

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DE

GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire de fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique.

Option : Réseaux Electriques.

Thème



Étude de la distorsion
harmonique dans un réseau
industriel moyenne tension

Proposé et encadré par:

**Mr BESSAI.h*

Réalisé par:

**ZIDELMAL Toufik*

**OTMANI Med Arezki*

Promotion 2010-2011

Remerciement

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur Monsieur H.**BESSAI** pour ces orientations et qui nous a suivi et aidé pour faire ce travail, ainsi que Monsieur **CHALLAL** pour ces conseils.*

Nous remercions également les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Nous sommes aussi reconnaissants à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Un grand merci à toute la promotion 2011 ETH.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ✓ *Mes parents et toute ma famille qui m'ont soutenu et encouragé durant mes études.*
- ✓ *A tous mes amis, amies et tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour achevé ce mémoire.*
- ✓ *Mon coéquipier de travail et sa famille.*

Mohammed.O

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- ✓ *Mes parents et toute ma famille qui m'ont soutenu et encouragé durant mes études.*
- ✓ *A tous mes amis, amies et tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour achevé ce mémoire.*
- ✓ *A tous les membres de l'association « IMAL » ainsi que ces encadreur et ces adhérents.*
- ✓ *Mon coéquipier de travail et sa famille.*

Toufik.Z

Sommaire

Introduction générale

CHAPITRE I : Généralités sur les harmoniques

I-1 Définitions

I-1-1 Définition des harmoniques	1
I-1-2 courants harmoniques	4
I-1-3 Tension harmonique.....	4
I-1-4 Puissances harmoniques.....	5
I-1-4-1 Puissance active et puissance apparente.....	5
I-1-4-2 Facteur de puissance.....	5
I-1-4-3 Facteur de déphasage ($\cos\Phi$)	5
I-1-4-4 Facteur de crête	6
I-1-5 Le rang de l'harmonique.....	6
I-1-6 Les inter-harmoniques.....	6
I-1-7 Les infra-harmoniques.....	7
I-1-8 Taux de distorsion harmonique.....	7
I-1-8-1 Taux individuel	8
I-1-8-2 Taux de distorsion global	8
-Taux de distorsion harmonique en courant.....	8
-Taux de distorsion harmonique en tension.....	8

Le sommaire

I-1-9 Le foisonnement des phases	9
I-1-10 Facteur d'amplification ou facteur de qualité.....	9
I-2 Source des harmoniques.....	10
I-2-1 Les principales sources de courants harmoniques.....	10
I-2-2 Les principales sources de tensions harmoniques	13
I-3 Effets et perturbations harmoniques.....	15
I-3-1 Les effets instantanés.....	15
I-3-2 Les effets différés (effets à long terme).....	16
I-4 Méthodes de calcul des courants et tensions harmoniques.....	18
I-4-1 Les outils de calcul.....	18
I-4-1-1 Calcul littéral	18
I-4-1-2 Calcul numérique	18
I-4-1-3 Logiciels	18
I-4-2 Mesure des harmoniques	18
I-5 Les solutions de filtrage	19
I-5-1 Les filtres passifs.....	19
-Les filtres résonants (ou filtre de type shunt).....	20
-Les filtres amortis	20
I-5-2 Les filtres actifs.....	20
a-Filtrage actif parallèle	21
b-Filtrage actif série	21
c-Filtrage hybride (mixte actif-passif)	21
I-5-3 Comparaison entre filtrage actif et passif	22

CHAPITRE II : Modélisation des éléments du réseau

II -1 Réseau industriel	23
II -2 Propagation des harmoniques sur le réseau	24
II -3 Impédance du réseau	26
II -4 Résonance	26
II -4-1 Résonance parallèle	27
II -4-2 Résonance en série	28
II-5 Modélisation des éléments du réseau en régime harmonique	28
II-5-1 Les sources	28
II-5-2 Modélisation d'un réseau amont	29
II-5-3 Modélisation d'un réseau électrique en régime harmonique	30
II-5-4 Modélisation d'une ligne de transport	31
-Effet de peau	32
-Calcul de R	33
II -5-5 Modélisation des transformateurs	33
II -5-6 Modélisation des machines tournantes	35
II-5-6-1 Modélisation d'une machines asynchrones	35
II-5-6-2 Modélisation d'une machines synchrones	37
II-5-7 Modélisation du pont de Graëtz	38
II-5-8 Compensations	40
II-5-9 Modélisation d'une charge linéaire	41
II-6 Solution de filtrage avec des filtres passifs	41
II-6-1 Principe de fonctionnement	42
II-6-2 Modélisation d'un filtre amortie	42
II-6-3 Modélisation d'un filtre résonant	43

CHAPITRE III : Evaluation de la distorsion harmonique

III-1 Représentation du réseau test	46
III-2. Paramètres du réseau	46
III-2-1 source	46
III-2-2 Générateur	47
III-2-3 Impédance des lignes et câbles	47
III-2-4 Transformateurs	48
III-2-5 Données aux nœuds	48
III-2-6 Compensation	49
III-2-7 Source polluante	49
III-2-8 Les charges	50
III-3 Représentation du réseau test sous MATLAB/SIMULINK	51
III-4 Formes d’ondes et spectres des signaux	52
III-4-1 Les tensions	52
III-4-2 Les courants	59
Conclusion	62

CHAPITRE IV : Dépollution harmonique du réseau

IV-1 Calcul de filtre résonant	63
IV-2 Représentation du réseau test sous MATLAB/SIMULINK avec filtre résonant	65
IV-3 Formes d’ondes et spectres des signaux des tensions avec filtrages	66
IV-4 Comparaison des résultats de TDH avant et après le filtrage	71
Conclusion	72

Le sommaire

Introduction générale :

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus des problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (redresseur, variateur de vitesse...), tertiaire (informatique, éclairages...) et domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers...).

La distorsion harmonique est générée par les charges connectés au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau, cette pollution harmonique a des effets nocifs sur les éléments du réseaux qui peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain des machines tournantes voir la destruction totale de ces équipements.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité d'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- ✓ La réduction de l'impédance de court-circuit.
- ✓ La modification du convertisseur statique polluant en terme de topologie ou de commande à fin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques.
- ✓ Les dispositifs de filtrage.

L'utilisation de dispositif de filtrage tels que les filtres passifs dits résonants ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Nous nous intéressons à tous ces aspects cités ci-dessus dans ce mémoire nous avons reparti notre travail comme suit :

Dans le premier chapitre nous présentons les perturbations en courants et en tension, les origines, les conséquences et les effets de ces perturbations.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de tous les éléments qu'on peut utiliser dans un réseau industriel en régime normale et harmonique.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique du réseau étudié pour évaluer la distorsion harmonique dans le réseau industriel moyenne tension de 13 jeux de barres, et le

dernier chapitre est consacré à la dépollution harmonique du réseau à l'aide de filtres passifs.
Et nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Introduction :

L'un des phénomènes, les plus influents, sur la qualité de l'énergie électrique distribuée aux consommateurs est le phénomène des harmoniques.

En effets, la manifestation de régime harmonique sur les réseaux de distribution d'énergie électrique cause de la perturbation à la clientèle et à l'exploitant. De ce fait, et depuis quelques années, la distorsion harmonique est devenue un aspect important de la spécification de l'achat d'équipements électriques et même de la réalisation de systèmes de distribution d'énergie électrique.

Ce chapitre présente les différentes généralités sur ce phénomène perturbateur.

I-1 définitions :**I-1-1 Définition des harmoniques : [1]**

Un signal périodique de période T déformé contient des harmoniques .On peut le décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux dont le premier est le fondamental et les autres sont des harmoniques. Ces derniers ont des fréquences multiples de celle du fondamental. Chaque composante est caractérisée par son rang et son amplitude.

Ainsi, les harmoniques de tension ou de courant sont des signaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale. Ils sont générés par des charges dites non- linéaires. Certains appareils présentent une impédance non constante durant l'alternance de la sinusoïde de tension à 50Hz. Ils absorbent alors des courants non sinusoïdaux qui se propagent dans le réseau et déforment ainsi l'allure de la tension.

Pour qu'un signal déformé soit accessible à l'étude et à l'analyse, on peut le décomposer en une somme de signaux sinusoïdaux comprenant :

- Un signal sinusoïdal à la fréquence fondamentale : le fondamental.
- Des signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du fondamental : les harmoniques.
- Une composante continue.

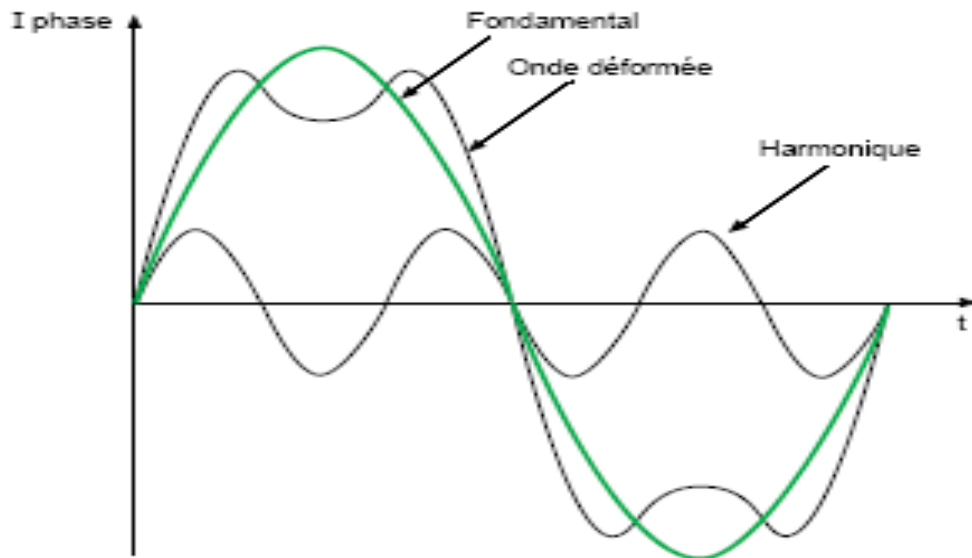


Figure I-1 : signal déformé.

Décomposition en série de Fourier : [2]

La décomposition en série de Fourier est un outil mathématique qui permet de faire la décomposition de tout signal périodique dans le domaine fréquentiel. Soit $S(t)$ un signal périodique de période T , de fréquence $f = 1/T$ et de pulsation $\omega = 2\pi f$.

Valeur moyenne :

$$S_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (\text{I-1})$$

Valeur efficace :

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

La série de Fourier s'écrit comme suit :

$$S(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [A_h \cos(\omega h t) + B_h \sin(\omega h t)] ; \text{ pour } h \geq 1, \text{ avec :} \quad (\text{I-3})$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (\text{composante continue}) \quad (\text{I-4})$$

$$A_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega h t) dt \quad (\text{I-5})$$

$$B_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega h t) dt \quad (\text{I-6})$$

A_h, B_h : Amplitudes des composantes harmoniques de rangs h .

ω : Pulsation du fondamental.

h : Le rang harmonique.

Où

$$S(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(\omega h t + \theta_h), \text{ tel que :} \quad (\text{I-7})$$

$$C_h = (A_h^2 + B_h^2)^{1/2} : \text{Amplitude de l'harmonique de rang } h. \quad (\text{I-8})$$

$$C_{eff} = \frac{C_h}{\sqrt{2}} : \text{Valeur efficace de l'harmonique de rang } h. \quad (\text{I-9})$$

$$\theta_h = \arctg \frac{A_h}{B_h} \text{ la phase de l'harmonique de rang } h. \quad (\text{I-10})$$

On définit les fréquences harmoniques f_h comme les fréquences multiples de la fréquence du fondamentale f .

$$f_h = h.f \quad (\text{I-11})$$

I-1-2 Courant harmonique: [3]

Les courants harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel elles sont raccordées.

La loi d'Ohm exprime une proportionnalité (linéarité) entre courant et tension sinusoïdaux à la fréquence industrielle.

Certains récepteurs dits non linéaires ont pour effet de déformer l'onde sinusoïdale de courant et par conséquent de tension.

Cette déformation s'analyse à l'aide de la décomposition en série de Fourier, qui fait apparaître des courants dits harmoniques qui se superposent à l'onde sinusoïdale initiale (le fondamental) et sa déformation.

I-1-3 Tension harmonique : [3]

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbations ont des effets très néfastes sur les équipements électriques.

Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

C'est la loi d'Ohm qui s'applique aux fréquences harmoniques :

$$V_h = Z_h * I_h \quad (I-12)$$

I-1-4 puissances harmoniques : [4]

Puisque les courants et les tensions existent simultanément sur le réseau, il circule une certaine puissance harmonique. Celle-ci peut transiter par les charges non-linéaires vers le réseau ou vice-versa.

I-1-4-1 Puissance active et puissance apparente en présence d'harmoniques :

$$P_{\text{moy}} = \sum_{h=1}^{\infty} V_{\text{heff}} I_{\text{heff}} \cos \Phi_h \quad (\text{I-13})$$

Φ_h : l'angle de déphasage entre la tension et le courant harmonique aux bornes de la charge.

$$P_{\text{moy}} = P_{1\text{moy}} + P_{2\text{moy}} + P_{3\text{moy}} + \dots + P_{n\text{moy}} \quad (\text{I-14})$$

On remarque que chaque harmonique contribue en plus ou en moins à la puissance moyenne.

$$S = V_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I-15})$$

I-1-4-2 Facteur de puissance : [5]

Le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active **P** et la puissance apparente **S**.

$$F = \frac{P}{S} \quad (\text{I-16})$$

I-1-4-3 Facteur de déphasage ($\cos \Phi$) : [6]

Le facteur de déphasage est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de la composante fondamentale.

$$\cos(\theta) = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{I-17})$$

I-1-4-4 Facteur de crête : [6]

C'est le rapport entre la valeur de crête de l'onde divisée par sa valeur efficace.

$$F_c = \frac{S_c}{S_{eff}} \quad (I-18)$$

S_c : valeur de crête

S_{eff} : valeur efficace

Pour une onde sinusoïdale, le facteur de crête a une valeur de $\sqrt{2} = 1,414$, une onde ayant un facteur crête inférieur à $\sqrt{2}$ sera plutôt aplatie. Par contre, si le facteur est supérieur à $\sqrt{2}$ l'onde est plutôt pointue.

I-1-5 Le rang de l'harmonique: [5]

C'est le rapport de sa fréquence f_h à celle du fondamentale.

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (I-19)$$

Le fondamental f_1 a le rang 1.

I-1-6 Les inter-harmoniques : [7]

Ce sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental. Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que les fours à arc, les machines à souder et les convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cycloconvertisseurs).

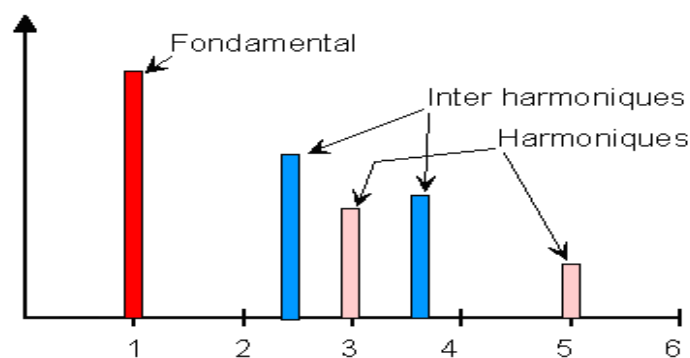


Figure I-2 : Représentation spectrale d'harmoniques et d'inter-harmoniques

I-1-7 Infra-harmoniques :

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10Hz, 20Hz.

La présence d'inter-harmoniques ou d'infra-harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à T (T période du fondamental), ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier.

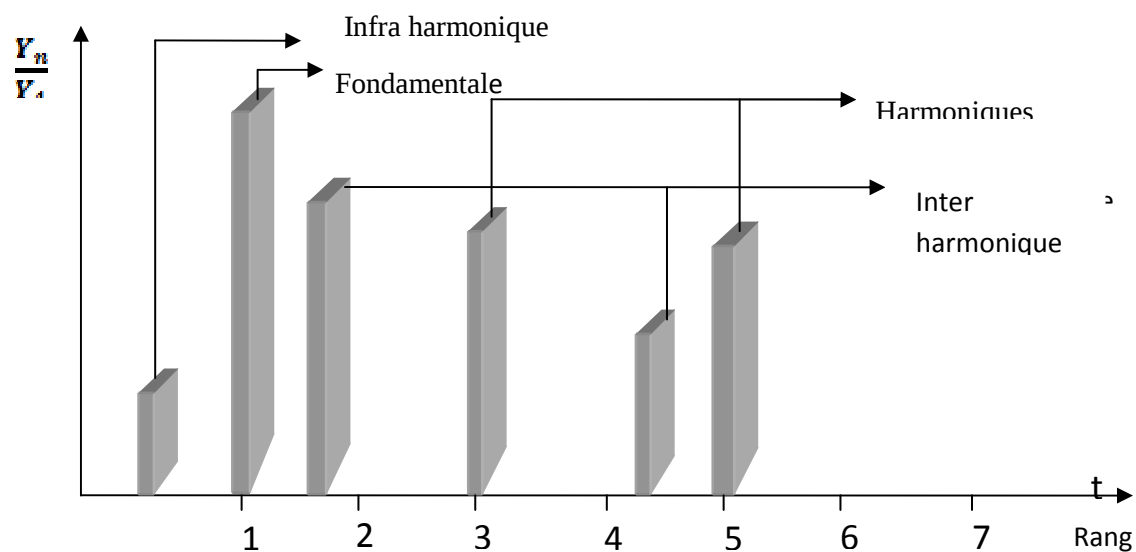


Figure I-3 : Représentation spectrale d'un signal pollué.

I-1-8 Taux de distorsion harmonique (TDH) : [2]

Plusieurs expressions peuvent être utilisés pour quantifier la déformation d'un signal. Le taux de distorsion harmonique (TDH) est le plus employé. Il permet d'évaluer l'écart entre la forme de l'onde réelle et la forme de l'onde sinusoïdale pour un courant ou une tension.

I-1-8-1 Taux individuel :

C'est le rapport entre la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang h à celle du fondamental.

$$TDH_i(\%) = 100 \left(\frac{C_h}{C_1} \right) \quad (I-20)$$

I-1-8-2 Taux de distorsion global TDH_G % :

C'est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental, qui est exprimé par la loi suivante :

$$TDH_G(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n C_h^2}}{C_1} \quad (I-21)$$

Plus le signal est déformé, plus le taux de distorsion harmonique est important, ce qui signifie que le niveau de richesse du signal en harmoniques est conséquent.

-Taux de distorsion harmonique en courant TDH_i :

$$TDH_i(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (I-22)$$

- Taux de distorsion harmonique en tension TDH_v :

$$TDH_v(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (I-23)$$

I-1-9 Le foisonnement : [8]

L'effet de foisonnement est une diminution du niveau des perturbations à cause de la multiplication des sources de perturbations harmoniques.

Différentes charges peuvent être connectées sur un réseau, il en résulte que les courants qui les alimentent ne sont pas obligatoirement en phase.

En effet, s'ils ne s'additionnent pas algébriquement, les harmoniques foisonnent. Cela est possible lorsque les harmoniques de même rang produits par différentes charges sont déphasés les uns par rapport aux autres.

On distingue deux types de foisonnement :

➤ **Foisonnement temporel :**

Toute analyse harmonique doit alors tenir compte de la simultanéité de fonctionnement c'est ce qui définit le foisonnement dans le temps.

➤ **Foisonnement angulaire :**

Le courant total qui contribue à alimenter les divers appareils connectés sur un même réseau est fonction de l'amplitude, à chaque instant, des courants qui en dérivent.

Par conséquent, plus les courants sont nombreux et déphasés les uns par rapport aux autres et plus la résultante pourra devenir négligeable.

I-1-10 Facteur d'amplification ou facteur de qualité : [2]

Le facteur d'amplification est utilisé pour évaluer l'effet d'une injection harmonique locale sur un réseau, il permet de calculer la tension harmonique et le courant harmonique dans les condensateurs et les transformateurs à la résonance.

