

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités sur les harmoniques	
1 .Définitions :	
1 .1 Définition des harmoniques	2
1 .2 Courants harmoniques	4
1.3 Tensions harmoniques	5
1.4 Puissances harmoniques	5
1.5 Rang de l'harmonique	5
1.6 Inter-harmoniques	5
1 .7 Infra-harmoniques	6
1.8 Taux de distorsion harmonique	6
1.9 Foisonnement des phases	8
1.10 Facteur de crête	8
1.11 Facteur de puissance	
1.12 Facteur d'amplification ou facteur de qualité	9
2 .Origines des harmoniques	9
3 .Effets des harmoniques	11
3.1 Les effets instantanés	11
3.2 Les effets différés (effets à long terme)	11
CHAPITRE II : Modélisation des éléments du réseau	
1. Réseau industriel	12
2 .Condition de propagation des harmoniques sur le réseau	13
3. Impédance du réseau	14

4. Résonance	17
2.1 La résonance parallèle	17
2.2 La résonance série	18
5. Solutions de filtrage	21
3.1 Filtre passif	21
3.2 Filtre actif	26
6. Modélisation des éléments du réseau en régime harmonique	28
6.1 Modélisation d'un réseau amont	28
6.2 Modélisation des transformateurs	29
6.3 Modélisation des câbles et des lignes	30
6.4 Modélisation d'une charge linéaire	31
6.5 Modélisation d'une charge perturbatrice	33
6.6 Modélisation d'une batterie de condensateur	35
7. Normes en vigueur	35
CHAPITRE III : Simulation avec MATLAB SIMULINK	
1. Représentation du réseau test	37
2. Paramètres du réseau	38
2.1 Source	38
2.2 Générateur	38
2.3 Impédance des lignes et câbles	38
2.4 Transformateurs	39
2.5 Données aux nœuds	39
2.6 Compensation	40
2.7 Source polluante	40

3. Résultats de simulation	41
3.1 Représentation du réseau sous MATLAB SIMULINK	41
3.2 Taux de distorsion harmonique en tension aux nœuds	42
3.3 Formes d'ondes et spectres des signaux tension et courant	43
3.4 Impédance harmonique vue des jeux de barres du réseau	48
3.5 Effet de la compensation sur la distorsion harmonique de la tension	49
Conclusion générale	52

Introduction :

L'essor technologique a connu ces dernières années une remarquable évolution, cette avancée a drainé tous les domaines technologiques, nous apostrophons le domaine de l'électricité.

L'électricité avec toute ces formes (alternative, continue) représente l'une des sources importantes d'énergie utilisées dans plusieurs et différents usages domestiques ou industriels, c'est pour cela qu'elle doit être d'une bonne qualité, malheureusement certains désagréments s'y posent, ce qui se manifeste sous forme de différentes perturbations comme la pollution harmonique. Cette dernière provoque des effets nocifs sur le réseau électrique comme le dysfonctionnement d'appareils sensibles, l'échauffement des machines, le claquage des condensateurs.....etc.

Pour palier à ce problème, afin de réduire ces conséquences désastreuses, des solutions s'imposent tel que les dispositifs de filtrages.

L'une des sources importantes de la pollution harmonique dans les réseaux industriels, moyenne tension est le variateur de vitesse pour machines électriques.

Les courants harmoniques générés par le convertisseur se propagent à travers le réseau et contribuent à la distorsion de l'onde de tension, et peuvent dans certaines situations être à l'origine de résonances en présence de condensateurs de compensation d'énergie réactive.

L'objectif de notre travail est d'évaluer la distorsion harmonique dans un réseau industriel [1], en présence de convertisseurs statiques, à l'aide du logiciel MATLAB SIMULINK.

Nous avons divisé notre travail en trois parties, le premier chapitre est consacré aux généralités et définitions des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

Le second chapitre traite de la modélisation du réseau pour l'étude harmonique et la dernière partie est consacrée à la simulation numérique du réseau étudié.

Nous terminons notre rapport par une conclusion générale.

Introduction :

Parmi les phénomènes perturbateurs qui affectent l'environnement électromagnétique, les harmoniques occupent une place particulière.

Cette pollution constitue un sérieux problème de qualité d'énergie électrique. En effet les perturbations harmoniques provoquent beaucoup d'effets néfastes comme l'augmentation des pertes d'énergie, les risques de résonances entre les éléments inductifs et capacitifs à certaines fréquences harmoniques, les perturbations des appareils de protections...etc.

