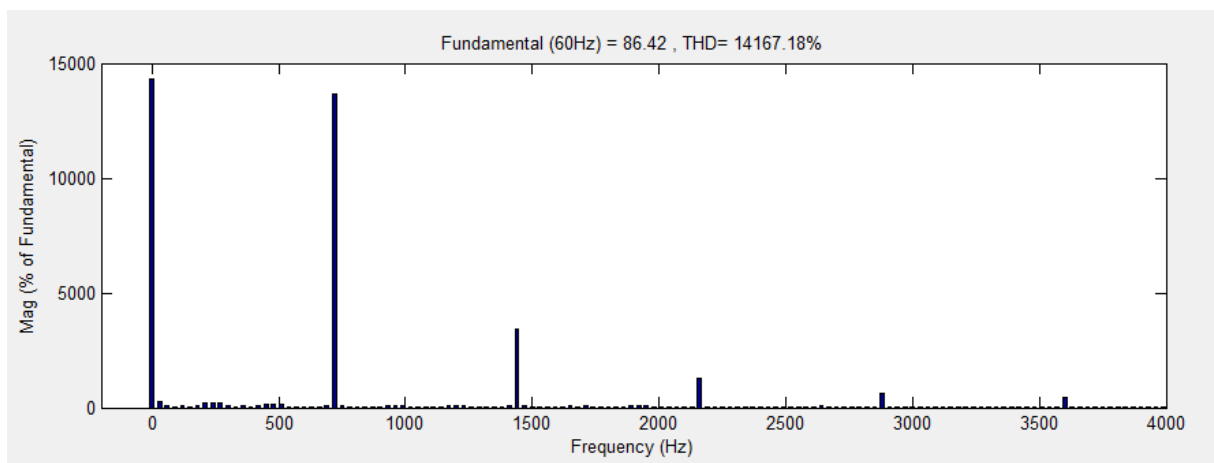
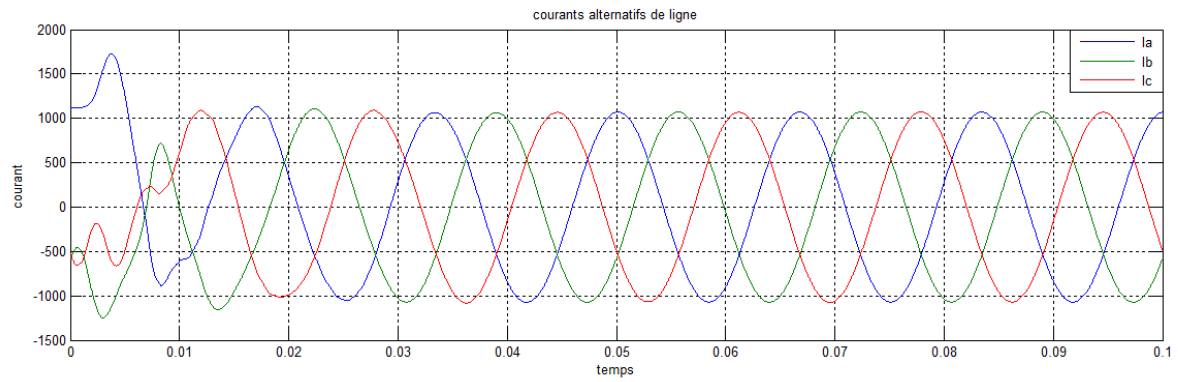
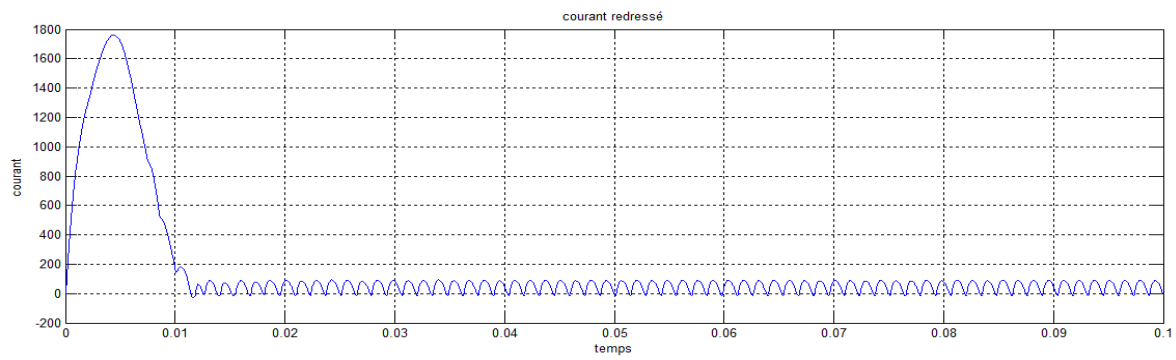


Figure IV.70 : Spectre d'harmonique de la tension redressée.