Pour un récepteur (R, L) relié à un réseau de puissance de court circuit S_{ccA} et compensé par une batterie de condensateur de puissance Q_c provoquant une résonance.

$$F \approx \frac{\sqrt{Q_c \times S_{ccA}}}{P} \approx \frac{R}{L\omega} \quad (\text{I-24})$$

I-2 Sources harmoniques : [9] [10]

Les appareils électroniques sont les principaux responsables de la pollution harmonique, mais les autres charges du réseau peuvent également y contribuer, ces équipements connaissent une diffusion croissante ces dernières années, ils constituent une source de pollution importante.

Les charges déformantes, ou encore appelées récepteurs non linéaires, appellent sur le réseau électrique des courants déformés, qui lorsqu'ils sont importants en amplitude et aussi en fonction de l'impédance du réseau, vont modifier l'allure de la tension sinusoïdale.

I-2-1 Les principales sources de courants harmoniques :

Les courants harmoniques ne proviennent en général pas de l'alimentation mais du réseau client, ils sont en général dus à la présence d'une charge électrique non linéaire dans un réseau électrique.

➤ L'éclairage :

L'éclairage public par lampes à décharge ou tubes fluorescents est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100% pour certaines lampes fluo compactes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmonique 3 des trois phases, risque un échauffement important.

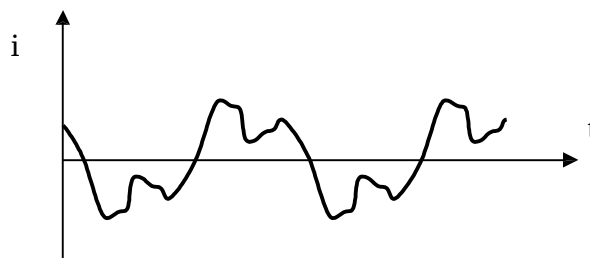


Figure I-3 : Courant absorbé par l'éclairage fluorescent.

➤ **Les bobines saturées :**

Les bobines saturées ont une impédance qui varie en fonction de l'amplitude de courant qui les traverse. De ce fait, elles provoquent une déformation notable de ce courant.

➤ **Les appareils à arc électrique :**

Ce sont les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre une dizaine de MW, et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu. Le spectre d'émission harmonique de ces appareils est continu et contient des inter-harmoniques d'amplitudes non négligeables. Le contenu harmonique est relativement modéré. On ne peut le négliger du fait que la puissance consommée est forte.

➤ **Les convertisseurs statiques:**

La présence de convertisseurs statiques (pont de Graëtz) engendre un courant en créneaux.

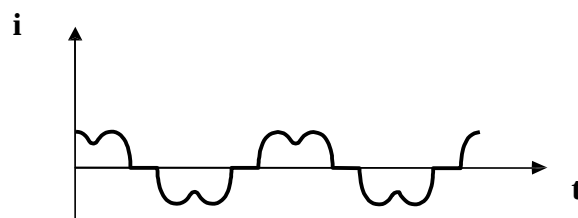


Figure I-4 : courant absorbé par redresseur

➤ **Les variateurs de vitesse :**

Les variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu et asynchrones constituent des sources ponctuelles d'harmoniques, on pourrait prendre en considération leurs problèmes lors de l'achat ou de l'installation de l'équipement.

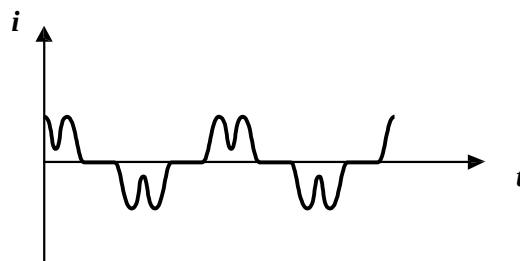


Figure I-5 : Variateur de vitesse à fréquence variable.

➤ Les liaisons de transport d'énergie :

Les liaisons de transport d'énergie en haute tension continue sont aussi des sources de courants harmoniques ponctuelles et pour ce là, les filtres font partie de l'installation. Les liaisons de haute tensions à courant continu (HTCC) se composent de : matériel statique, matériel magnétique, lignes de transport et filtres.

➤ Les alimentations à découpage :

Les alimentations à découpage constituent un type de charge non linéaires, ces charges ne laissent passer le courant que d'une manière impulsionnelle celui-ci est alors riche en harmoniques on les retrouve dans les micros ordinateurs et des matériels électroménagers.



Figure I-6 : Alimentation à découpage dans un micro-ordinateur

➤ Charge électrodomestiques :

Ce terme englobe tous les appareils domestiques de faible puissance tels que les récepteurs de télévision, les magnétoscopes, etc... Ces charges sont présentés en grand nombre sur le réseau et bien que de puissance unitaire réduite, elles sont responsables d'une part de la pollution harmonique.

I-2-2 Les principales sources de tensions harmoniques :

Les récepteurs tels que les moteurs asynchrones et les transformateurs participent à la distorsion de l'onde sinusoïdale de la tension mais ne sont pas les principaux responsables.

➤ Les alternateurs :

Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires. Le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5 % à vide et inférieur à 1 % en charge.

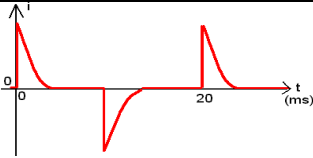
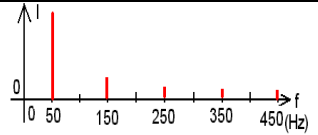
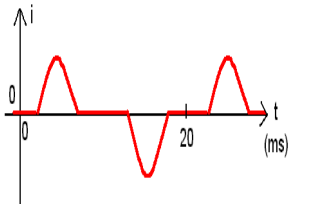
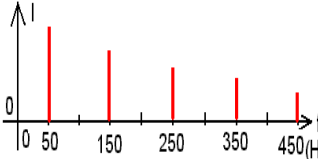
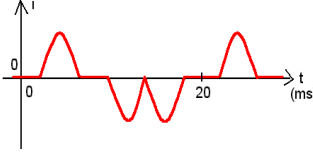
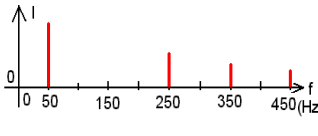
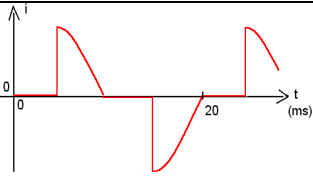
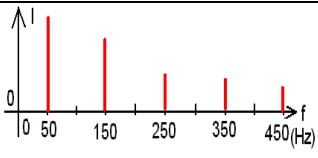
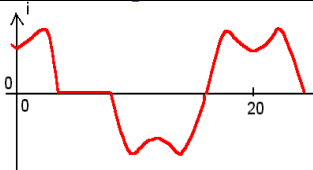
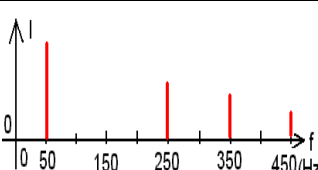
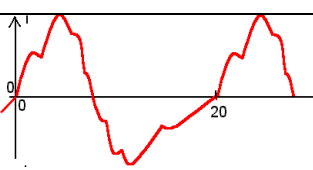
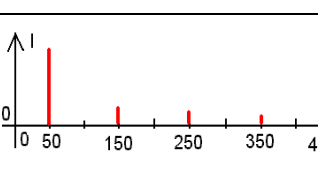
➤ Les machines tournantes :

Elles génèrent des harmoniques de rang élevé et d'amplitude très faible. Les petites machines synchrones sont génératrices de tensions harmoniques de rangs impairs.

➤ Les transformateurs :

Les transformateurs peuvent être générateurs de tension harmonique lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension de ces appareils reste toujours inférieur à 1 %.

Allures typiques des courants harmoniques émis par les principaux équipements perturbateurs : [2]

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Eclairage	Tubes fluorescents Lampes à vapeur HP		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage, alimentation à découpage	Micro-informatique Télévisions Lampes à ballast électronique		
Redresseur triphasé à thyristors avec filtrage	Variation de vitesse des moteurs asynchrones		
Gradateur monophasé	Régulation de puissance des fours à résistances Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristors	Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machines-outils Appareils électroménagers Ascenseurs		

I-3 Effets des perturbations harmoniques : [11]

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, dont on distingue deux types d'effets des harmoniques :

I-3-1 Les effets instantanés :

Ils se traduisent par des conséquences immédiates sur le fonctionnement des matériels.

La présence d'harmoniques crée des troubles de fonctionnement :

➤ **Altération des caractéristiques du signal de sortie des appareils :**

Ceci concerne les appareils produisant une image électronique, comme les écrans des téléviseurs et d'ordinateurs.

Ce phénomène apparaît pour de forts niveaux de tension harmonique ou des rangs élevés.

➤ **Mauvais fonctionnement des systèmes électriques :**

Ceci concerne les systèmes qui utilisent la tension comme référence, ainsi que certains variateurs.

Cet effet se produit en présence des tensions harmoniques, qui perturbent les dispositifs de régulation, ce qui influence les conditions de commutations des thyristors

➤ **Vibration et bruit :**

Les courants harmoniques génèrent des vibrations et des bruits acoustiques dans les appareils électromagnétiques tels que les transformateurs et les inductances et aussi les machines tournantes.

Cet effet est dû soit aux efforts électromagnétiques proportionnels aux courants instantanés en présence dans les transformateurs et les inductances ou bien par des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques dans les machines tournantes.

➤ Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais :

Les dispositifs de protection et les relais utilisant les courants de charge peuvent être affectés par la présence d'harmoniques, dans la mesure où ceux-ci modifient la valeur instantanée de ces courants.

➤ Perturbations induites sur les lignes à courant faible :

Une ligne à courant faible, par exemple une ligne téléphonique, peut être perturbée lorsqu'elle chemine le long d'une canalisation de distribution électrique ou circulent des courants et tensions déformés.

➤ Provocation de phénomènes de résonance :

Ce phénomène se caractérise par une valeur maximale de l'impédance du réseau vue par la charge. Et pour peu que cette dernière se comporte comme une source de courants harmoniques, on observera donc des surtensions, pouvant dépasser 7 à 8 fois la valeur de la tension considérée dans le cas d'un réseau pur (sans compensation). L'association des éléments capacitifs et inductifs sur le réseau, entraîne l'apparition de phénomène de résonance, traduisant l'expression suivante :

$$LC\omega^2 = 1 \quad (I-25)$$

I-3-2 Les effets différés (ou effets à long terme) :

Ils sont essentiellement de nature thermique. Hormis la fatigue mécanique et le vieillissement des matériaux soumis aux vibrations, l'effet à long terme prédominant est l'échauffement.

➤ Echauffement des condensateurs :

Les condensateurs sont sensibles aux surtensions dues aux harmoniques qui favorisent les pertes. Ces dernières, causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes :
Conduction et hystérésis dans le diélectrique.

➤ **Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :**

Les pertes joule :

Sont uniquement liée au coutant harmonique qui circule dans les éléments du réseau. La valeur des pertes varie selon l'impédance harmonique rencontrée.

Les pertes fer :

Sont liées à la présence de tensions harmoniques ou de courant harmoniques. Elles comprennent les pertes par hystérésis et les pertes par courant Foucault. Elles prennent leur importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...).

➤ **Echauffement des câbles et des équipements :**

L'effet de peau et l'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable, sont responsables de cet échauffement.

➤ **Le vieillissement des isolants :**

Le vieillissement des isolants est souvent du à une contrainte en tension consécutive à la présence des harmoniques, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs. Les plus spectaculaires de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateur, disjoncteur...).

Ces effets dégradent le rendement des équipements et diminue leurs durée de vie.

I-4 Méthodes de calcul des courants et tensions harmoniques : [2]

I-4-1 Les outils de calcul :

Le calcul manuel des différentes grandeurs harmoniques au sein d'un circuit est pratiquement limité à l'étude de réseaux comportant moins d'une demi-douzaine d'éléments (lignes, transformateurs, charges, etc...). Si le réseau étudié est plus complexe, le recours à un logiciel de simulation devient préférable.

L'analyse et le diagnostic d'une installation électrique passent avant tout par la mesure. Et les résultats numériques identifiés des creux de tension, variation de fréquence ou surtension ainsi que ceux des harmoniques sont les indicateurs nécessaires pour analyser une installation électrique en temps.

I-4-1-1 Calcul littéral :

Dans le cas où la structure du réseau perturbé reste relativement simple, le calcul littéral des différentes grandeurs harmoniques est possible. On peut déterminer analytiquement les tensions et les impédances harmoniques en différents points du réseau, ainsi que les courants harmoniques traversant les divers éléments.

I-4-1-2 Calcul numérique :

Pour déterminer respectivement une tension, une impédance, un courant harmonique en un sommet ou à travers un ouvrage du réseau, il faut connaître, d'une part les impédances de chaque ouvrage et d'autre part les tensions et courants harmoniques imposés par les sources perturbatrices.

I-4-1-3 Logiciels :

Si le réseau étudié est plus complexe, le recours à un logiciel de simulation devient préférable. Deux catégories de logiciels sont utilisées par les entreprises de transport ou de distribution d'électricité : les logiciels de simulation de réseaux et ceux dédiés au matériel.

I-4-2 Mesure des harmoniques : [2]

Déférentes techniques et méthodes de mesures peuvent être utilisées pour évaluer la pollution harmonique sur un réseau industriel ou une installation électrique. Il est tous d'abord nécessaire de restituer dans quel cadre et dans quel objectif vont s'effectuer les mesures : simple évaluation globale de l'état d'un réseau de distribution en vue de statuer sur la qualité

de celui-ci, remontée des données de mesures appropriées, essais en laboratoire des caractéristiques de matériels.

Ainsi il est impératif de choisir le niveau de sophistication de l'équipement en fonction de type de mesure à réaliser. Une simple mesure du facteur de crête du signal, courant ou tension, permet de savoir si l'on a affaire à un signal déformé ou non. En effet, lorsque l'on s'éloigne de la valeur fatidique de (1,414) pour le facteur de crête on est en présence d'un signal déformé. D'autre part. La visualisation de la déformation de l'onde de signal, tension ou courant, peut être observée à l'aide d'un oscilloscope et d'une pince de mesure appropriée.

Dans la pratique en électrotechnique on distingue deux niveaux de tâches relatif aux problèmes de la pollution harmonique :

➤ **Une analyse de premier niveau :**

Repérer, identifier, qualifier le niveau de pollution harmonique sur l'installation électrique et comparer avec la norme ou les recommandations en vigueur.

➤ **Une analyse de deuxième niveau :**

Quantifier le niveau de pollution harmonique par rang harmonique afin de définir le type de filtrage à mettre en œuvre ou de fournir ses indications.

I-5 Les solutions de filtrage : [9]

Avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour combattre les harmoniques, il faut s'intéresser au mode de raccordement du récepteur pollueur vis-à-vis de l'installation concernée et aussi vis-à-vis d'autre charges présentes sur le même réseau.

I-5-1 Les filtres passifs :

Le filtre passif associe un condensateur et une inductance placés en série, dans le but d'obtenir la fréquence de résonance sur un harmonique donné. Le filtre passif donc défini au cas par cas afin d'être accordé sur un harmonique précis à filtrer, alors le courant harmonique s'oriente vers le filtre et non vers le reste de réseau. Pour des tensions harmoniques on distingue deux types de filtres.

➤ **les filtres résonants (ou filtre de type shunt) :**

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

La constitution d'un filtre résonant est semblable à celle d'une inductance anti harmonique.

➤ **les filtres amortis :**

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées.

Il est moins sensible aux variables de ses éléments (capacité, inductance et résistance) qu'un filtre résonant. La résistance d'amortissement influe légèrement sur la valeur de la fréquence d'accord.

I-5-2 Les filtres actifs

En plus des éléments inductifs et capacitifs propres aux filtres passifs, les filtres actifs comprennent des convertisseurs de puissance. Ce sont des sources de courants ou de tensions qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants, des tensions ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes.

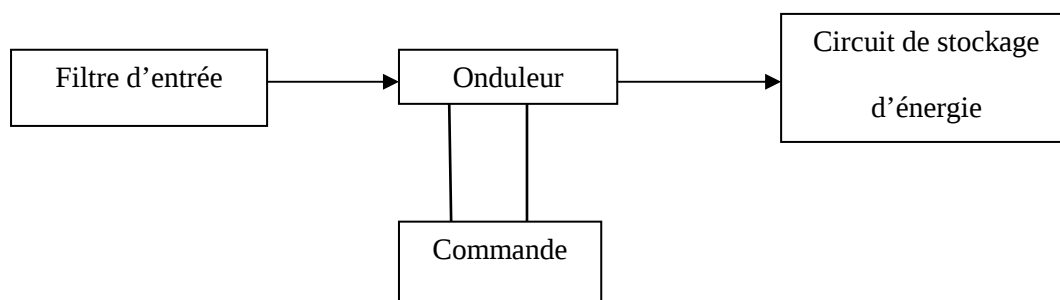


Figure I-7 : structure générale d'un filtre actif

Le filtre actif peut être placé soit en parallèle ou en série avec la charge :

a) Filtrage actif parallèle :

Il existe deux types de fonctionnement pour un filtre parallèle

- compensation des courants harmoniques.
- compensation des tensions harmoniques.

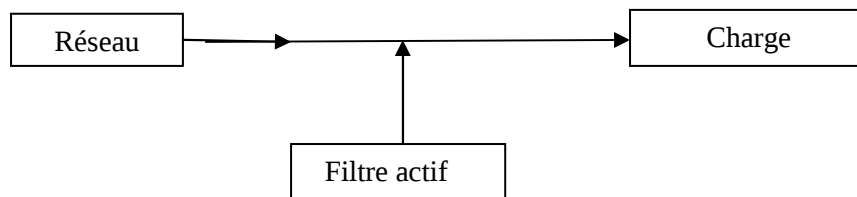


Figure I- 8 : schéma de principe d'un filtre actif parallèle

b) Filtrage actif série :

Le filtre actif est parcouru par la totalité du courant de charge, mais il ne supporte en fonctionnement normal que la tension harmonique qui est généralement d'amplitude faible.

En cas de court-circuit coté charge, il doit par contre supporter toute la tension du réseau et le courant de court-circuit. Un moyen de protection efficace lui est donc associé.



Figure I-9 : schéma de principe d'un filtre série

c) Filtrage hybride (mixte actif-passif) :

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques ; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau.

I-5-3 Comparaison entre filtrage actif et passif : [13]

Critère	Filtre actif	Filtre passif
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction de filtres accordés à des fréquences voisines.
Rangs harmoniques compensés	Tous les rangs harmoniques dans sa bande passante	En général, un filtre passif par rang harmonique à compenser.
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse son dimensionnement.
Vieillessement	Pas d'influence	Risque de dégradation des performances (dérive de la fréquence d'accord)
Raccordement	Etude préalable simplifiée	Etude au cas par cas parfois complexe.
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle-commande	Pas de surveillance particulière
Cout	Cout du filtre plus élevé faible cout d'étude de dimensionnement	Cout du filtre plus faible Etude de dimensionnement parfois complexe obligatoire

Introduction :

Lors de la conception d'une installation électrique, on doit tenir compte de toutes les perturbations auxquelles elle peut être exposée en présence de charges polluantes. Plusieurs solutions sont mises en œuvre pour éliminer ou réduire l'effet de ces perturbations. Il est donc nécessaire d'utiliser des modèles précis pour tous les éléments du réseau, avant de les intégrer dans un programme de calcul. Nous ferons dans ce chapitre, une représentation des différents modèles utilisés pour les éléments du réseau (sources, ligne, transformateur, etc...) des charges linéaires et des charges non linéaires (pont Graëtz).

II-1 Réseau industriel : [13]

L'architecture d'un réseau de distribution électrique industriel est plus au moins complexe suivant les niveaux de tension, la puissance demandée et la sûreté d'alimentation requise.