Dans les réseaux industriels, la présence des convertisseurs de puissances alimentant les moteurs ainsi que les condensateurs de compensation d'énergie réactive est courante ce qui peut occasionner des risques de résonances.

Ce chapitre présente les différentes généralités sur ce phénomène perturbateur.

1. Définitions:**1.1 Définition des harmoniques : [2]**

Un signal périodique alternatif se compose d'un fondamental et d'inter-harmonique. Un harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale du courant ou de la tension, d'ondes de fréquences différentes de celle de l'onde fondamentale, ces fréquences sont des multiples entiers de la fréquence du réseau.

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.

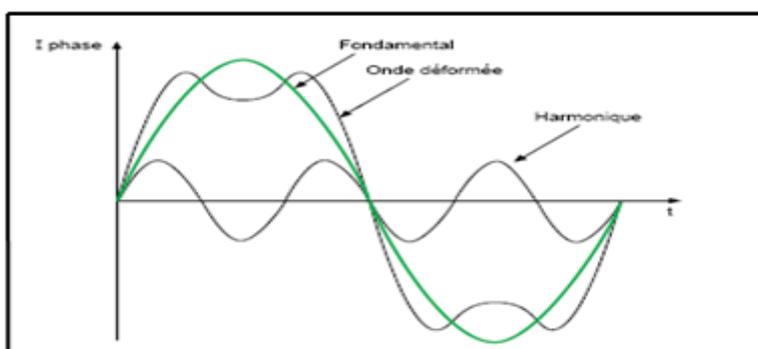


Figure I.1: signal déformé

❖ *Décomposition en série de Fourier* : [3]

Soit un signal périodique $s(t)$ de période T , de fréquence $f = \frac{1}{T}$ et de pulsation $\omega = 2\pi f$

est de :

- Valeur moyenne :

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

- Valeur efficace :

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

Tout signal périodique $s(t)$ de période T , donc de fréquence $f = \frac{1}{T}$ et de pulsation

$\omega = 2\pi f$, est décomposable en série de Fourier comme suit :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(\omega_h t) + b_h \sin(\omega_h t)] \quad (\text{I.3})$$

Avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Pour } h \geq 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} a_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega_h t) dt \\ b_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega_h t) dt \end{array} \right. \quad (\text{I.5})$$

$$(\text{I.6})$$

$$\text{Où :} \quad s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(\omega_h t + \theta_h) \quad (\text{I.7})$$

$$\theta_h = \arctg \frac{a_h}{b_h} \quad (\text{I.8})$$

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

$$f_h = h \cdot f \quad h = \frac{f_h}{f} \quad (I.9)$$

- Le terme $a_h \cos(\omega_h t) + b_h \sin(\omega_h t)$ est l'harmonique du rang h .

- La grandeur $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ est l'amplitude de l'harmonique du rang h

- $C_{\text{heff}} = \frac{c_h}{\sqrt{2}}$: La valeur efficace de l'harmonique h .

- θ_h : La phase de l'harmonique du rang h .

- a_0 : composante continue

- C_1 : amplitude de la composante fondamentale

Les appareils générant des harmoniques ont un spectre d'émission inférieur à 2500Hz, c'est pour cela que le domaine d'étude des harmoniques s'étend de 100Hz à 2500Hz. (C'est-à-dire des rangs 2 à 50).

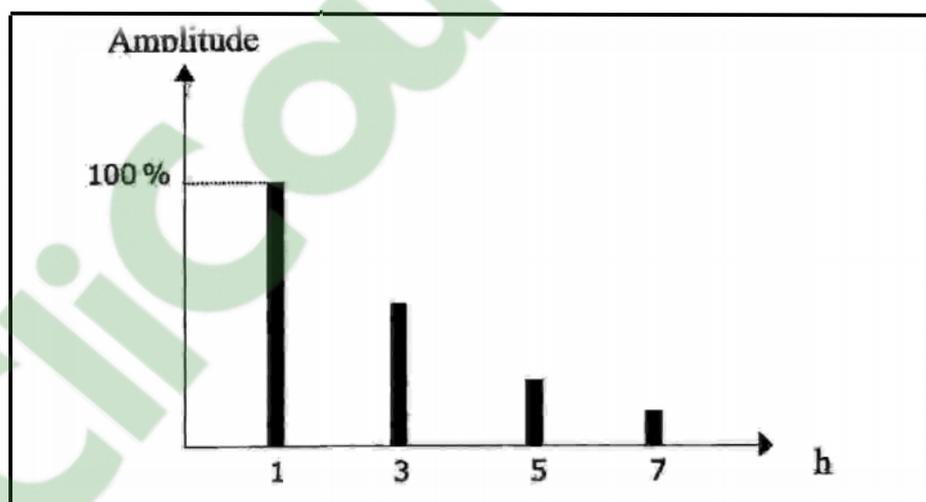


Figure 1.2 : Représentation spectrale d'un signal déformé.