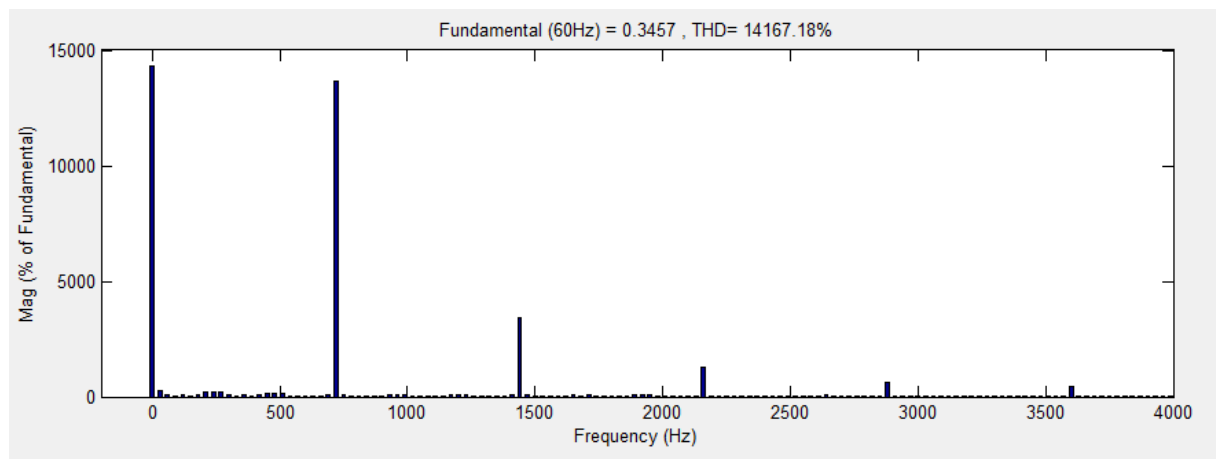
➤ Courants :



**Figure IV.71 : Courant alternatifs des lignes a b c.**



**Figure IV.72 : Courants redressés.**



**Figure IV.73 : Spectre d'harmonique du courant redressé.**

Les courbes des tensions et courants en fonction du temps sont parfaitement lisses, les allures des signaux forment des sinusoïdes alternatives, ce système ne contient plus d'harmonique sa tension est stable grâce aux filtres et compensateur.

D'après ces trois systèmes simulés précédemment on peut conclure que la stabilité du réseau en tension nécessite la présence de ces deux éléments en même temps ; filtres et compensateur.

#### **Comparaison et interprétation :**

Les courbes des tensions des trois systèmes se ressemblent, ont toutes des formes sinusoïdales ; à  $\alpha=20^\circ$ , le signal de la tension est parfaitement lissé cependant ceux qui correspondent à  $\alpha=60^\circ$  et  $80^\circ$  ont une légère déformation.

Les courbes des courants sont des sinusoïdes qui se rassemblent, la seule différence c'est l'amplitude ; à  $\alpha=60^\circ$  et  $80^\circ$ , l'amplitude est très petite par rapport à celle qu'on a dans le premier système où  $\alpha=20^\circ$ .

#### **IV.4. Conclusion :**

Les convertisseurs sont aujourd'hui les principales sources d'harmoniques dans les systèmes de puissance ce qui est néfaste sur le transfert et la transmission de l'énergie. Le filtrage et la compensation devient donc indispensable pour tout fonctionnement normal de ces systèmes.

Dans cette simulation nous avons essayé de mettre en évidence le rôle des filtres et des compensateurs dans la réduction des tensions et des courants harmoniques, ainsi que l'alimentation du système de puissance, en puissance réactive exigée par le convertisseur.