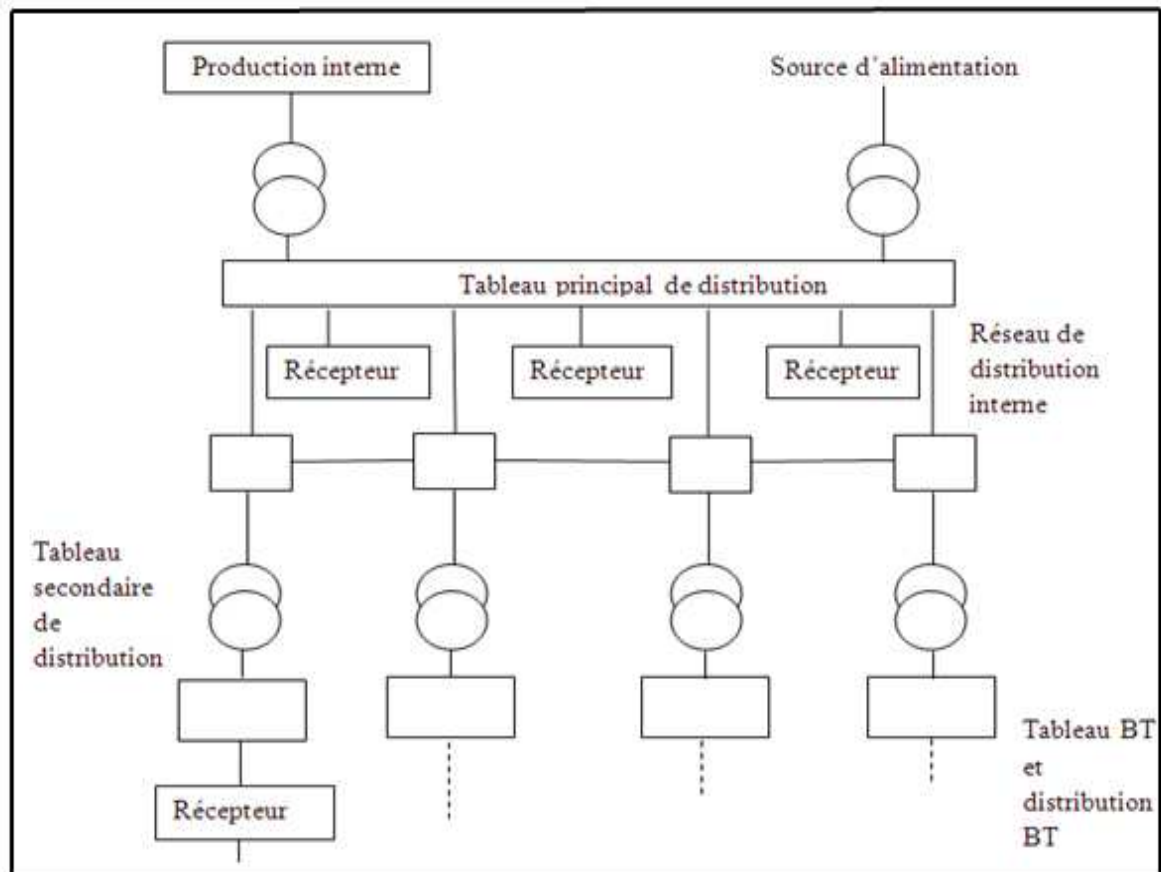


Figure II.1 : Structure générale d'un réseau de distribution

II-2 Propagation des harmoniques sur le réseau : [2] [14]

En règle générale, sur un réseau de distribution comprenant un certain nombre de départ issue d'un même poste source, on peut considérer que les tensions harmoniques se propagent plus facilement dans le sens des niveaux de tension décroissants (de HT vers la BT), que dans le sens inverse. Les courants harmoniques quant à eux circulent mieux en direction des niveaux de tension supérieurs, comme explique la figure suivante.

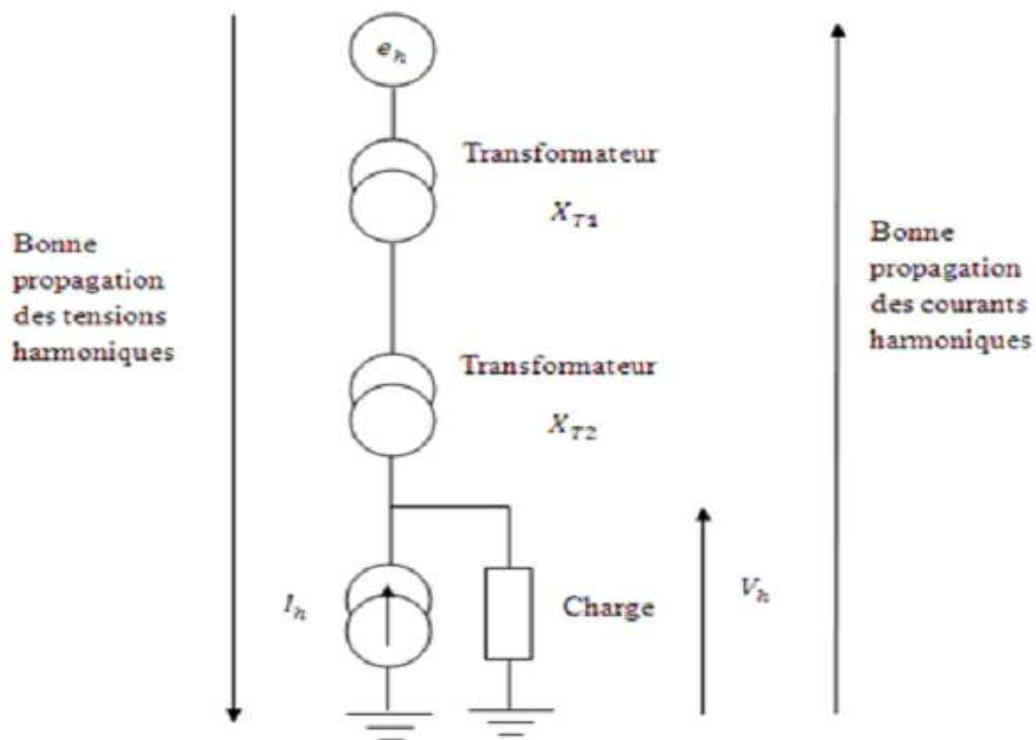


Figure II.2 Propagation des harmoniques

Les charges raccordées aux réseaux apportent une atténuation supplémentaire qui croît en fonction de leurs niveaux, on constate que l'influence des lignes est négligeable jusqu'au rang 7, si la longueur reste inférieure à 30 Km environ comme le montre la figure suivante :

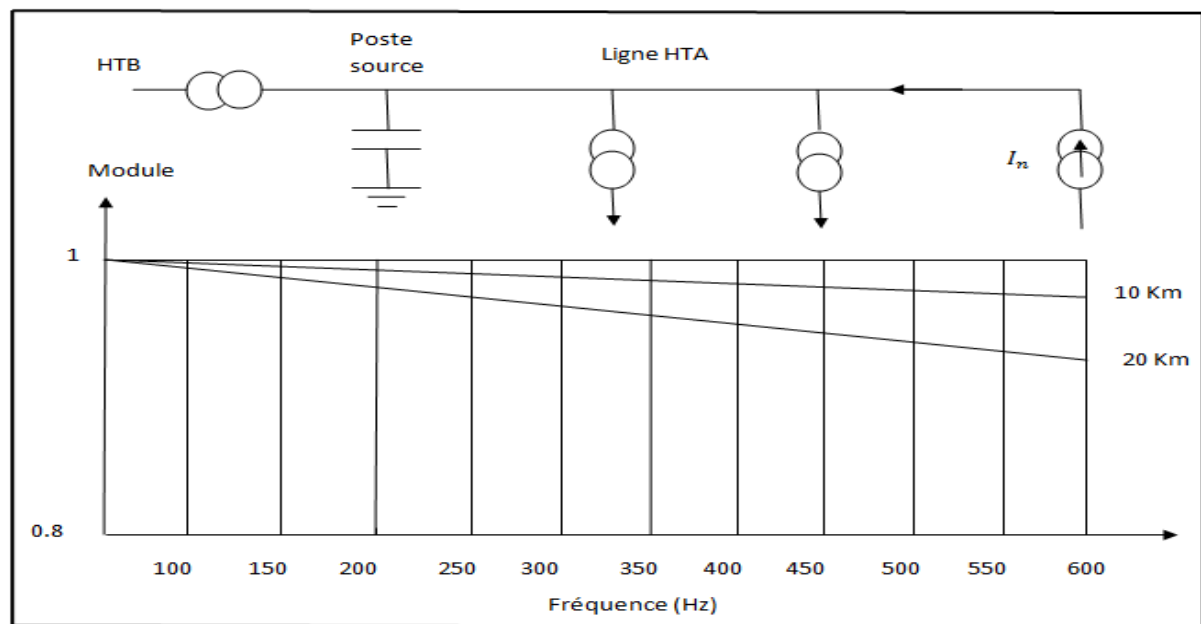


Figure II.3 : Atténuation du courant sur un réseau en fonction de la fréquence [14]

Les conditions de propagation dépendent de :

➤ **La puissance de court-circuit :**

La propagation de la tension harmonique a un impact sur la valeur de la puissance de court-circuit. L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Aussi l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande.

➤ **La puissance de la charge installée :**

La perturbation harmonique est importante dans un niveau de charge élevé.

➤ **Condensateur de compensation :**

Si des injections de courants harmoniques ont des fréquences correspondantes à celle de la résonance, on observe des tensions harmoniques importantes.

En dehors des résonnances, les batteries de condensateurs ont un effet bénéfique sur le réseau, car elles absorbent les courants harmoniques.

➤ **La distance de poste source :**

En s'éloignant du poste source, le facteur d'amplification décroît, et la perturbation augmente.

II-3. Impédance des réseaux : [7]

Les tensions et les courants harmoniques injectés sur les réseaux, se propagent par l'intermédiaire des lignes et des transformateurs.

L'impédance des éléments du réseau conditionne largement la propagation des perturbations harmoniques.

L'impédance harmonique équivalente du réseau, vue de ses différents points est une fonction de la fréquence. Pour la calculer, on utilise un schéma équivalent du réseau.

La position et le sens de l'observateur doivent être précisés pour calculer l'impédance harmonique équivalente du réseau.

❖ **Influence des impédances du réseau sur les valeurs du courant harmonique :**

Les courants harmoniques des charges non linéaires sont modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau.

Dans la réalité cette modélisation est très approximative. Les courants harmoniques sont influencés par l'impédance du réseau amont. Lorsque celle-ci croît, en générale le courant harmonique décroît.

Les harmoniques de courants de valeurs les plus élevés (I_5 , I_7) décroissent fortement lorsque l'impédance de la source croît. Ainsi, la tension harmonique n'est pas proportionnelle à l'impédance de source.

$$V_h = Z_s \times I_h \quad (\text{II-1})$$

II-4 Resonance: [14]

L'association d'éléments capacitifs et inductifs sur les réseaux électriques entraîne l'apparition de phénomène de résonance. Ceux-ci se manifestent par des valeurs très élevées ou très faibles de l'impédance par rapport au réseau sans résonance traduisant l'expression :

$$LC\omega^2 = 1 \quad (\text{II-2})$$

Les surintensités et les surtensions causées par la résonance peuvent occasionner de graves dommages sur les installations (destruction de condensateurs par exemple).

On distingue deux types de résonances, selon que les éléments capacitifs et inductifs sont associés en série ou en parallèle.

II-4-1. Résonance parallèle

La branche constituée par l'inductance L en parallèle avec le condensateur C forme un Système résonant parallèle.

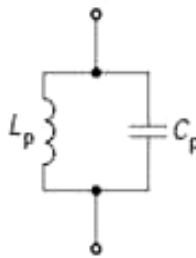


Figure II-4 : Résonance parallèle.

L'expression simplifiée de l'impédance globale :

$$Z = \frac{L\omega_r}{1 - L\omega_r^2 C} \quad (\text{II-3})$$

Il y a résonance lorsque le dénominateur $1 - LC\omega_r^2$ est égal à zéro, cette impédance est alors infinie. La fréquence de résonance est donnée par l'expression suivante

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II-4})$$

II-4-2 Résonance série :

La branche constituée par une inductance **L** en série avec un condensateur **C**, forme un Système résonant série.

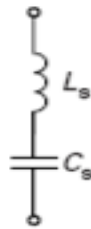


Figure II-5 : Résonance série.

A partir des éléments **L** et **C** en série, l'impédance globale s'exprime par la relation suivante :

$$Z = \frac{1 - LC\omega_r^2}{C\omega} \quad (\text{II-5})$$

II-5 Modélisation des éléments du réseau en régime harmonique :**II-5-1 Les sources :**

C'est la transformation de l'ensemble des énergies convertibles en énergie électrique. Les unités de production sont diversifiées et classées en fonction de la nature des énergies converties, de leur capacité de production et de leur dynamique (temps de réaction).

La diversité des sources permet de les classer selon :

- Les unités qui produisent beaucoup de puissance, mais dont les changements de régime sont lents à mettre en œuvre (centrale nucléaire par exemple).
- Des unités facilement manœuvrable, mais dont les puissances assez faible (éoliennes, barrage...etc

II-5-2 Modélisation d'un réseau amont : [15]

Lorsqu'on étudie le réseau d'un utilisateur donné, le réseau amont auquel il est relié est caractérisé par sa puissance de court-circuit au point de raccordement. En régime harmonique, celui-ci est modélisé par une inductance L en série avec une résistance R dont les valeurs sont déterminées de la façon suivante :

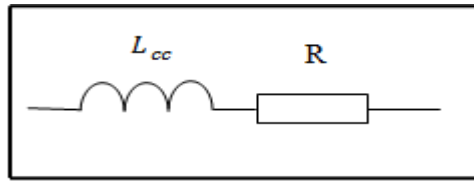


Figure II-5 : modèle d'un réseau amont.

➤ En régime normal :

$$L_{cc} = \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\text{II-6})$$

➤ En régime harmonique :

$$R(h) = \sqrt{h} \times R \quad (\text{II-7})$$

$$L_{cc} = h \times \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\text{II-8})$$

Avec ω_0 : pulsation correspondante à la fréquence fondamentale en (Hz)

P_{cc} : puissance de court circuit du réseau en (MVA)

U_n : Tension nominale en (kV)

✓ Modèle d'un réseau amont et aval :

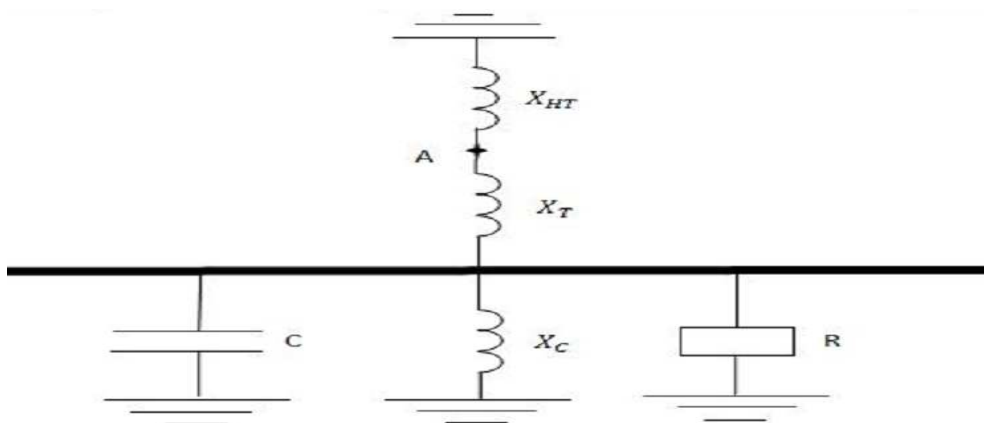


Figure II-6 : Modèle d'un réseau amont et aval.

Dans ce schéma, avant le point **A**, on a un réseau amont, après le point **A** on a un réseau aval.

a) Réseau aval : L'impédance équivalente ne tient compte que des éléments en aval du réseau.

b) Réseau amont : L'impédance équivalente ne tient compte que des éléments en amont du réseau.

II-5-3 Modélisation d'un réseau électrique en régime harmonique : [2]

En général, on rencontre des problèmes de résonance sur des réseaux industriels comportant des condensateurs de compensation de l'énergie réactive. Ces réseaux peuvent être simplifiés en représentant, en aval du transformateur principal, une charge perturbatrice (modélisé par une injection harmonique) en parallèle avec une charge non perturbatrice (modélisée par une charge inductive) et un condensateur.

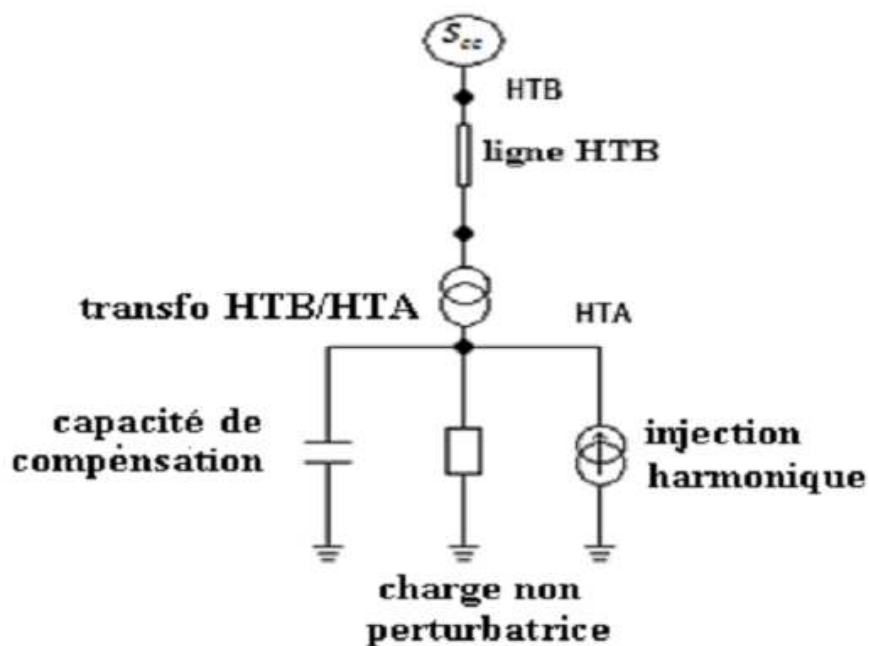


Figure II-7 modèle d'un réseau électrique.

Les caractéristiques des différents éléments de ce réseau sont les suivants :

S_{cc} : Puissance de court-circuit du réseau amont HTB

R_{lig} , X_{lig} : Résistance et réactance linéiques pour la ligne HTB

L : longueur de la ligne HTB

S_n : Puissance nominale du transformateur HTA/HTB

U_{cc} : Tension de court-circuit

P_{ch} : Puissance active de la charge non perturbatrice

Q_{ch} : Puissance de compensation de la batterie de condensateur

Ce réseau peut être modélisé conformément à la figure II-8. On néglige les pertes joule dans les enroulements du transformateur HTB/HTA de sorte que celui-ci est modélisé seulement à partir de son inductance de fuite. La charge est représentée par une réactance X_{ch} et une résistance R_{ch} en parallèle telle que $\tan \beta = \frac{R_{ch}}{X_{ch}}$.