1.2. Courants harmoniques : [4]

Les courants dans les réseaux électriques sont de type périodiques, mais pas toujours sinusoïdaux. Or, on sait qu'une onde périodique peut être décomposée en série de Fourier en une suite d'ondes sinusoïdales dont la fréquence est un multiple de la fréquence

fondamentale (en général 50 ou 60 Hz). La forme non sinusoïdale du courant provient de l'addition de la composante fondamentale et des composantes harmoniques.

En général, les harmoniques ne proviennent pas de l'alimentation mais du réseau client : les centrales électriques générant des tensions parfaitement sinusoïdales, les courants harmoniques sont dus à la présence d'une charge électrique non linéaire dans un réseau électrique.

On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale (typiquement à 50 Hz), elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal.

1.3 Tensions harmoniques : [4]

Le réseau présente une impédance qui est fonction de la fréquence. Le raccordement d'une charge non linéaire en un point du réseau revient à connecter une source de courants harmoniques à une impédance. Il en résulte l'apparition d'une tension aux bornes de cette impédance, c'est la loi d'Ohm qui s'applique aux fréquences harmoniques.

$$\mathbf{V}_h = \mathbf{Z}_h \mathbf{I}_h \quad (\text{I.10})$$

1.4 Puissances harmoniques : [5]

Puisque des courants et des tensions harmoniques existent simultanément sur le réseau, il circule une certaine puissance harmonique. Celle-ci peut transiter de la charge non-linéaire vers le réseau ou vice-versa.

1.5 Rang de l'harmonique : [6]

C'est le rapport de sa fréquence f_h à celle du fondamental généralement la fréquence individuelle 50 Hz ou 60 Hz.

$$\mathbf{h} = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I.11})$$

Le fondamental f_1 a le rang 1

1.6 Inter-harmoniques : [7]

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale. Elles sont émises par des charges non linéaires, ou par injection intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux.

1.7 Infra-harmoniques : [8]

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieurs 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.

1.8 Taux de distorsion harmonique : [3]

Chacun des harmoniques est caractérisé par une amplitude généralement exprimée en pourcentage de l'amplitude fondamental, c'est le taux d'harmoniques.

Les expressions utilisées pour quantifier la déformation d'un signal sont :

a) *Le taux de distorsion harmonique en courant*, noté TDH_i :

$$TDH_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{I.12})$$

b) *Le taux de distorsion harmonique en tension*, noté TDH_v :

$$TDH_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} \quad (\text{I.13})$$

c) *Le taux de distorsion harmonique individuel*, noté TDH_i (%) :

$$TDH_i(\%) = \frac{C_h}{C_1} 100 \quad (\text{I.14})$$

d) *Le taux de distorsion pondérés :*

Pour la spécificité de certains type de matériels (les condensations, les inductances, les moteurs.....), on utilise les taux de distorsion pondéré en tension D_w , et ils sont définis comme suit :

- *Pour les condensateurs*

$$D_{wc} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} h^2 u_h^2} \quad (\text{I.15})$$

Avec : $u_h = \frac{U_h}{u_1}$

Si I_c est le courant circulant dans le condensateur, I_{1c} son fondamental alors :

$$I_c = I_{1c} \sqrt{1 + D_{wc}^2} \quad (\text{I.16})$$

- *Pour les inductances :*

$$D_{wL} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (\text{I.17})$$

Si I_L est le courant circulant dans l'inductance, I_{1L} son fondamental alors :

$$I_L = I_{1L} \sqrt{1 + D_{wL}^2} \quad (\text{I.18})$$

- *Pour le moteur :*

$$D_{wM} = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h^2}{h}} \quad (\text{I.19})$$

Les coefficients cités précédemment nous permettent d'évaluer la nocivité d'un réseau sur la famille de matériels correspondants.

1.9. Foisonnement des phases : [8]

Lorsque plusieurs charges non linéaires fournissent des courants harmoniques de même rang, ceux-ci ne sont pas obligatoirement en phase. Ils s'additionnent donc vectoriellement.