Le modèle du système utilisé peut être exploité pour plusieurs types d'études, comme l'influence de l'angle d'amorçage du convertisseur dans la génération des harmoniques, l'utilisation des filtres actifs, la compensation statique de la puissance réactive...

## CONCLUSION GENERALE

---

Conclusion générale :

Le travail que nous avons réalisé a porté sur l'étude de la compensation de l'énergie réactive dans un réseau lors d'une charge non linéaire. Les principales conclusions auxquelles nous sommes arrivés sont les suivantes :

- La compensation de l'énergie réactive est indispensable pour stabiliser la tension du réseau et contrôler le transit des puissances, en fait le manque de puissance réactive contribue favorablement à une instabilité de tension, notamment lorsque les générateurs arrivent à leurs limites de production d'énergie réactive. De ce fait, une compensation appropriée permet d'améliorer et de contrôler la stabilité de tension.
- Chaque installation électrique requiert ses moyens appropriés pour une bonne compensation, tout en tenant compte de la nature du réseau et le niveau des tensions. Le choix du moyens de compensation doit répondre aux exigences fixées dès le départ c'est-à-dire au cahier des charges et atteindre aussi l'objectif de compensation, de régulation ou du maintien de la tension proche des conditions idéales de fonctionnement.
- Les résultats de la simulation et les représentations graphiques obtenus sous l'environnement MATLAB-SIMULINK ont montrés l'apport du compensateur et filtres optimisés à la compensation de l'énergie réactive dans le réseau électrique, et contrôle de la tension par variation de l'angle d'amorçage.

Nous espérons néanmoins que ce travail sera un support certain à ceux qui voudraient bien compléter la partie pratique des moyens de compensation de l'énergie réactive.

## BIBLIOGRAPHIE :

[Doc I] : Gérard GAY “la compensation de l'énergie réactive”  
Intersection : le magasin Schneider Electronic de l'enseignement technologique et  
professionnel.  
N° :16 novembre 2006

[Doc II] : Jean VERSEILLE “Circulation d'énergie réactive”  
Technique de l'ingénieur  
N° : D4300- Mars 1992.

[Doc III] : Philippe SERRAND et Jean VERSEILLE “ compensation de la puissance  
réactive et tenue en tension dans les réseaux publics”  
Technique de l'ingénieur  
N° : D4305- Juin1986.

[Doc IV] : Charles HANTOUCHE “Condensateur de puissance”  
Technique de l'ingénieur  
N° : D4710.

[ths I] :N.MESSAD “Etude de la compensation de la puissance réactive dans un réseau  
transmission d'énergie électrique”.  
Mémoire soutenu le 24 septembre 2014 à l'UMMTO.

[ths II] : A.CISSOUMA “Etude de la compensation de la puissance réactive des réseaux  
électriques (application d'un SVC)”.  
Thèse d'ingénieur à l'UMMTO. Année 2006.

[ths III] : S.MEZIANI “Etude expérimentale de la pollution harmonique”  
Mémoire soutenu le 20 septembre 2015 a l'UMMTO.

[ths IV] : “Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par un système FACTS”  
Mémoire soutenu le 31 Mai 2016 à l'université Kasdi Merbah de Ouargla.

**Résumé :**

L'accroissement de la demande en énergie électrique et l'échange de marchés d'électricité, ont poussé les organismes distributeurs à prêter une grande attention à la qualité, à la fiabilité de système électrique et au coût de ce dernier, particulièrement dans les réseaux électriques. Afin de réduire les perturbations électriques et les pertes de puissance dues au transit de forts courants réactifs et améliorer le profil de la tension des lignes électriques. Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes électriques sont les systèmes classiques et FACTS «*Flexible Alternating Current Transmission System* ». Cette fonction objective est construite autour des réductions des pertes actives et réactives de puissance et de l'investissement consenti pour l'installation de system FACTS. Pour résoudre ce problème non-linéaire avec contraintes, une technique heuristique de solution basée sur les facteurs de sensibilité des pertes de puissance a été proposée. Notre solution était l'utilisation, l'un des moyens de compensation et les résultats obtenus ont été comparés à ceux des auteurs ayant traité le problème de l'optimisation de la compensation de l'énergie réactive.

**Mots clés :** Energie réactive, facteur de puissance, FACTS, compensateur statique, filtres, harmoniques, simulation, charge non linéaire, THD, spectre d'harmonique.