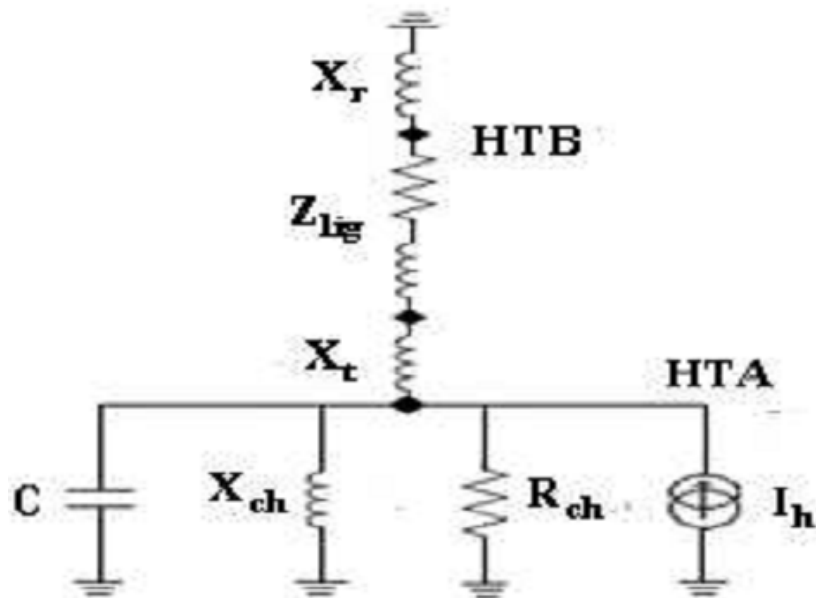


Figure II-8 modélisation d'un réseau.

II-5-4 Modélisation d'une ligne de transport : [16]

Le moyen de transport de l'énergie électrique, de la source vers le client est fait à travers des lignes aériennes. Ces dernières sont utilisées dans les réseaux de transport d'électricité. Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques. Et ses lignes modélisées par un quadripôle symétrique donné par le schéma équivalent en « π » pour la composante appropriée de chaque rang harmonique.

Deux paramètres importants sont considérés pour la modélisation harmonique de la ligne : Effet de peau et la longueur de la ligne.

- **Effet de peau :**

Ce phénomène d'origine électromagnétique existe dans tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la décroissance de la densité de courant et une augmentation de la résistance du conducteur, cela signifie que le courant ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur.

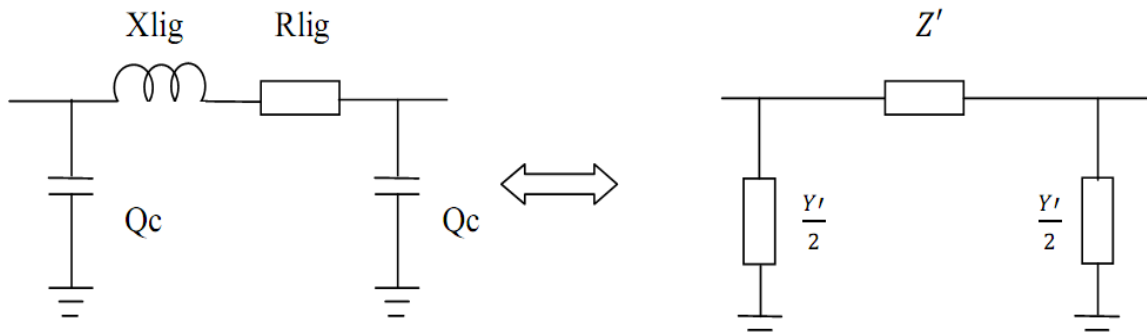


Figure II-9 : modèle d'un câble ou d'une ligne aérienne.

La figure II-9 illustre le schéma en (π) de la ligne où R , L et Q_c sont respectivement la résistance ($m\Omega/km$), l'inductance en (mH/km) et la perte latérale capacitive en ($kVar/km$) transversale.

L'impédance équivalente de la ligne est donnée par la relation suivante :

➤ **En régime nominal :**

$$Z = R + jL\omega_0 \quad (II-9)$$

$$Y = jC\omega_0 \quad (II-10)$$

➤ **En régime harmonique :**

$$Z(h) = R + jh\omega_0 L \quad (II-11)$$

$$Y(h) = jhC\omega_0 \quad (II-12)$$

- **Calcul de R : [2]**

On sait que la résistance R dépend de la résistivité du type de matériau utilisé et de la section S du conducteur.

Résistivité des lignes et des câbles :

Type de matériau	Alu-acier	Aluminium	Cuivre	Almélec
R en (m Ω /Km) et S en (mm ²)	$R= 34000/S$	$R=29000/S$	$R=18000/S$	$R=32000/S$

II-5-5 Modélisation d'un transformateur : [2]

Un transformateur est modélisé en régime harmonique, par une inductance L_p en parallèle avec une résistance R_p et une résistance R_s en série.

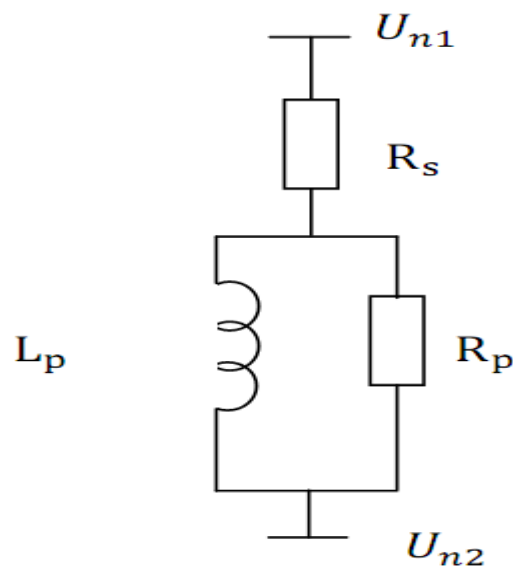


Figure II- 10 Modèle d'un transformateur

➤ **En régime normale :**

$$R_s = \frac{1}{100} \times \frac{U_{n1}^2}{S_n} \quad (\text{II-13})$$

$$R_p = 20 \times \frac{U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\text{II-14})$$

$$L_p = \frac{U_{cc}}{100} \times \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\text{II-15})$$

➤ **En régime harmonique :**

$$L_p = \frac{U_{cc}}{100} \times \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{cc}} \times h \quad (\text{II-16})$$

Avec S_n : Puissance nominale du transformateur en (MVA)

U_{cc} : Tension de court-circuit en (%)

U_{n2} : Tension nominale au secondaire du transformateur en (kV)

ω_0 : Pulsation correspondante à la fréquence fondamentale en (Hz)

L'utilisation d'un couplage zigzag au secondaire du transformateur, figure (II-11) permet d'éviter le transfert de la composante homopolaire au primaire. Elle est bien adaptée au cas de charge non linéaire du type redresseur de courant et de grandeurs, dont le contenu harmonique homopolaire est statistiquement très élevé. [17]

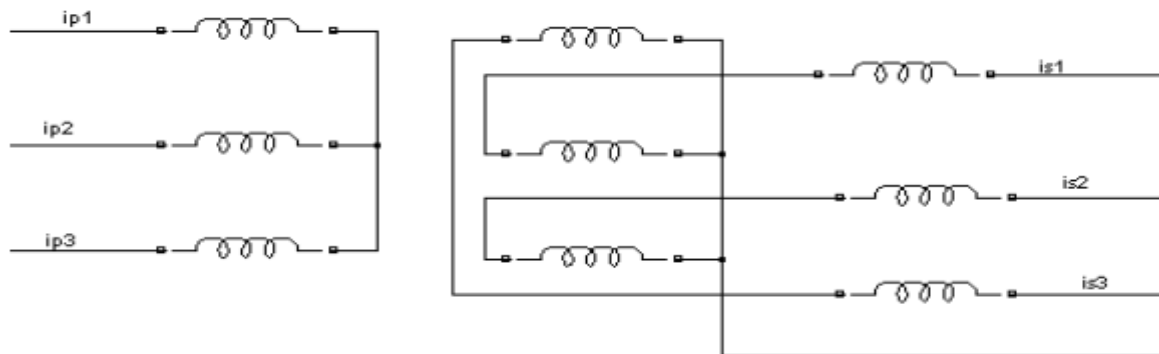


Figure II- 11 modèle d'un transformateur YZ

II-5-6 Modélisation d'une machine tournante : [18]

Les machines asynchrones sont modélisées de la même manière en régime harmonique, par l'association en série d'une résistance R et d'une inductance X . précisons encore que ces modélisations ne sont valables qu'en régime harmonique et non à la fréquence fondamentale du réseau. Elles fonctionnent en alternateur ou en moteur sans modifier l'impédance harmonique de cet élément.

II-5-6-1 Machines asynchrones :

Les machines asynchrones se composent de deux pièces principales :

- Le stator : est relié au réseau ou au variateur de vitesse.
- Le rotor : est constitué de conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statorique.

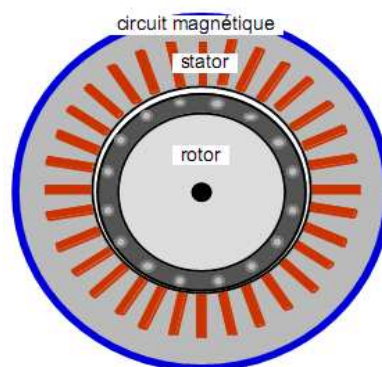


Figure II-12 : Moteur asynchrone à cage

Son schéma équivalent est représenté sur la figure suivante :

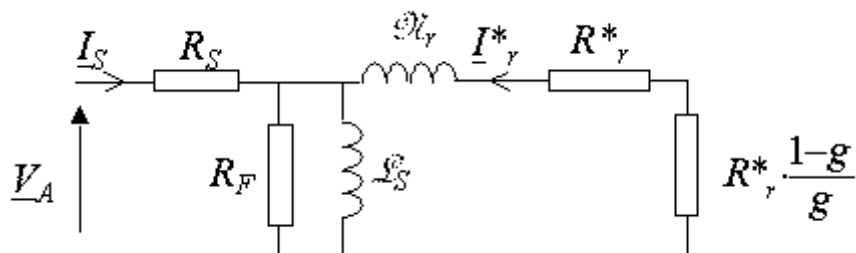


Figure II-13 modèle d'une machine asynchrone

En régime harmonique on considère la branche magnétique L_s et R_f ouverte car la réactance correspondante augmente proportionnellement avec la fréquence.

Il reste le circuit statorique et rotorique ce sont des résistances et les inductances en série, dont les valeurs combinées sont déterminées par la puissance active et réactive consommées par le moteur.

Le modèle équivalent en régime harmonique :

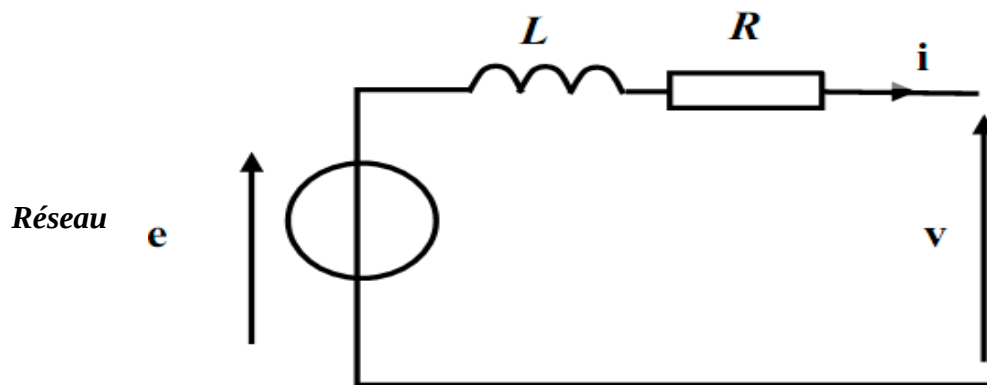


Figure II-14 : modèle de la machine asynchrone en régime harmonique.

Calcul de R et X pour une machine asynchrone :

En régime harmonique :

Le champ dû à la circulation des courants harmoniques dans le stator est un champ tournant à la fréquence de $h = 50 \text{ HZ}$

$$R = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \times \frac{\cos(\theta_d)}{I_d} \times h \quad (\text{II-17})$$

$$X \approx Z = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_d} \times h \quad (\text{II-18})$$

$$R = 0,4 \times \frac{C_d \times S_n}{C_n \times I_d^2} \times \sqrt{h} \quad (\text{II-19})$$

En régime permanent :

Le champ tournant induit par la rotation du rotor, apparaît tourner très lentement. C'est pourquoi les grandeurs des impédances utilisées en régime harmonique sont proches des grandeurs qui l'on peut mesurer lorsque le rotor est bloqué au démarrage.

$$R = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \times \frac{\cos(\theta_d)}{I_d} \quad (\text{II-20})$$

$$X \approx Z = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_d} \quad (\text{II-21})$$

S_n : puissance nominale en (MVA).

I_d : courant du démarrage.

$\cos(\theta_d)$: Cosinus de l'angle θ_d au démarrage.

C_d : couple au démarrage.

II-5-6-2 Machines synchrones : [16]

Les machines synchrones donnent des harmoniques de denture de rang élevés et d'amplitudes souvent négligeables. Les petites machines synchrones sont toutefois, génératrice de tension harmonique de rang 3.

En général, le générateur est isolé du réseau est lié par un transformateur à couplage YD et donc, l'impédance harmonique n'est pas importante dans ce cas.

Son schéma équivalent est représenté sur la figure suivante :

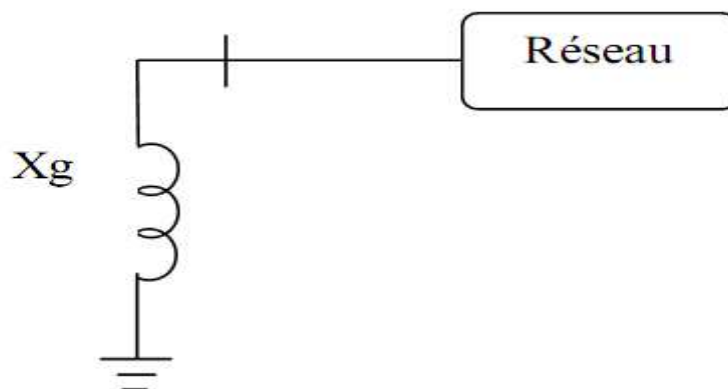


Figure II-15 : modèle de la machine synchrone en régime harmonique.

II-5-7 Modélisation du pont de Graëtz : [18]

Le redresseur (figure II-16) est supposé être associé à une inductance de filtrage du courant continu de très grande valeur de façon à ce que le courant I_d soit parfaitement lissé.

Les courants en ligne I_1 , I_2 et I_3 . Prennent à tour de rôle la valeur (et la forme) du courant I_d continu, chaque thyristor assure la conduction du courant pendant 1/3 de période.

L'amplitude des courants harmoniques de rang h :

$$I_h = I_1/h \quad (\text{II-22})$$

Avec $h=6K \pm 1$, $K=1, 2, 3\dots$ (Entiers naturels) et I_1 étant la valeur efficace du fondamental.

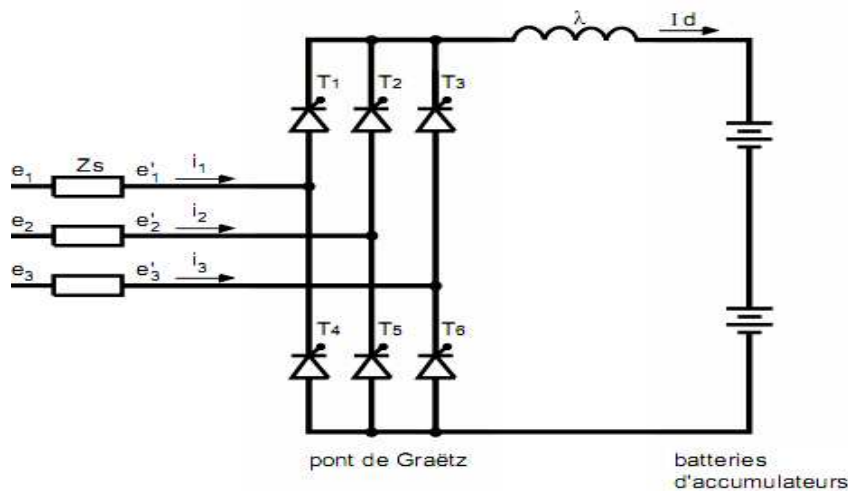


Figure II-16 : Montage en pont de Graëtz

Le courant $I_{d1}(t)$ est décomposé en série de fourrier selon la formule suivante :

$$I_{d1}(t) = 2I_{d\max} \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \dots \right) \quad (\text{II-23})$$

Les harmoniques du rang 5, 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes, les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés, les harmoniques restants sont de rang $6k \pm 1$, avec K entier naturel.

Le courant de chaque phase est donné par la figure suivante :

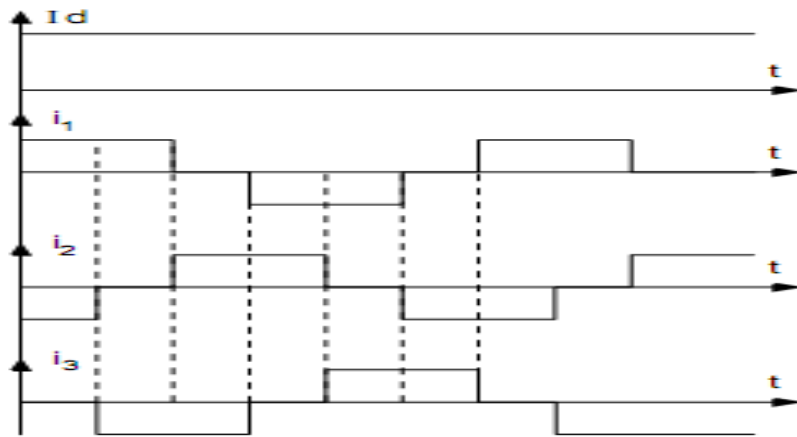


Figure II-17 : courant théorique en amont du redresseur avec une impédance Z_s

La tension V est telle que :

$$V = e_1 + L \frac{dI_1}{dt} = e_2 + L \frac{dI_2}{dt} \quad (\text{II-24})$$

$$2V = e_1 + e_2 + L \left(\frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} \right) \quad (\text{II-25})$$

$$L \left(\frac{dI_1}{dt} + \frac{dI_2}{dt} \right) = L \frac{d(I_1 + I_2)}{dt} = L \frac{dI_d}{dt} = 0 \quad (\text{II-26})$$

Par conséquent :

$$2V = e_1 + e_2 \quad (\text{II-27})$$

$$V = \frac{e_1 + e_2}{2} \quad (\text{II-28})$$

Le même phénomène se manifeste entre T_2 et T_3 , puis entre T_3 , et T_1 aussi dans la polarité négative du redresseur entre les thyristors T_4 , T_5 et T_6 .

II-5-8 Compensation : [16]

Les condensateurs sont caractérisés par leur capacité C déduite de la valeur de la puissance réactive qu'ils fournissent à 50 HZ. Cette capacité est insérée entre leur point de raccordement au réseau et le point origine des tensions.

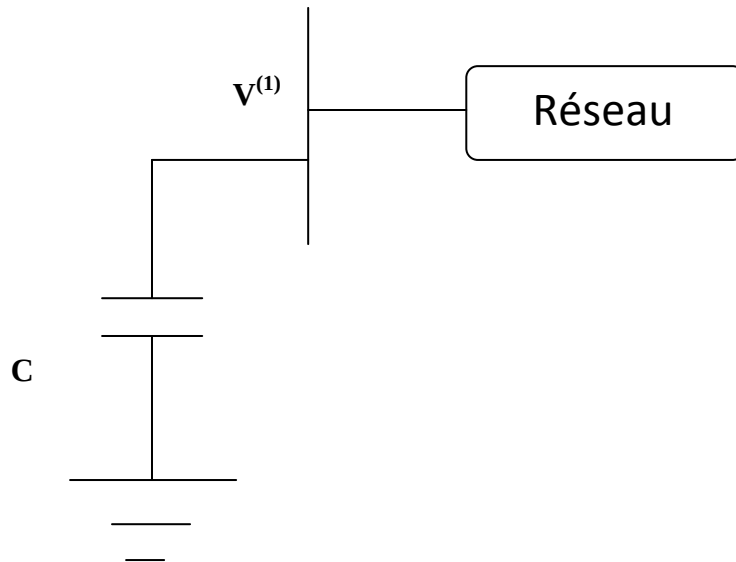


Figure II- 18 : Modèle de la compensation.

OÙ :

$$C = \frac{Q}{U^2 \omega_0} \quad (\text{II-29})$$

C : la capacité de condensateur.

Q : la puissance réactive.