1.10 Facteur de crête : [7]

Le facteur de crête est le rapport de la valeur de crête par la valeur efficace.

$$F_C = \frac{\text{Valeur maximale}}{\text{valeur efficace}}$$

$F_C > 6$ pour des ondes très déformées.

$$\text{Pour les tensions sinusoïdales : } F_C = \frac{\sqrt{2} V_{eff}}{V_{eff}} = \sqrt{2} = 1.41$$

1.11. Facteur de puissance : [9]

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active **P** et la puissance apparente **S**.

Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominal. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Pour faire intervenir la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous définissons la puissance déformante **D**, donné par la relation suivante:

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (\text{I.20})$$

Ainsi, la puissance apparente sera donné par :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.21})$$

Et le facteur de puissance par :

$$F = P/S \quad (\text{I.22})$$

I.12 .Facteur d'amplification ou facteur de qualité : [3]

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_{CC} et compensé par une batterie de condensateur de puissance Q_C provoquant une résonance.

Son expression approchée est :

$$F = \frac{\sqrt{Q_C S_{CC}}}{P} \frac{R}{L\omega} \quad (I.23)$$

2. Origines des harmoniques : [10]

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique du réseau électrique. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques au point de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

On distingue les charges non linéaires dans différents secteurs industriels :

- **De type secondaire :**

- Les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseurs, gradateurs.....) ;
- Les fours à induction, variateurs de vitesse ;

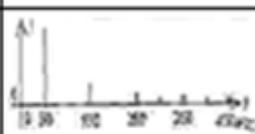
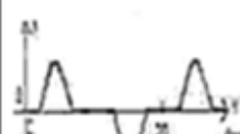
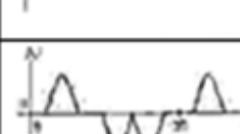
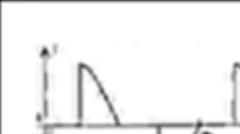
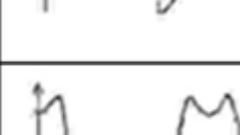
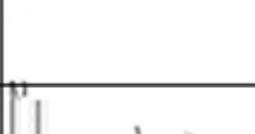
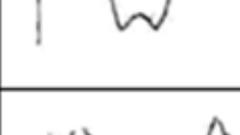
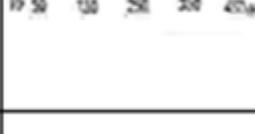
- **De type tertiaire :**

- Le développement de l'informatique, les climatisations ;
- Eclairage dans les bureaux ;
- Appareils de production, transport et distribution ;

- **Domestique :**

Les appareils domestiques sont dotés de composants électroniques favorisant ainsi la croissance des injections en courant harmonique avec leur large utilisation et surtout dans le temps (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre).

❖ *Allure typiques des courants harmoniques émis par les principaux équipements perturbateurs : [3]*

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

3. Effets des perturbations harmoniques : [11]

Les harmoniques circulant dans les réseaux détériorent la qualité de l'énergie, et sont ainsi à l'origine de nombreuses nuisances (surcharges, vibrations, vieillissement.....)

Dans l'ensemble on distingue deux types d'effets des harmoniques :

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 :

- Perturbation des systèmes de régulation et de synchronisation ;
- Réduction du facteur de puissance ;
- Dysfonctionnement des systèmes de mesure ;
- Dégradation de la classe de précision et erreurs de lecture de certains appareils de mesure et comptage ;
- Provocation de phénomènes de résonance et d'antirésonance ;
- Génération et induction de bruit et de vibrations acoustiques dans les appareils (Téléphone...);
- Dysfonctionnement des récepteurs de télécommande centralisée et un déclenchement intempestif des relais de protection ;

3.2 Les effets différés(ou effets à long terme) :

Ils sont essentiellement de nature thermique. Ils sont dus à deux phénomènes majeurs qui sont :

- L'échauffement des conducteurs et des composants traversés par les courants harmoniques
- Le vieillissement des isolants

Ces deux effets dégradent le rendement des équipements et diminuent leur durée de vie.

Introduction :

La propagation des harmoniques engendrés par les éléments non linéaires dans les réseaux électriques, dépend de la ligne de transport d'énergie, des impédances de transformateurs et des condensateurs, des charges linéaires connectées au réseau, et des charges non linéaires.

1. Réseau industriel : [12]

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.

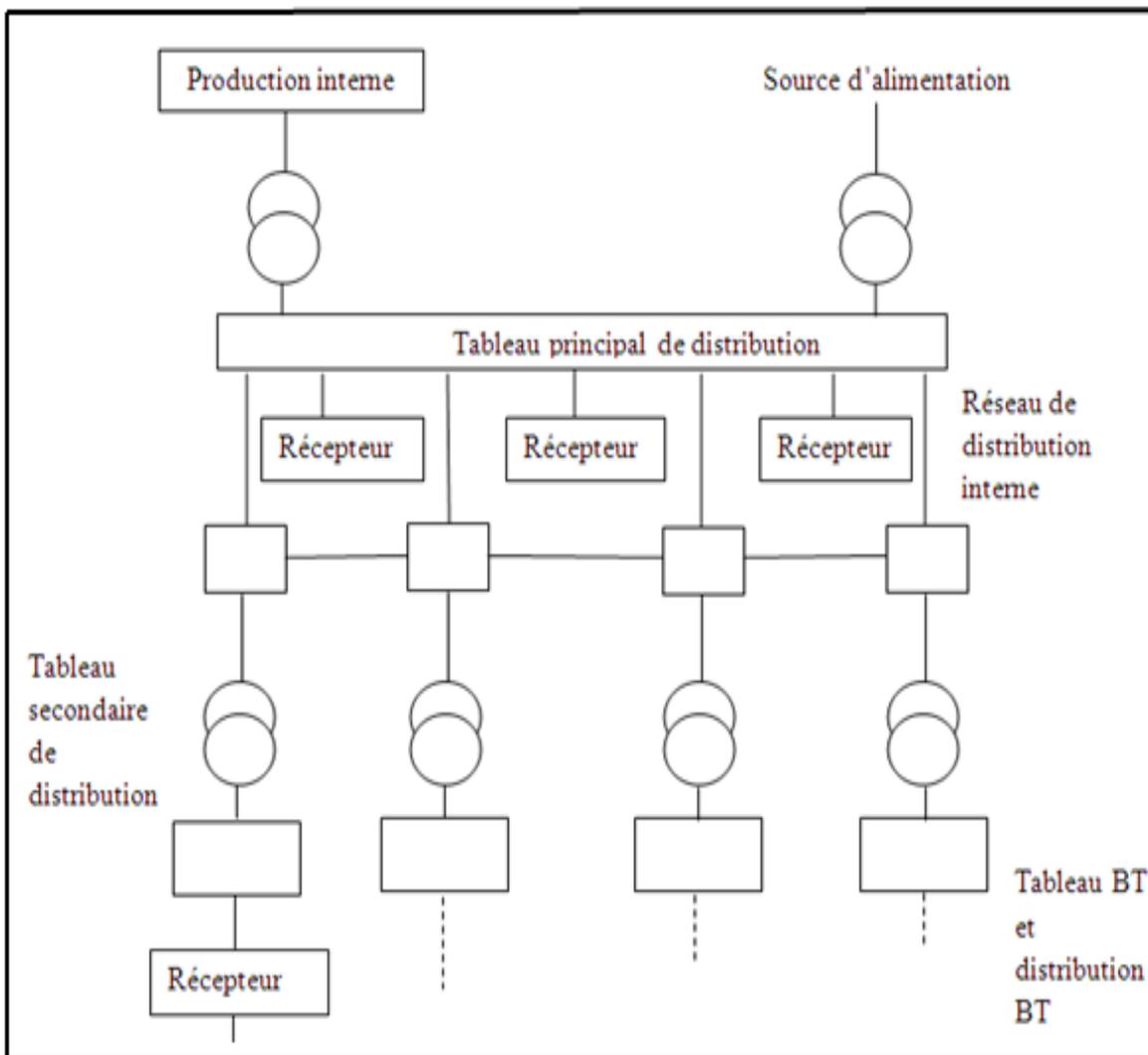


Figure II.1 : Structure générale d'un réseau de distribution

2. Condition de propagation des harmoniques sur le réseau : [3] [13]

Au point de raccordement, les tensions harmoniques qui se propagent sur le réseau de distribution dépendent en grande partie de l'impédance du réseau Z . Cette dernière est en fonction de la puissance de court circuit, de la puissance de la charge, mais aussi et surtout des condensateurs installés.

Avec l'augmentation de la puissance de court circuit, le facteur d'amplification décroît, donc les tensions harmoniques se propagent mieux en suivant la puissance de court circuit décroissante que dans le sens inverse, c'est à dire la transmission est meilleur si cette puissance est faible.

Et si la puissance du récepteur augmente, le facteur d'amplification diminue, donc un niveau de la charge élevé entraîne une atténuation plus importante de la perturbation.