ω_0 : pulsation.

II-5-9 Modélisation d'une charge linéaire : [15]

Le moteur : est modélisé par une résistance R_m en série avec une réactance X_m

✓ En régime normal :

$$R_m = \frac{U_n^2}{\left(1 + \frac{Q^2}{P^2}\right)P} \quad (\Omega) \quad (\text{II-30})$$

$$L_m = \frac{U_n^2}{\omega \left(1 + \frac{P^2}{Q^2}\right)Q} \quad (\text{H}) \quad (\text{II-31})$$

✓ En régime harmonique :

$$R_m = \frac{U_n^2}{\left(1 + \frac{Q^2}{P^2}\right)P} h \quad (\Omega) \quad (\text{II-32})$$

$$L_m = \frac{U_n^2}{\omega \left(1 + \frac{P^2}{Q^2}\right)Q} h \quad (\text{H}) \quad (\text{II-33})$$

II-6 Solution de filtrage avec des filtres passifs : [2]

Des solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles vis-à-vis de la pollution harmonique. Une solution consiste à l'installation d'une inductance antiharmonique en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée (filtre de barrage).

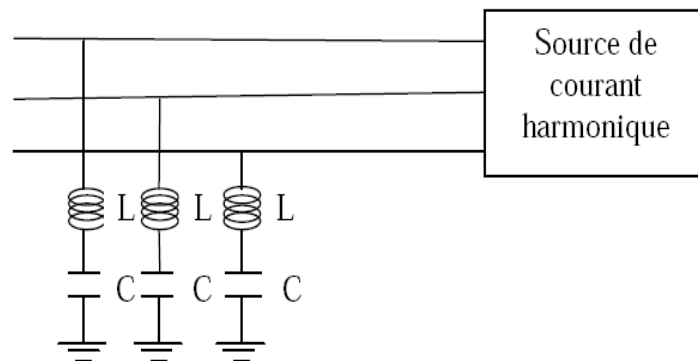


Figure II-19 : Raccordement d'une inductance antiharmonique.

II-6-1 Principe de fonctionnement :

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie.

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

II-6-2 Modélisation d'un filtre amorti :

Un filtre amorti se compose d'une capacité C en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance (L') et d'une résistance appelé résistance d'amortissement (r). Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas très élevées.

Le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre amorti en aval d'un transformateur HTB/HTA est représenté par la figure suivante :

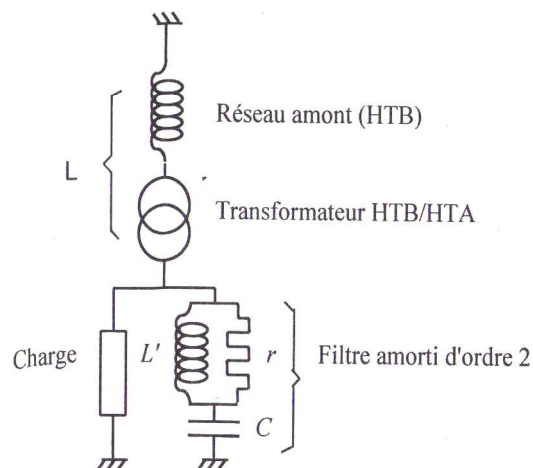


Figure II-19 : modèle utilisé pour le calcul d'un filtre amorti

La fréquence de résonance d'un filtre amorti est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}} \quad (\text{II-34})$$

Le facteur de qualité d'un filtre est donné par :

$$F = \frac{1}{2\pi L' f_r} \quad (\text{II-35})$$

La fréquence antirésonance est donnée par :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L')C}} \quad (\text{II-36})$$

$$Z = \frac{1}{jC\omega} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} \right)^{-1} \quad (\text{II-37})$$

II-5-9-3 Modélisation d'un filtre résonant :

La constitution d'un filtre résonant est semblable à celle d'un ensemble inductance antiharmonique et un condensateur de compensation. Le filtre de résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé.

Pour un filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtre où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer, comme la montre le schéma suivant :

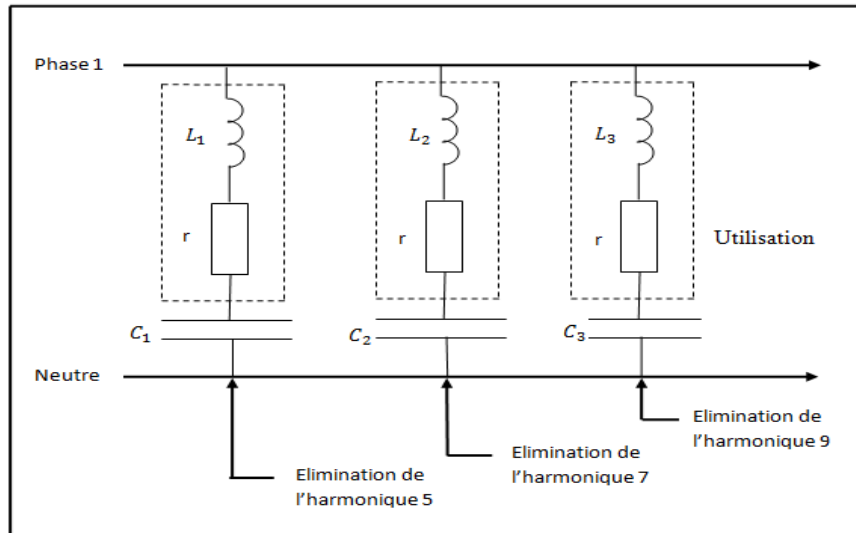


Figure II-20 : Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs harmoniques

Le facteur de qualité de la résonance, est donnée par la relation suivante :

$$F = 2\pi f_r \frac{L}{r} \quad (\text{II-38})$$

f_r : la fréquence de résonance.

L : inductance de filtre.

r : résistance d'amortissement.

$$Z = \frac{R}{1 + jC\omega} \quad (\text{II-39})$$

Introduction :

Actuellement, il est devenu primordial de faire des études préliminaires sur les systèmes électrotechniques tels que les machines électriques, transformateurs et particulièrement les réseaux électriques avant les concevoir. La simulation est le moyen utilisé dans l'industrie pour faire ces études préalables, il permet de rapprocher les modèles théoriques du fonctionnement réel du réseau électrique en prévoyant également son comportement quelconque. La modélisation et la simulation nous offrent l'avantage d'analyser et de prédire des observations inespérées lors d'expérimentations. Cependant il dépend des performances et de la précision de la modélisation utilisée. Récemment, plusieurs logiciels permettent la simulation et l'analyse des réseaux de transport d'énergie électrique et des réseaux industriels, exemple PSAF, E.M.T.P, CYME et MATLAB/SIMULINK,....

Pour simuler notre réseau, nous avons choisi le logiciel MATLAB/SIMULINK qui a l'avantage de représenter le réseau par blocks (source, transformateur, ligne, charge, compensateur) disponible dans la bibliothèque POWERLIB. Qui possède aussi l'avantage de disposer de plusieurs algorithmes de calcul pour le cas des systèmes non linéaires, et une analyse détaillée des résultats à l'aide des fonctions incorporées (FFT, TDH, impédance harmonique vue d'un jeu de barre ...etc)

Pour calculer la distorsion harmonique causée par la présence d'une charge polluante on a choisi un réseau test qui contient 13 nœuds [19], le réseau est alimenté a partir d'un poste 69kV, les branches capacitatives des lignes et des câbles sont négligées, le schéma est représenté sur la figure ci-dessous :

III-1 Représentation du réseau test : [19]

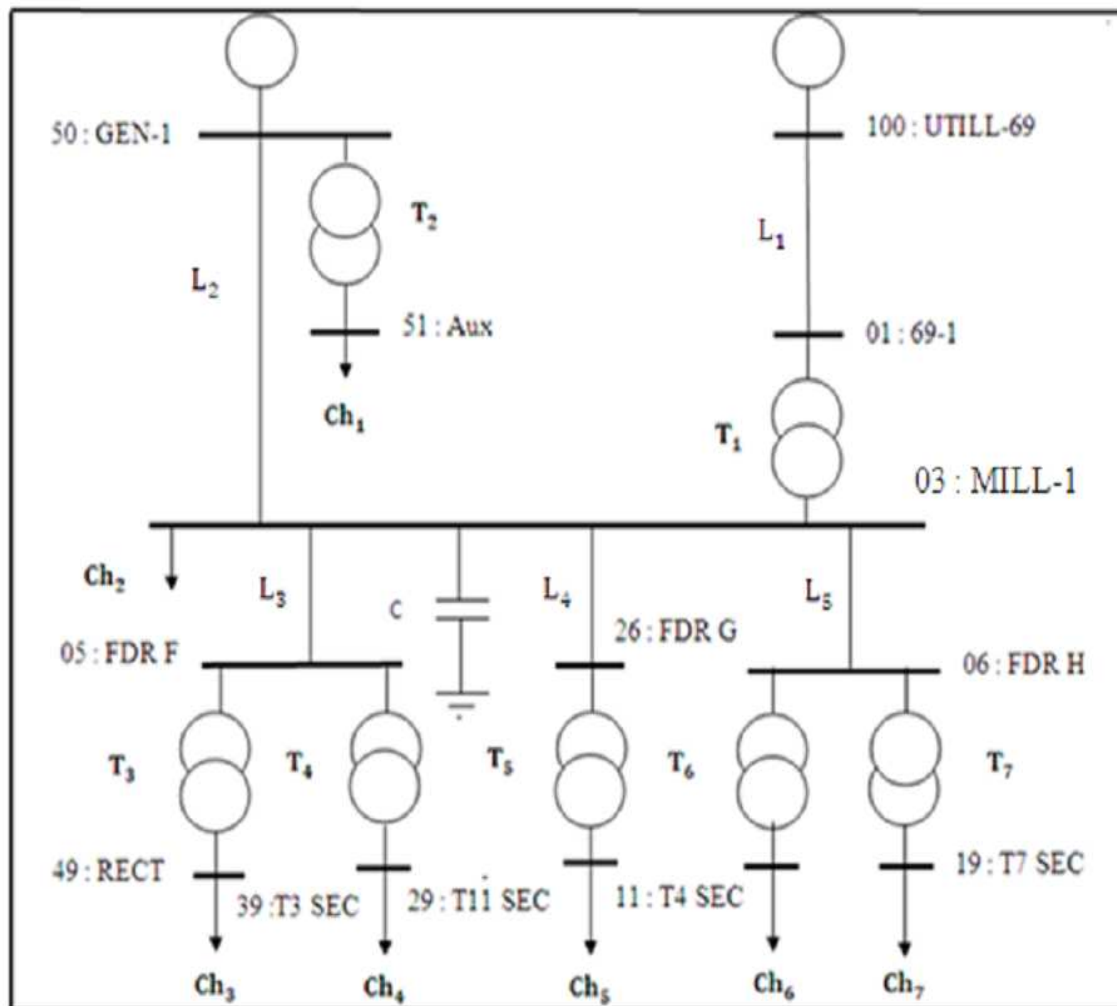


Figure III-1 : Réseau étudié

III-2. Paramètres du réseau :

III-2-1 source $U = 69 \text{ kV}$ $S_{cc} = 1000 \text{ MVA}$

$$\frac{X}{R} = 22,2$$

Les valeurs X et R de la source sont les suivantes :

$$X = \frac{U^2}{S_{cc}} = 4,761 \quad (\Omega)$$

$$R = \frac{X}{22,2} = \frac{4,761}{22,2} = 0,214 \quad (\Omega)$$

III-2.2 Générateur : $U = 13.98 \quad \angle -1.52 \text{ kV}$

$$Z_g = (0.0366 + j1.365) \Omega$$

III-2-3 Impédance des lignes et câbles :[19]

Les valeurs des lignes et câbles en pu (Valeurs de basse : $S_b = 10000 \text{ kVA}$, $U_b = 13.8 \text{ kV}$) sont les suivantes :

<i>Lignes</i>	<i>L₁</i>	<i>L₂</i>	<i>L₃</i>	<i>L₄</i>	<i>L₅</i>
<i>R (pu)</i>	0,00139	0,00122	0,00075	0,00157	0,00109
<i>X (pu)</i>	0,00296	0,00243	0,00063	0,00131	0,00091

Tableau III-1 : Tableau des paramètres des lignes et câbles en unités réduites

Les données des lignes et câbles en valeurs réelles sont représentés par le tableau III-2 :

Lignes	L₁	L₂	L₃	L₄	L₅
R(Ω)	0,02647	0,02323	0,014283	0,02989	0,02075
X(Ω)	0,05637	0,04627	0,01199	0,02494	0,01733
L(H)	0,00014	0,00122	0,00003	0,00006	0,00004

Tableau III-2 : Tableau des paramètres des lignes et câbles en valeurs réelles.

III-2-4 Transformateurs : [19]

Transformateurs	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇
U ₁ (kV)	69	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8	13,8
U ₂ (kV)	13,8	0,48	0,48	4,16	0,48	0,48	2,40
Tap	69	13,45	13,45	13,11	13,45	13,8	13,11
S (kVA)	15000	1500	1250	1725	1500	1500	3750
R (pu) (10 ⁻³)	4,698	9,593	7,398	7,442	8,743	8,363	4,568
X (pu) (10 ⁻²)	7,9862	5,6694	4,4388	4,9537	5,6831	5,4360	5,4810

Tableau III-3 : Données des transformateurs

Les transformateurs sont munis de prises pour le réglage de la tension (Tap).

III-2-5 Données aux nœuds : [19]

Jeux de barres	V _{moy} (pu)	Θ (degré)	P _{gén} (kW)	Q _{gén} (kVar)	P _{ch} (kW)	Q _{ch} (kVar)
100 : UTIL-69	1,000	0,00	7450	540	----	----
01 : 69-1	0,999	-0,13	----	----	----	----
03 : Mill-1	0,994	-2,40	----	----	2240	2000
50 : GEN-1	0,995	-2,39	2000	1910	----	----
51 : Aux	0,995	-3,53	----	----	600	530
05 : FDR F	0,994	-2,40	----	----	----	----
49 : RECT	0,980	-4,72	----	----	1150	290
39 : T3SEC	0,996	-4,85	----	----	1310	1130
26 : FDR G	0,994	-2,40	----	----	----	----
06 : FDR H	0,994	-2,40	----	----	----	----
11 : T4 SEC	0,979	-3,08	----	----	370	330
19 : T7 SEC	1,001	-4,69	----	----	2800	2500
29 : T11 SEC	0,981	-4,16	----	----	810	800

Tableau III-4 : Puissances et tensions aux nœuds (résultats de l'écoulement de puissance [19])

III-2-6 Compensation :

La puissance réactive fournie $Q = 6000$ kVar au nœud 03 : MILL-1.

III-2-7 Source polluante : [19]

Le variateur de vitesse pour moteur connecté au jeu de barres (49 : RECT) est modélisé en régime harmonique par des sources de courant pour les différents rangs harmoniques, son spectre est donné par le tableau suivant :

Rang harmonique	I_h (%)	I_h (A)	Angle relatif (Degrés)
1	100	1426,01	00.00
5	18.24	260,104	-55.68
7	11.90	169,695	-84.11
11	5.73	81,71	-143.56
13	4.01	57,183	-175.58
17	1.93	27,52	111.39
19	1.39	19,821	68.30
23	0.94	13,404	-24.61
25	0.86	12,263	-67.64
29	0.71	10,124	-145.46
31	0.62	8,841	176.83
35	0.44	6,274	97.40
37	0.38	5,418	54.36

Tableau III-5 : les données de la source polluante.

III-2-8 Les charges : [15]

Les valeurs des charges sont données dans le tableau suivant et sont considérées comme des charges linéaires (moteurs) qui sont constitués de résistances R_m et d'inductance L_m en série.

$$R_m = \frac{U_{\tilde{n}}^2}{\left(1 + \frac{Q^2}{P^2}\right)P} \quad (\text{III-1})$$

$$L_m = \frac{U_{\tilde{n}}^2}{\omega \left(1 + \frac{P^2}{Q^2}\right)Q} \quad (\text{III-2})$$

Charges	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7
R(Ω)	0.07189	15.768	0.06278	2.5248	0.04799	0.1165	0.3815
L(H)	0.000168	0.03734	0.000042	0.00577	0.0001257	0.006837	0.0009036

Tableau III-6 : les paramètres des charges linéaires.

III-3 Représentation du réseau test sous MATLAB/SIMULINK :

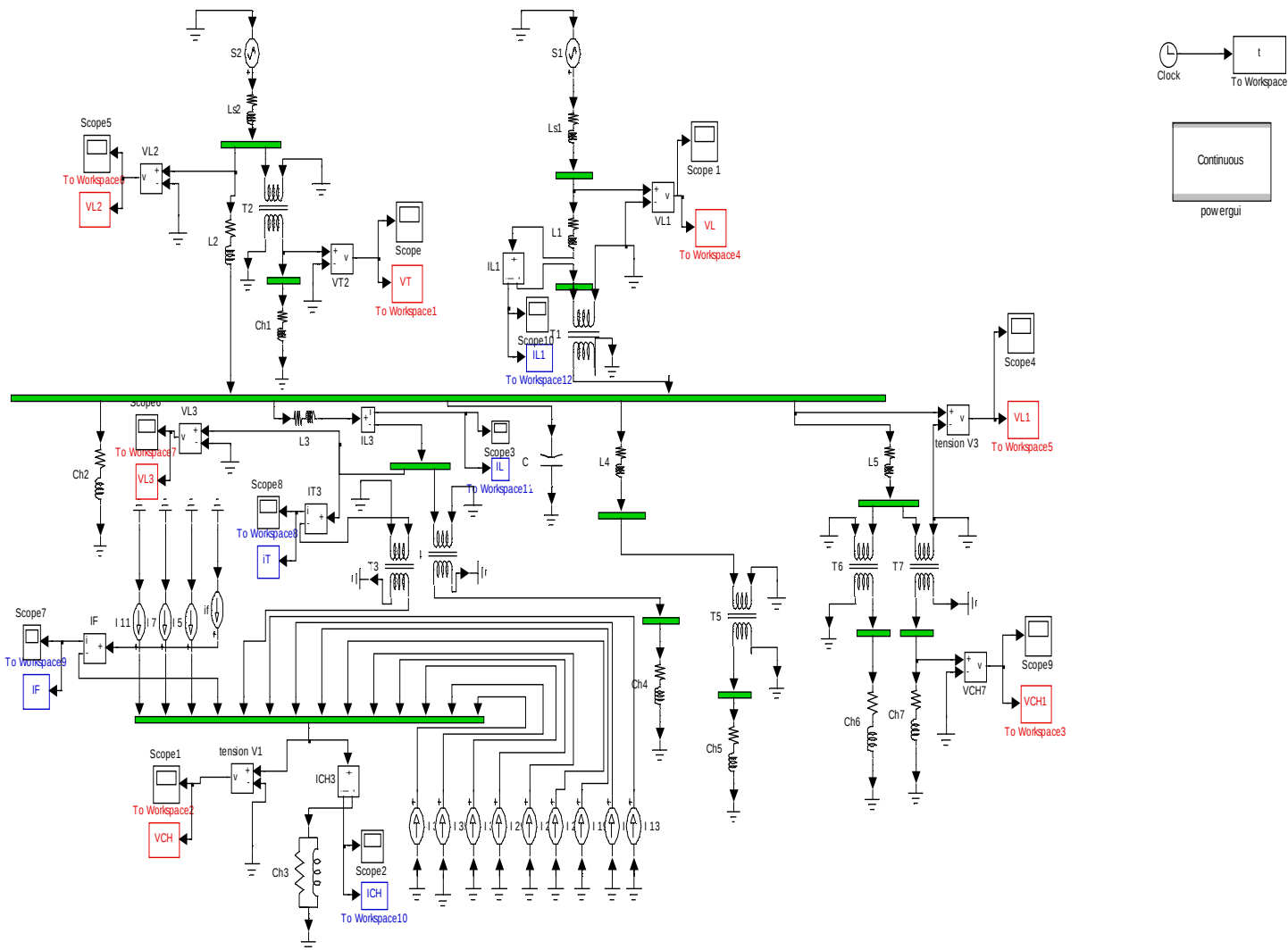


Figure III-2 : réseau test de 13 nœuds.