Et avec la puissance de la batterie de compensation, le facteur d'amplification augmente
L'éloignement du poste source décroît le facteur d'amplification

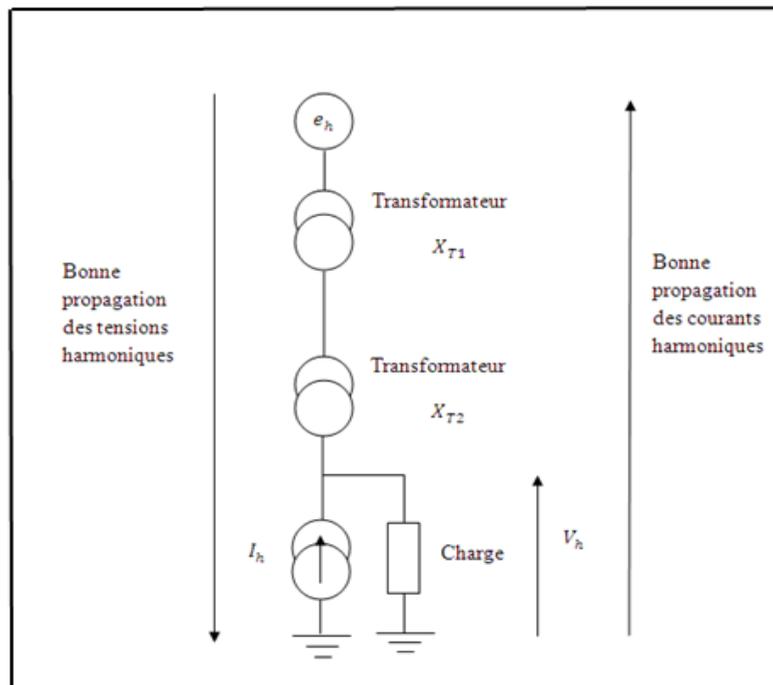


Figure II.2 Propagation des harmoniques

Les charges raccordées aux réseaux apportent une atténuation supplémentaires qui croit 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 :

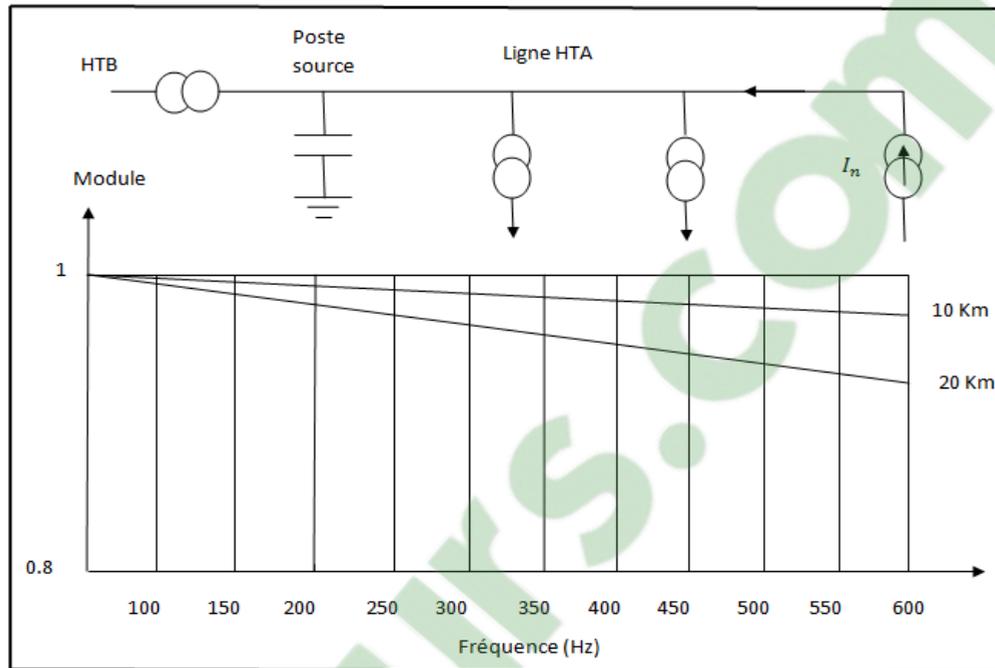


Figure II.3 : Atténuation du courant sur un réseau en fonction de la fréquence

Les courants émis à un bout de ligne sont légèrement atténués du fait des charges et des capacités des lignes.

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 ces 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.