III-4 Formes d'ondes et spectres des signaux :

Nous prenons les formes des signaux et leurs spectres aux niveaux des jeux de barres importants.

III-4-1 Les tensions :

➤ Jeu de barres (100 : UTIL-69) :

$$\text{TDH} = 0,42\%$$

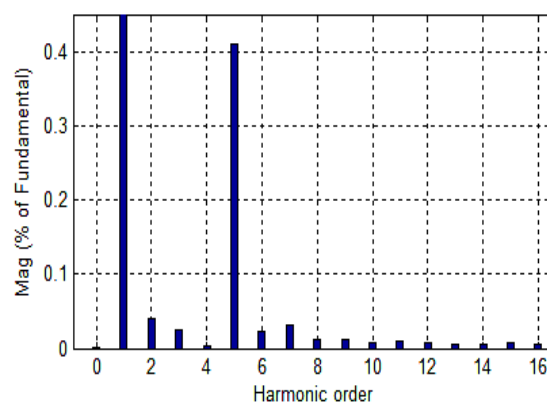
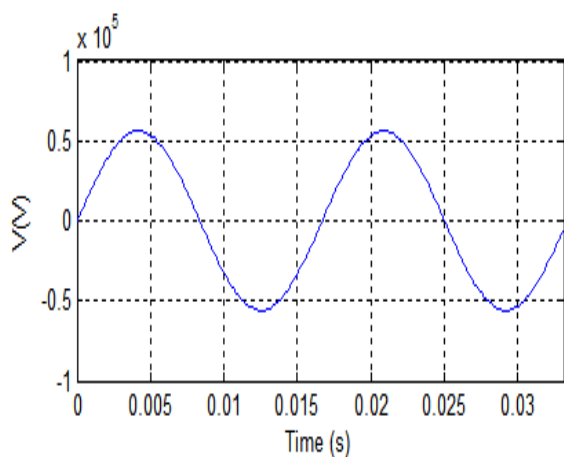


Figure III-3 : Forme d'onde et spectre de la tension au de jeu de barres (100-UTIL-69)

➤ Jeu de barres (50 : GEN-1) :

$$\text{TDH} = 2,28\%$$

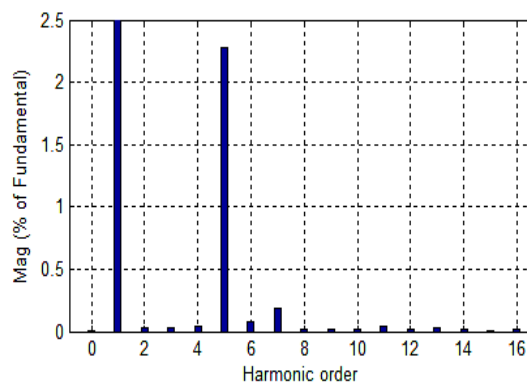
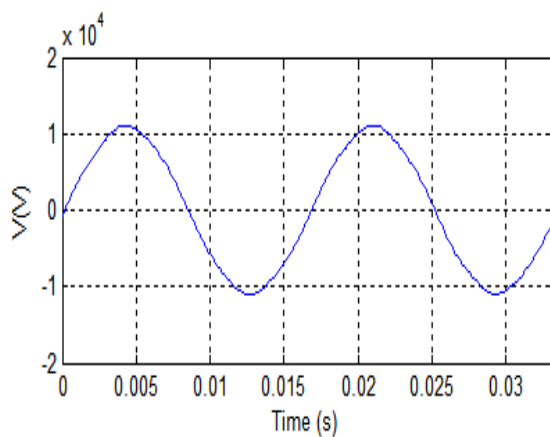


Figure III-4 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (50 : GEN-1).

➤ Jeu de barres (03 : MILL-1) :

$$\text{TDH} = 3,10\%$$

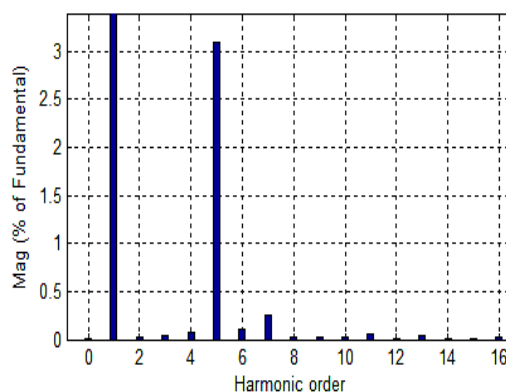
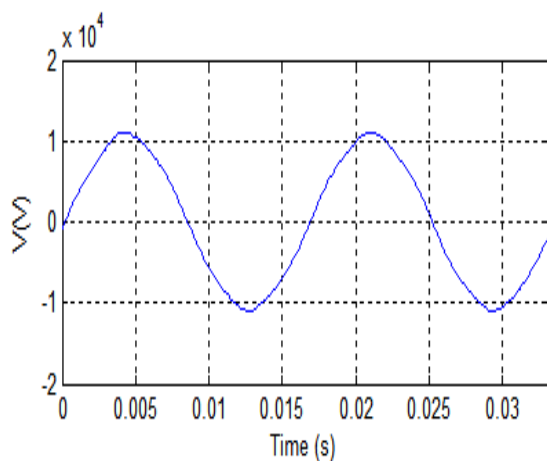


Figure III-5 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (O3-MILL-1).

➤ Jeu de barres (05 : FDR F) :

$$\text{TDH} = 3,11\%$$

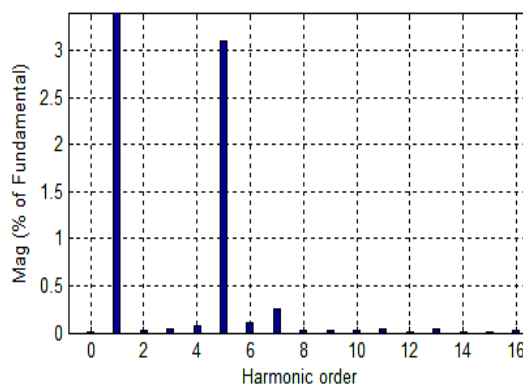
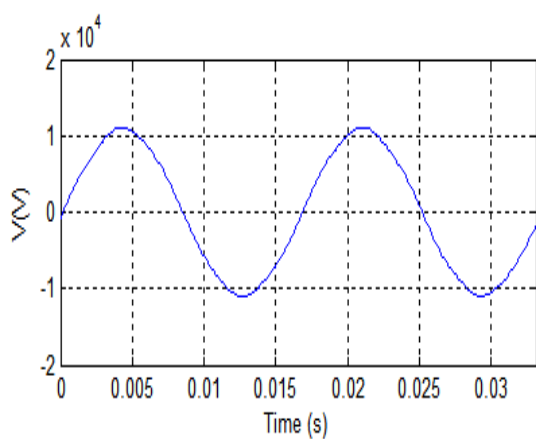
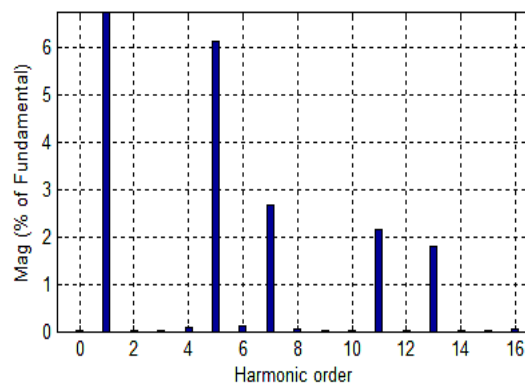
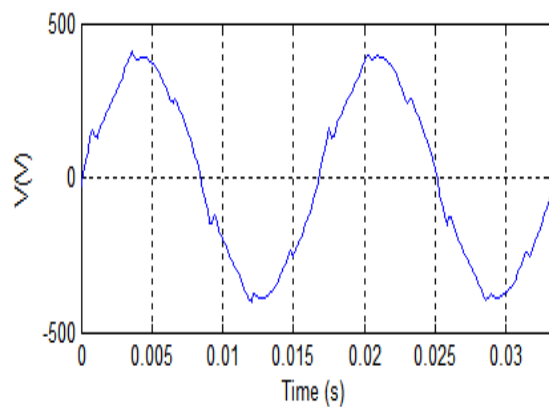


Figure III-6 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (05 : FDR F).

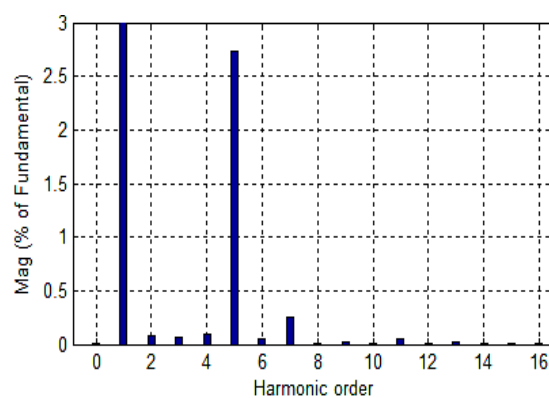
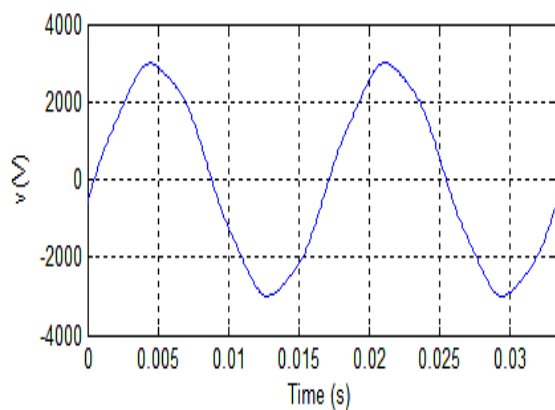
➤ Jeu de barres (49 : RECT) :

TDH = 7,25%

**Figure III-7 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (49 : RECT).**

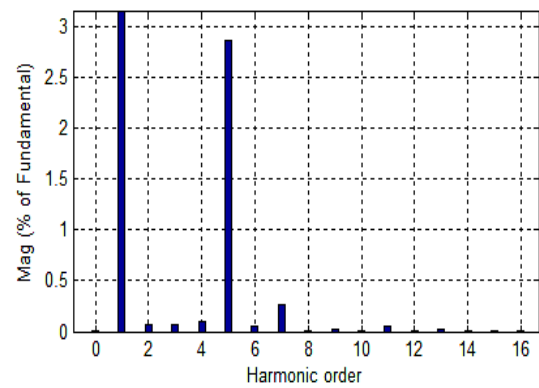
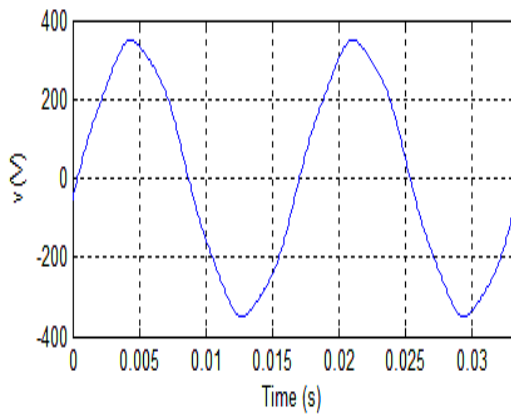
➤ Jeu de barres (39 : T3 SEC) :

TDH=2,75%

**Figure III-8 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (39 : T3 SEC).**

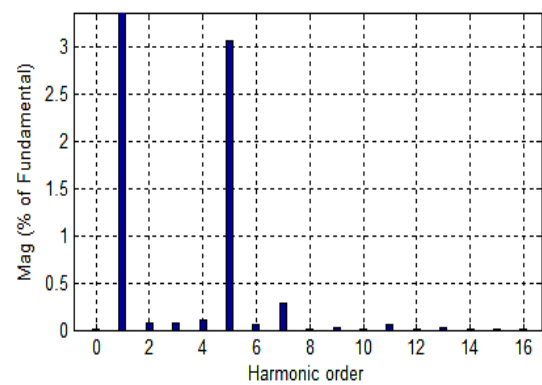
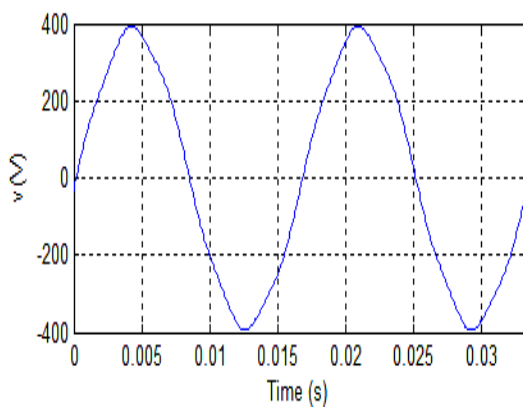
➤ Jeu de barres (29 : T11 SEC) :

TDH=2,87%

**Figure III-9 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (29 : T11 SEC).**

➤ Jeu de barres (11 : T4 SEC) :

TDH=3,08%

**Figure III-10 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (11 : T4 SEC).**

➤ Jeu de barres (19 : T7 SEC) :

TDH = 2,79%

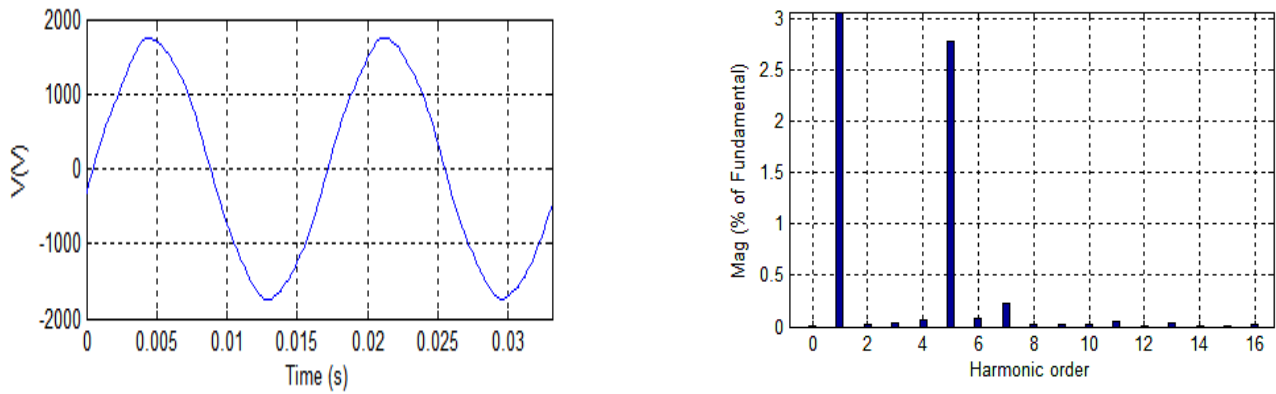


Figure III-11 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (19 : T7 SEC).

➤ Au niveau du primaire du transformateur T3 :

TDH = 3,06%

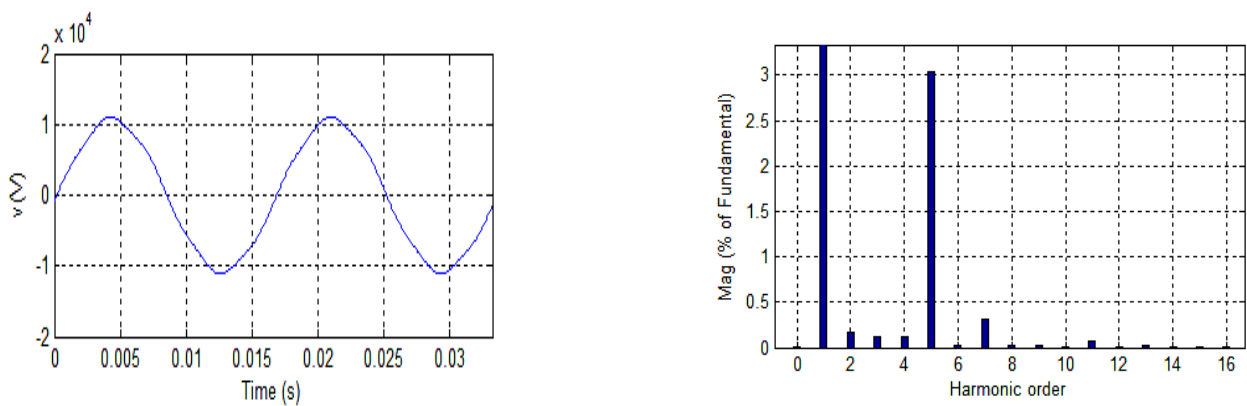


Figure III-12 : Forme d'onde et spectre de la tension au primaire de T3.

➤ Au niveau de secondaire du transformateur T3 :

TDH=7,18%

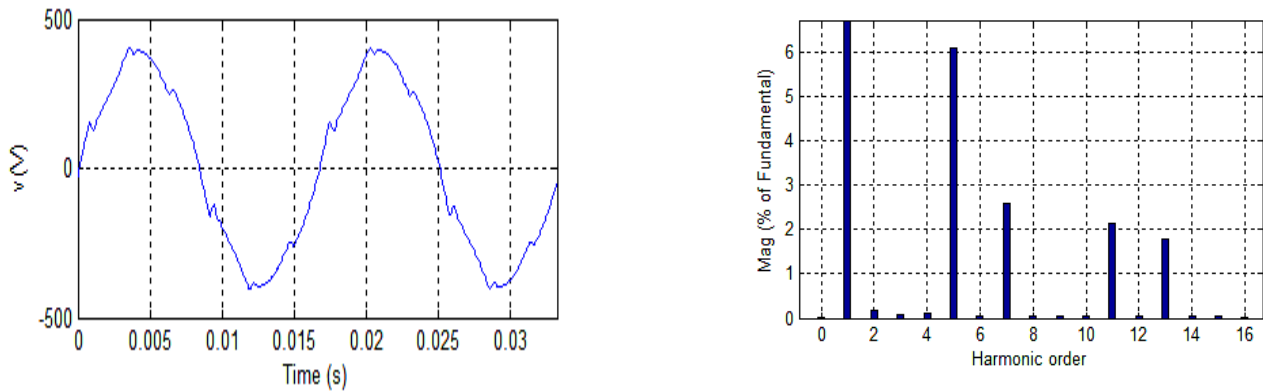


Figure III-13 : Forme d'onde et spectre de la tension au secondaire de T3.

Commentaires :

La distorsion harmonique de la tension est assez importante au niveau du jeu de barres (49 : RECT) 7,25% et cette valeur est supérieure à la valeur imposée par la Commission Electrotechnique International (CEI) 5%. Alors qu'elle est relativement acceptable aux niveaux des autres jeux de barres de basses et moyennes tensions.

Au niveau des jeux de barres HT (69kV) la distorsion harmonique est très faible ce qui est en accord avec les résultats de la bibliographie.

D'après les spectres harmoniques des tensions nous remarquons la prépondérance du rang 5 par rapport au rang 7 et rang 11 dans tous les jeux de barres.

Le variateur de vitesse pour moteurs connectés au jeu de barres (49 : RECT), produit une distorsion harmonique qui influence sur tous les jeux de barres de ce réseau.

Comparaison entre les résultats trouvés et ceux donnés par la référence [19] :

N° de jeu de barres	Jeu de barres	TDH de la référence (%)	TDH de la simulation (%)
01	100 : UTIL-69	0,28	0,42
02	01 : 69-1	0,37	0,40
03	03 : MILL-1	1,93	3,10
04	50 : GEN-1	1,87	2,28
05	51 : Aux	1,81	2,12
06	05 : FDR F	1,94	3,11
07	49 : RECT	8,02	7,25
08	39 : T3 SEC	1,80	2,75
09	26 : FDR G	1,93	3,08
10	06 : FDR H	1,93	3,08
11	11 : T4 SEC	1,90	3,08
12	19 : T7 SEC	1,81	2,79
13	29 : T11 SEC	1,84	2,87

Tableau III-7 : Résultats des TDH de tension dans les différents jeux de barres.