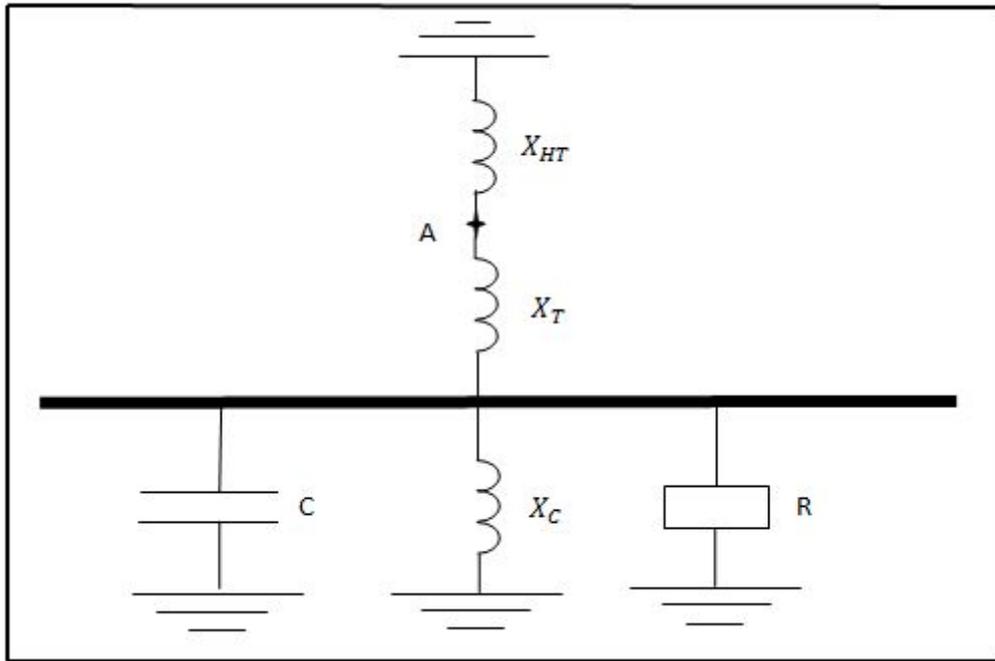


Figure II.4 : Exemple d'un réseau

Dans le schéma précédent, 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 des éléments en aval du réseau.
- b) Réseau amont : L'impédance équivalente ne tient compte que des éléments en amont du réseau.

❖ *Evaluation de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence : [8]*

Lorsque le réseau n'est pas compensé, l'impédance harmonique vue d'un sommet du réseau est linéaire en fonction de la fréquence.

Il y a essentiellement des éléments de nature inductive ou résistive. Par contre en présence des condensateurs, on a une large modification de la courbe d'impédance : Il y a principalement des éléments capacitifs comme l'explique le schéma suivant :

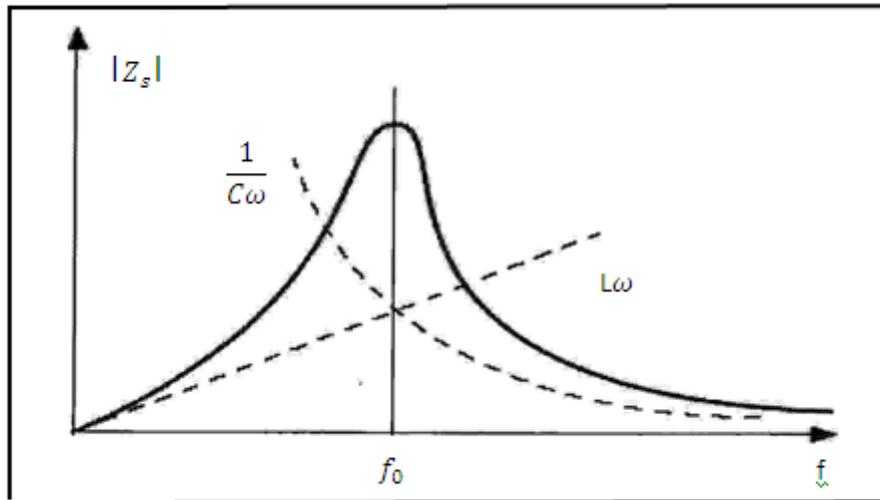


Figure II.5: Variation de l'impédance harmonique en fonction de la fréquence

❖ **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.

$$V_h \neq Z_s * I_h$$

❖ **L'installation des batteries de condensateur dans un réseau électrique :**

Ce sont des éléments capacitifs placés dans un réseau électrique pour la compensation de la puissance réactive.

Les condensateurs provoquent des résonances avec les impédances du réseau qui peuvent amplifier des tensions harmoniques de manière inacceptable.