Interprétation des résultats :

Nous constatons que les résultats trouvés sont assez proches de ceux publiés dans la référence [19].

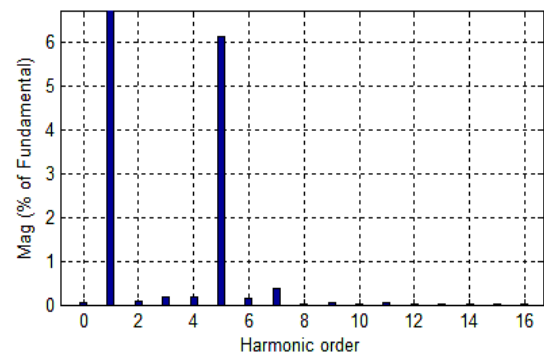
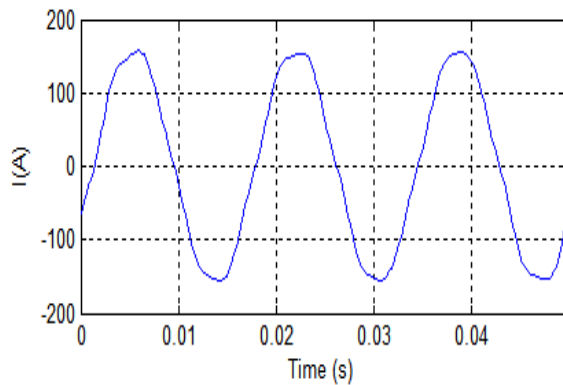
Cette légère différence des résultats est due à l'utilisation de modèles différents notamment pour les transformateurs où nous avons tenus compte de la branche magnétisante (Modèle MATLAB) contrairement à l'article, de plus les méthodes de calcul utilisés par le logiciel MATLAB sont différentes de celles utilisées dans la référence.

III-4-2 Les courants :

Nous prenons les formes d'ondes et leurs spectres pour les courants à travers quelques lignes et câbles du réseau.

➤ Ligne L_1 :

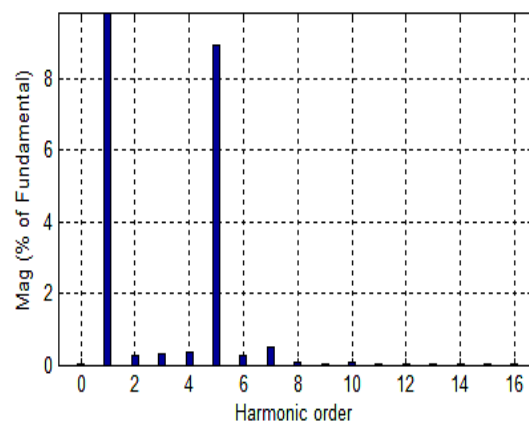
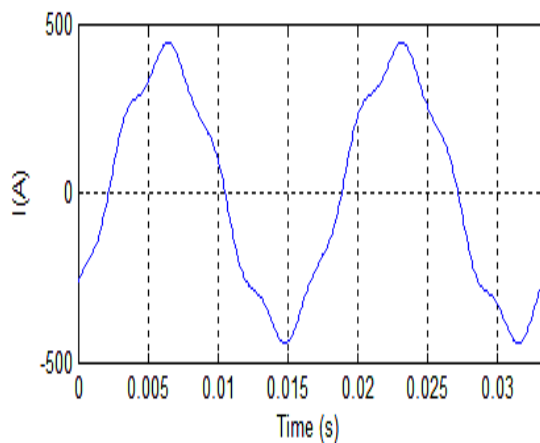
TDH=6,13%



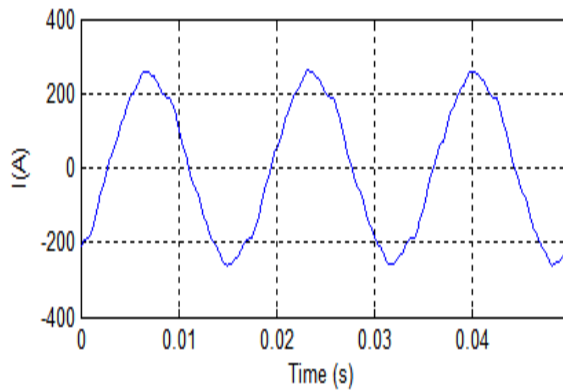
III-14 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L1.

➤ Ligne L_2 :

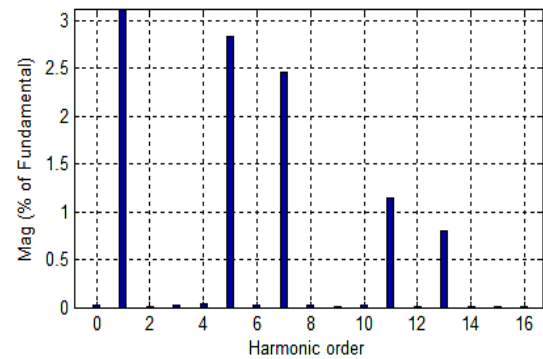
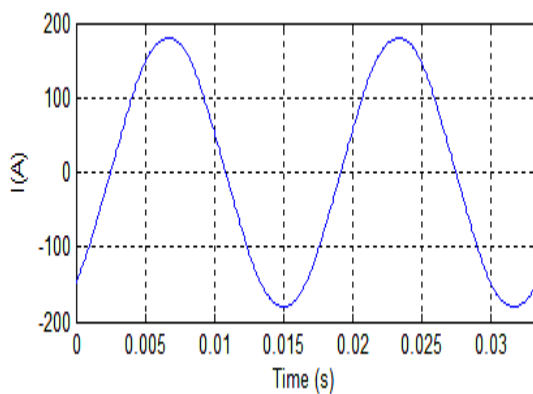
TDH=8,96%



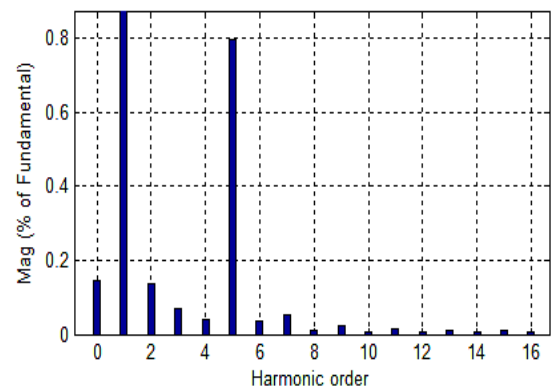
III-15 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L2.

➤ Ligne L₃ :

TDH 4.00%

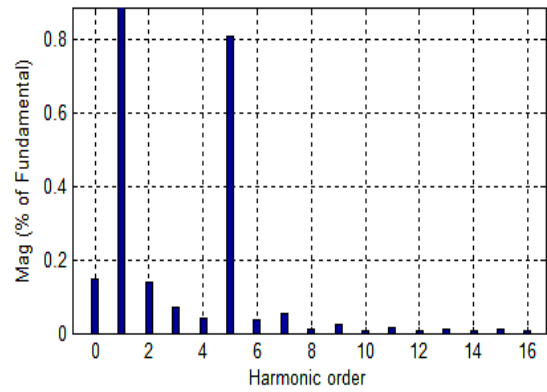
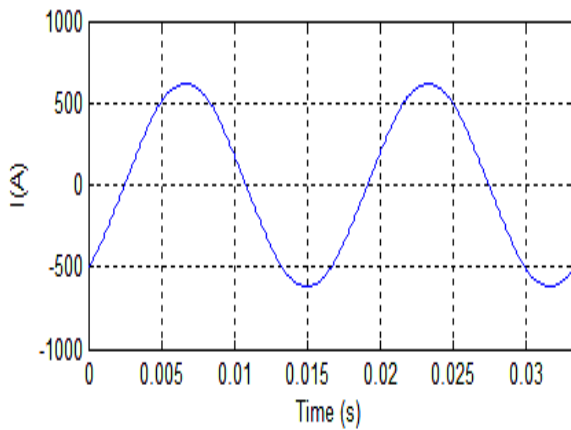
**III-16 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L3.**➤ Ligne L₄ :

TDH=0,81%

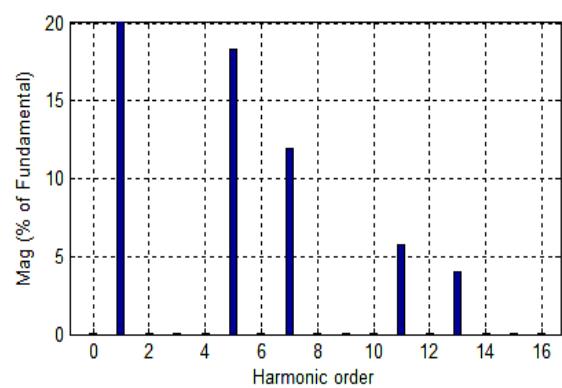
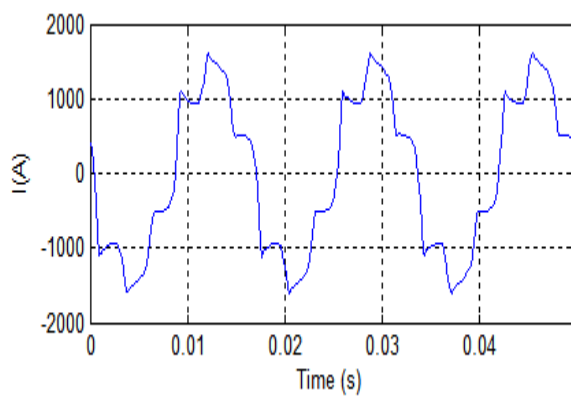
**III-17 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L4.**

➤ **Ligne L₅ :**

TDH=0,82%

**III-18 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L5.**➤ **Secondaire du transformateur T3 :**

TDH = 22,92%

**Figure III-19 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers le secondaire du T3.**

Les valeurs de TDH de courant des lignes sont données dans le tableau suivant :

Lignes	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	L ₅	Secondaire du transformateur T3
TDH _i (%)	6,13	8,96	4,00	0,81	0,82	22,92

Tableau III-8: résultats de TDH de courants dans les lignes.

Conclusion :

La distorsion harmonique de courant dans le réseau diminue dans le sens des niveaux de tension décroissante MT (TDH de L₁=6,13%) vers BT (TDH de L₅=0,82%)

Pour les courants à travers les lignes du réseau, nous remarquons que le TDH est élevé par rapport aux tensions cela explique que les courants sont plus sensibles à la distorsion harmonique.

Lorsque le TDH est élevé on dit que le signal est perturbé ou pollué et pour résoudre ce phénomène de propagation des harmoniques dans ce réseau on utilise le dispositif de filtrage (filtre résonant) dans le chapitre suivant.

Introduction :

Avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour combattre les harmoniques, il faut s'intéresser au mode de raccordement du récepteur pollueur vis-à-vis de l'installation concernée et des autres charges présentes sur le même réseau pour calculer le filtre qui correspond.

Le but de ces filtres est de ramener le TDH à une valeur inférieure à 5% comme l'impose la Commission d'Electrotechnique International (CEI).

Dans ce chapitre on place des filtres résonant au niveau de jeu de barres (49 : REC T), qui consiste à éliminer les harmoniques du rang 5 et rang 7, car la distorsion harmonique de la tension au niveau de ce jeu de barres est de (7,25%).

V-1 Calcul de filtre résonant :

Le filtre résonant est constitué d'une inductance L en série avec un condensateur C . et leurs valeurs sont calculer à la fréquence de résonnance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer. Et si le signal est déformé et comprend plusieurs rangs harmoniques, on doit prévoir à chaque rang un filtre accordé.

$$C = \frac{Q}{U^2 \omega_0} \quad (V-1)$$

$$L = \frac{1}{C \omega_h^2} \quad (V-2)$$

$$\text{On a } \begin{cases} U = 0,48 \times 10^3 \text{ V} \\ Q_c = \frac{6000}{\sqrt{3}} \times 10^3 \text{ Var} \end{cases}$$

Les paramètres de filtre résonant pour éliminer l'harmonique 5 :

$$\begin{cases} \omega_0 = 2\pi f & \text{avec } f = 60\text{Hz} \\ \omega_5 = 2\pi f_5 & \text{avec } f_5 = 300\text{HZ} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C = 0,026588 \text{ (F)} \\ L_5 = 1,0585517 \times 10^{-5} \text{ (H)} \end{cases}$$

Les paramètres de filtre résonant pour éliminer l'harmonique 7 :

$$\begin{cases} \omega_0 = 2\pi f \text{ avec } f = 60\text{Hz} \\ \omega_7 = 2\pi f_7 \text{ avec } f_7 = 420\text{HZ} \end{cases}$$

$$\begin{cases} C = 0,026588 \text{ (F)} \\ L_7 = 5,40077 \times 10^{-6} \text{ (H)} \end{cases}$$

Les résultats de calcul des filtres qui correspondent aux rangs harmoniques sont donnés dans le tableau suivant :

Rang d'harmonique	Rang 5	Rang 7
L en (H)	0,10586617 10^{-6}	5,4007741 10^{-6}
C en (F)	0,026588	0,026588

Tableau IV-1 : les paramètres des filtres résonants.

IV-2 Représentation du réseau test sous MATLAB/SIMULINK avec filtre résonant :

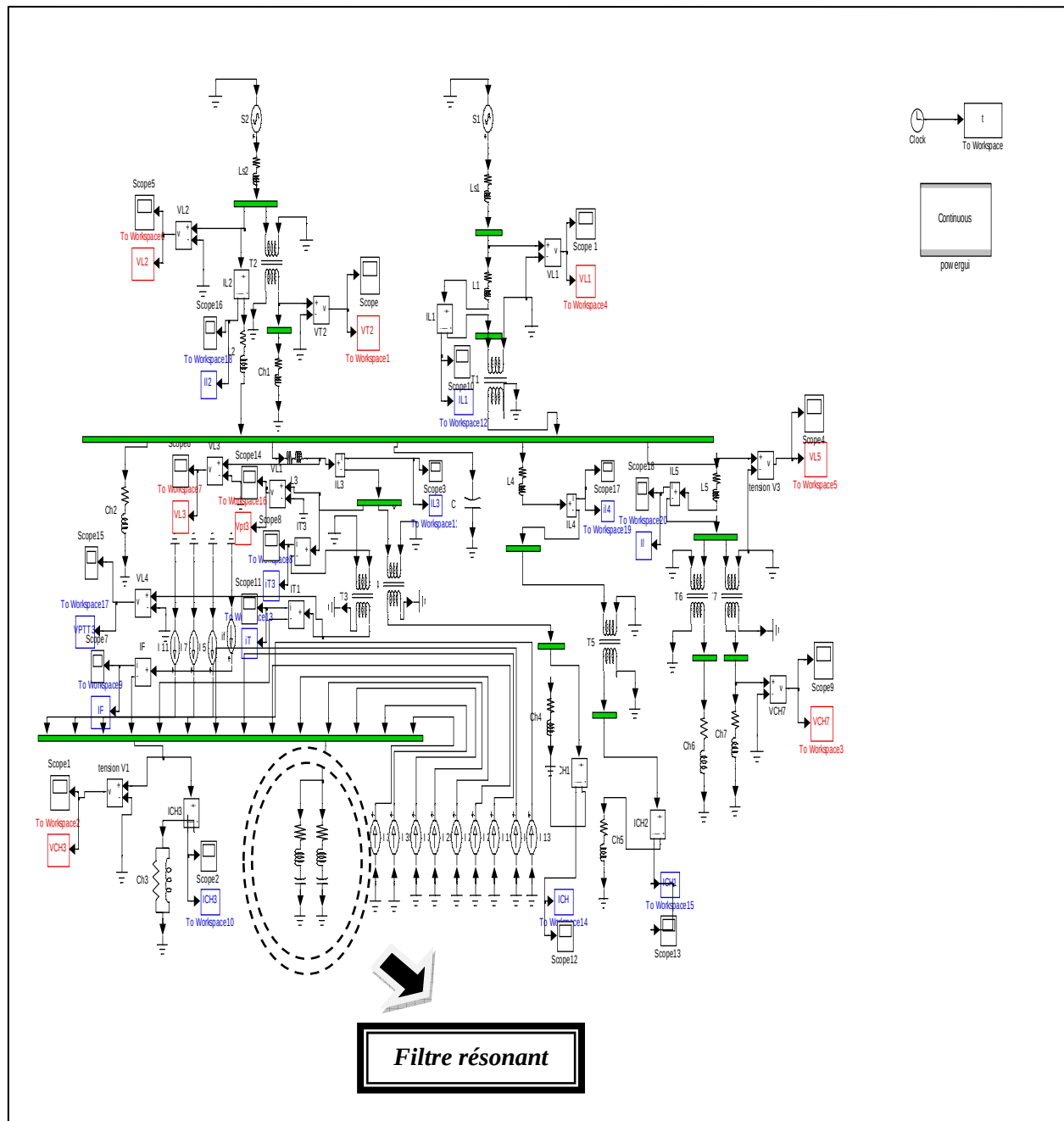


Figure III-2 : réseau test avec filtrage.

IV-3 Formes d'ondes et spectres des signaux des tensions avec filtrages :

Nous prenons les formes des signaux et leurs spectres aux niveaux des jeux de barres importants

➤ **Au niveau de jeu de barres (03 : MILL-1) :**

- ✓ Après le placement du filtre résonant accordé à l'harmonique 5, on obtiendra les résultats suivants :

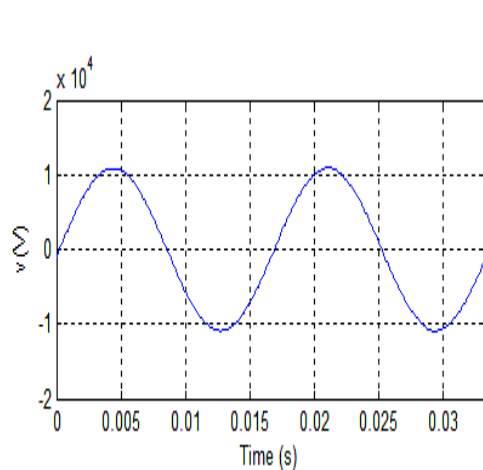


Figure IV-1 : forme d'onde de tension

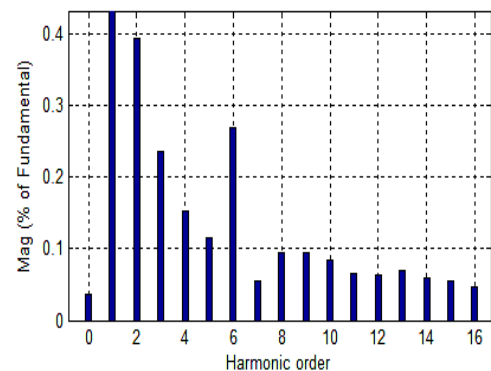


Figure IV-2 : spectre de la tension

- ✓ Après l'ajout du filtre résonant accordé à l'harmonique 7, on obtiendra les résultats suivants :

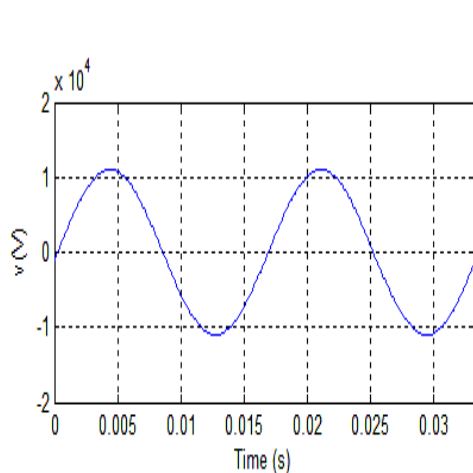


Figure IV-3 : forme d'onde de tension

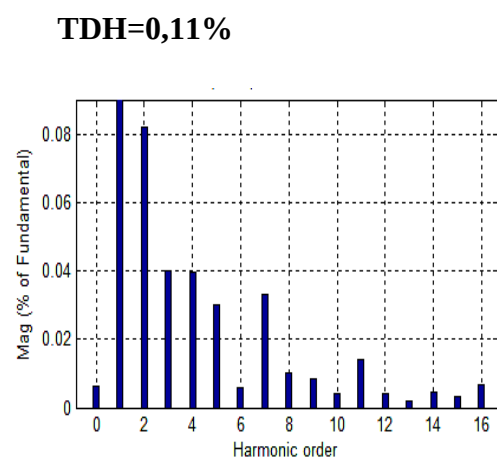


Figure IV-4 : spectre de la tension

➤ **Au niveau de jeu de barres (50 : GEN-1) :**

- ✓ Après le placement de filtre résonant accordé à l'harmonique 5, on obtiendra les résultats suivants :

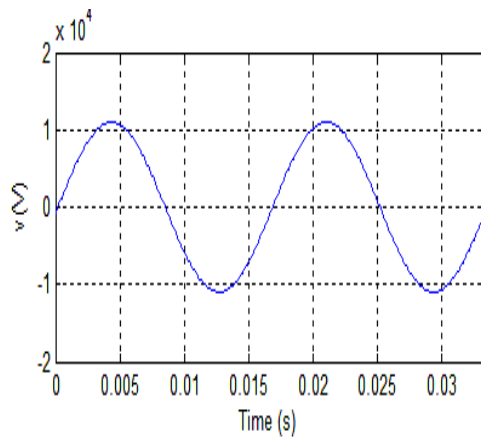


Figure IV-5 : forme d'onde de tension

TDH=0,59%

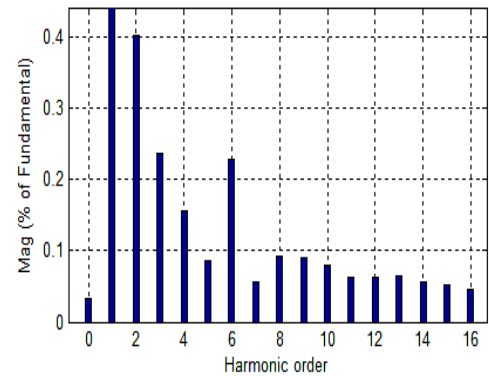


Figure IV-6 : spectre de la tension

- ✓ Après l'ajout du filtre résonant accordé à l'harmonique 7, on obtiendra les résultats suivants :

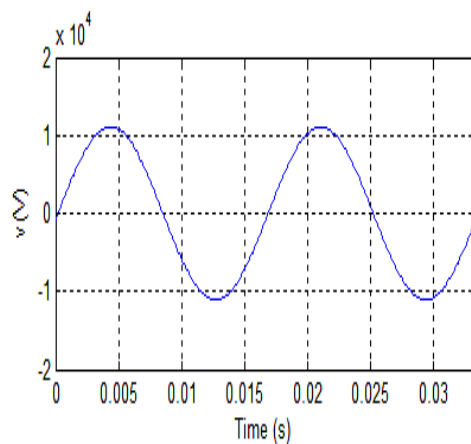


Figure IV-7 : forme d'onde de tension

TDH=0,11%

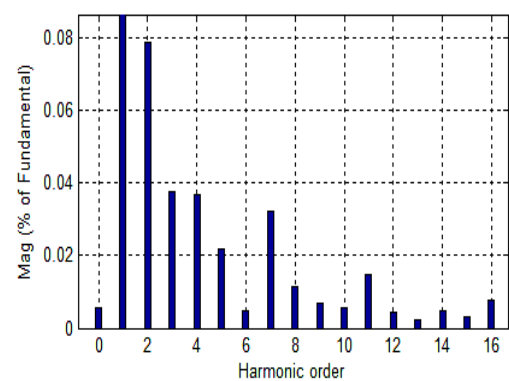


Figure IV-8 : spectre de la tension

➤ **AU niveau de jeu de barres (05 : FDR F) :**

- ✓ Après le placement de filtre résonant accordé à l'harmonique 5, on obtiendra les résultats suivants :

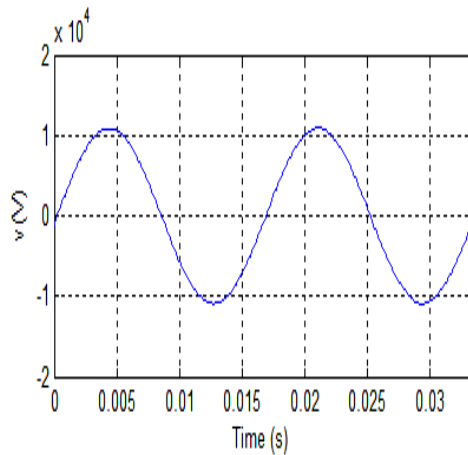


Figure IV-9 : forme d'onde de tension

TDH=0,61%

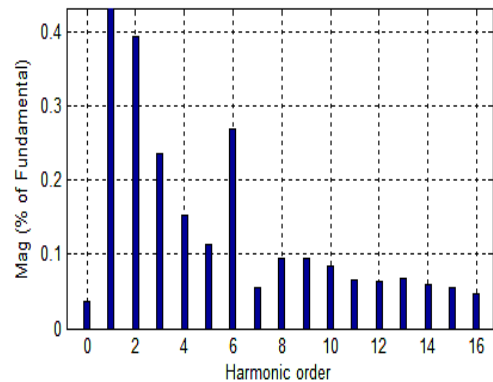


Figure IV-10 : spectre de la tension

- ✓ Après l'ajout du filtre résonant accordé à l'harmonique 7, on obtiendra les résultats suivants :

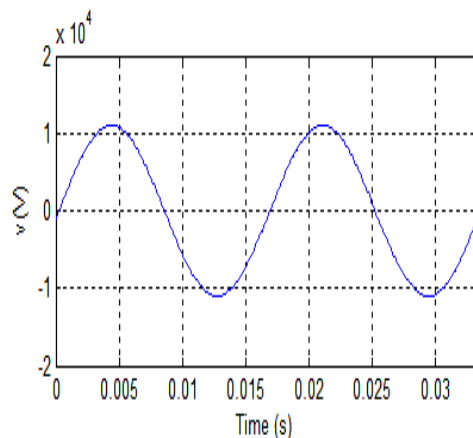


Figure IV-11 : forme d'onde de tension

TDH=0,11%

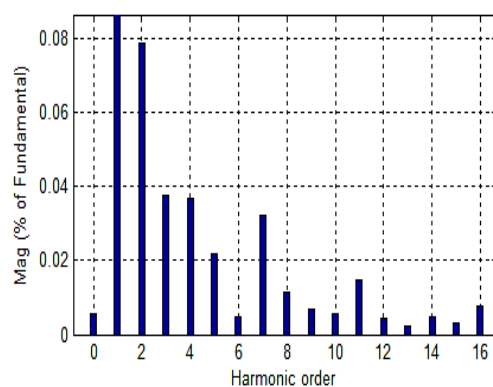


Figure IV-12 : spectre de la tension

➤ **Au niveau de jeu de barres (49 : REC T) :**

- ✓ Après le placement de filtre résonant accordé à l'harmonique 5, on obtiendra les résultats suivants :

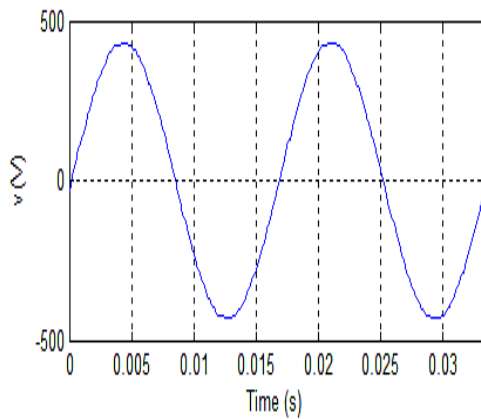


Figure IV-13 : forme d'onde de tension

TDH=1,04%

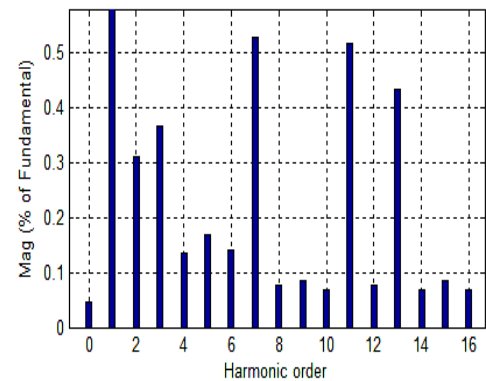


Figure IV-14 : spectre de la tension

- ✓ Après l'ajout du filtre résonant accordé à l'harmonique 7, on obtiendra les résultats suivants :

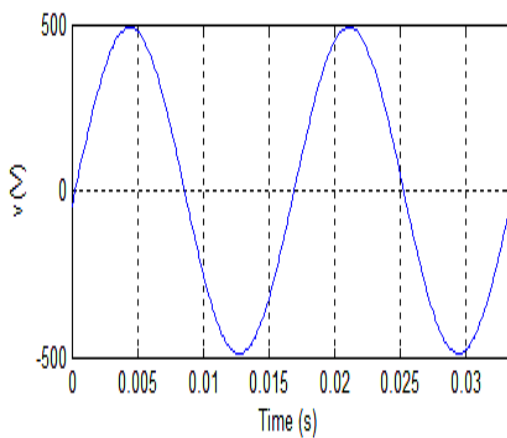


Figure IV-15 : forme d'onde de tension

TDH=0,27%

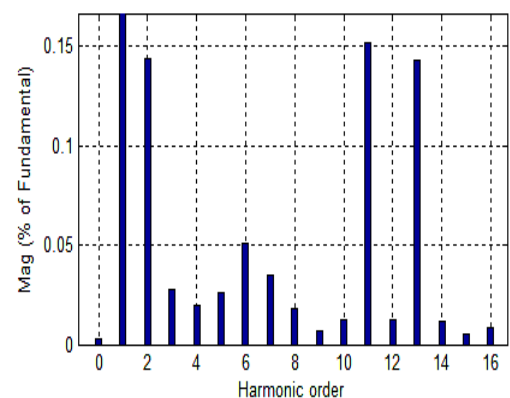


Figure IV-16 : spectre de la tension

➤ **Au niveau de jeu de barres (19 : T7 SEC) :**

- ✓ Après le placement de filtre résonant accordé à l'harmonique 5, on obtiendra les résultats suivants :

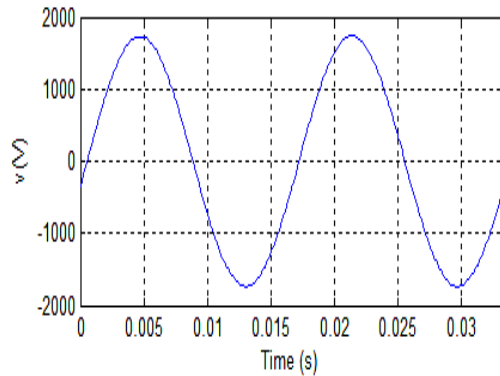


Figure IV-17 : forme d'onde de tension

TDH=0,59%

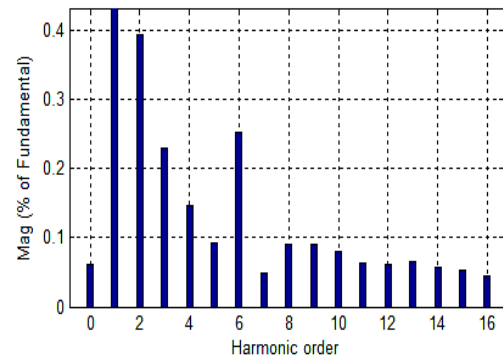


Figure IV-18 : spectre de la tension

- ✓ Après l'ajout du filtre résonant accordé à l'harmonique 7, on obtiendra les résultats suivants :

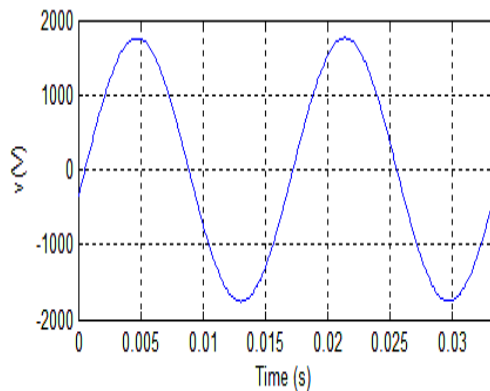


Figure IV-19 : forme d'onde de tension

TDH=0,11%

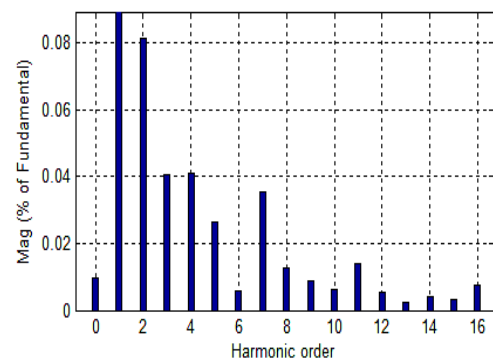


Figure IV-20 : spectre de la tension

IV-4 Comparaison des résultats de TDH avant et après le filtrage :

N° de jeu de barres	Jeu de barres	TDH avant filtrage (%)	TDH après filtrage (rang5) %	TDH après e filtrage (rang5,7) %
01	100 : UTILL-69	0,42	0,58	0,10
02	01 : 69-1	0,40	0,58	0,10
03	03 : MILL-1	3,10	0,61	0,11
04	50 : GEN-1	2,28	0,59	0,11
05	51 : Aux	2,12	0,58	0,11
06	05 : FDR F	3,11	0,61	0,11
07	49 : RECT	7,25	1,04	0,27
08	39 : T3 SEC	2,75	0,59	0,11
09	26 : FDR G	3,08	0,61	0,11
10	06 : FDR H	3,08	0,61	0,11
11	11 : T4 SEC	3,08	0,61	0,11
12	19 : T7 SEC	2,79	0,59	0,11
13	29 : T11 SEC	2,87	0,59	0,11

Tableau IV-2 : les résultats des TDH des tensions avant et après le filtrage.

Interprétation des résultats :

On remarque d'après les résultats du tableau IV-2 que les filtres placés en parallèle au niveau de jeu de barre (49 : RECT) ont fait diminuer les TDH de tension aux niveaux de tous les jeux de barres du réseau.

Conclusion :

Le variateur de vitesse pour moteurs connectés au jeu de barres (49 : RECT), produit une distorsion harmonique qui influence tous jeux de barres du réseau. Les résultats obtenus dans le tableau ci-dessus après le filtrage sont très satisfaisants, le filtre résonant a fait diminuer les taux de distorsion harmonique, ce qui montre l'efficacité de ce filtre. On peut dire aussi, qu'un seul filtre suffit pour dépolluer ce réseau.

Conclusion générale :

Ce travail a été consacré à l'étude de la distorsion harmonique dans un réseau industriel moyenne tension de 13 nœuds.

Nous avons constaté que la distorsion harmonique de tension causée par le variateur de vitesse est acceptable sauf au niveau du nœud pollueur (TDH = 7.25%). Généralement la distorsion en tension diminue en remontant vers les niveaux de tension élevés (le TDH à la source est de 0.42%).

Nous constatons que contrairement aux tensions, les courants présentent des TDH importants en remontant vers les niveaux de tensions élevés (le TDH dans L1 est de 6.13%).

Les filtres résonants connectés au jeu de barres pollueur, réduisent d'une manière significative la distorsion harmonique de tension.

Enfin ce travail, nous a permis de toucher un peu à un domaine aussi vaste qu'est la pollution harmonique dans les réseaux électriques.

Bibliographie

[1]: M. Hakim, A. Yahia, M. Bessadi.

«Pollution harmonique due aux redresseurs triphasés et la stratégies de dépollution »

Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou 2001.

[2] : T. DEFLANDRE. P. MAURAS

« Les harmoniques sur les réseaux électriques. »

Direction des études et des recherches de l'EDF. Edition Eyrolles, 1998.

[3] : D. OLLIVIER

« La simulation des perturbations harmoniques. »

Direction des études et des recherches de l'EDF. SERIE B N°1, 1991.

[4] : T. DEFLANDRE, J. MARTINON

« Guide sur les harmoniques à l'usage des responsables du suivi des contrats EMRAUDE »

Note d'EDF edition Eyrolles, 1997

[5]: N. Haned, M. Hadji

«Evaluation des pertes de puissances dues aux harmoniques dans un réseau électrique »

Mémoire d'ingénieur Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2006.

[6] : S. Messouter, Dj. Leharani

« Analyse du courant du neutre dans un système triphasé en présence de charge non linéaire. »

Mémoire d'ingénieur Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2009.

Bibliographie

[7] : Mohand Alaa Eddin Alali.

« Contribution à l'étude des Compensations Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension. »

Thèse de doctorat, Université Louis-Pasteur « Strasbourg I », 12 Septembre 2001

[8] : Christophe PREVE

« Réseau électrique industriel » Tome 2.

Edition LAVOISER, Juin 2005.

[9] : Eric FELICE

« Perturbations harmoniques, Effet, Origine, Mesure, diagnostic, Remèdes. »

Edition DUNOD 2001.

[10] : R. LARABI

« Edition du sens des injections harmoniques sur un réseau pollué. »

Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2003.

[11] : S. CHALAL, N. YASSA.

« Analyse de la propagation harmonique dans un réseau électrique. »

Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2005.

[12] : Eric FELICE, Philippe REVILLA

« Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique.»

Edition Dunod, Paris, 2009

[13] : Christophe PREVE

« Réseau électrique industriel » Tome 1.

Edition LAVOISER, Juin 2005.

[14]: J. BARRAT P. BORNAD B. MEYER.

«Simulation des réseaux électriques. »

Edition Ayrolles, 1997

Bibliographie

[15] : M^r H. BADOU

« Étude de la propagation des harmoniques dans un réseau industriel. »

Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2007.

[16] : M^r H. BESSAI

« Étude de la propagation des harmoniques dans les réseaux électriques. »

Mémoire de Magistère, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2000.

[17] : Meziane AOUES

« Filtrage actif des harmoniques générées par un redresseur triphasé »

Mémoire de Magistère, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2004.

[18] : Jean NOEL FIORINA

« Harmoniques en amont des redresseurs des ASI N° 160 »

Edition Mars 1993.

[19]: Task Force on Harmonics Modeling and Simulation.

«Test systems for Harmonics Modeling and Simulation »

PE-260-PWRD-0-11-1997.

[20]: Mohamed Muftah ABDUSLAM.

«Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèles et hybride avec validations expérimentales »

Thèse pour l'obtention du titre doctorat, Université Poincaré-Nancy I

Résumé

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques à entraîné de plus en plus des problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques.

La distorsion harmonique est générée par les charges connectés au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau, cette pollution harmonique à des effets nocifs sur les éléments du réseaux qui peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain des machines tournantes voire la destruction totale de ces équipements.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité d'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- La réduction de l'impédance de court-circuit.
- La modification du convertisseur statique polluant.
- Les dispositifs de filtrage.

L'utilisation de dispositif de filtrage tels que les filtres passifs dits résonants ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propages dans les réseaux électriques.

Ce travail à été consacré à l'étude de la distorsion harmonique dans un réseau industriel moyenne tension de 13 nœuds.

Nous avons constaté que la distorsion harmonique de tension causée par le variateur de vitesse est acceptable sauf au niveau du nœud pollueur (TDH = 7.25%). Généralement la distorsion en tension diminue en remontant vers les niveaux de tension élevés (le TDH à la source est de 0.42%).

Nous constatons que contrairement aux tensions, les courants présentent des TDH importants en remontant vers les niveaux de tensions élevés (le TDH dans L1 est de 6.13%).

Les filtres résonants connectés au jeu de barres pollueur, réduisent d'une manière significative la distorsion harmonique de tension.

Enfin ce travail, nous a permis de toucher un peu à un domaine aussi vaste qu'est la pollution harmonique dans les réseaux électriques.

Mots clés

distorsions harmoniques, TDH, Les filtres résonants, jeu de barres, tension harmonique, courant harmonique, rang harmonique.