Clicours.COM

4. Résonance : [13]

L'association des éléments capacitifs et inductifs sur le réseau, entraîne l'apparition d'un phénomène appelé : résonance, traduisant l'expression $LC\omega^2 = 1$

Il existe deux types de résonance selon que les éléments du réseau en résonance soient associés en parallèle ou en série.

4.1. La résonance parallèle :

Ce type de résonance peut être réalisé à partir du schéma suivant :

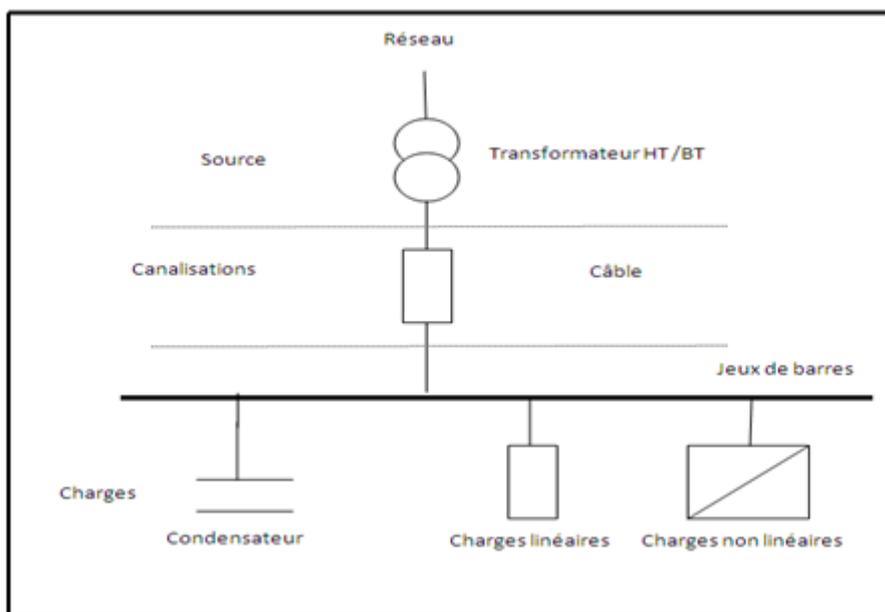


Figure II.6 : Représentation schématisée d'une installation électrique

Tel que l'impédance globale est :

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

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 :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (\text{II.2})$$

Ceci signifie, qu'en cas de résonance parallèle dans un réseau, on aura des surtensions harmoniques importantes. Ces tensions présentent au niveau du jeu de barres, contribuent à la déformation de l'onde de tension sinusoïdale (augmentation du taux de distorsion des harmoniques en tension) et peuvent nuire au fonctionnement des équipements raccordés sur ce même réseau électrique.

4.2. La résonance série :

De même, le schéma suivant, nous montre la résonance série :

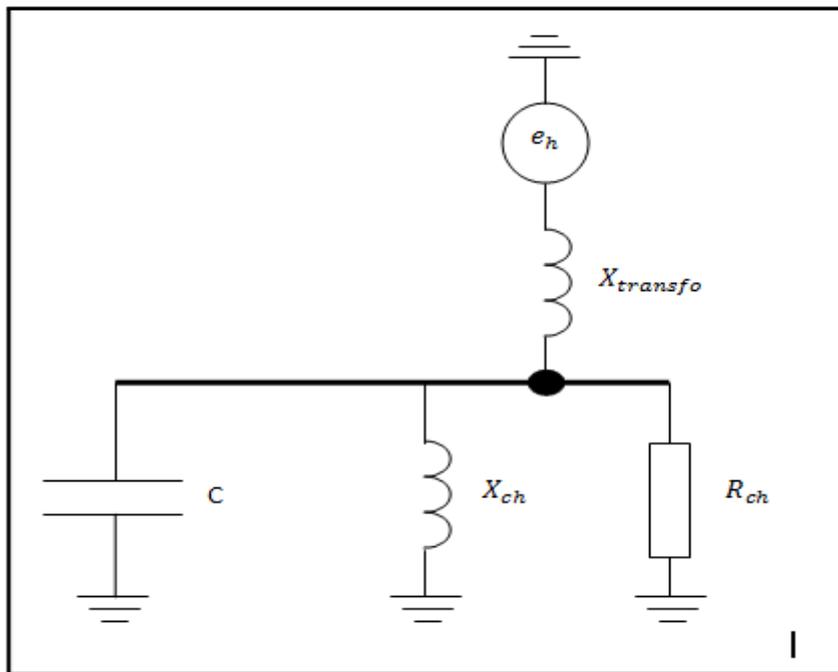


Figure II.7 : Schéma série d'une installation

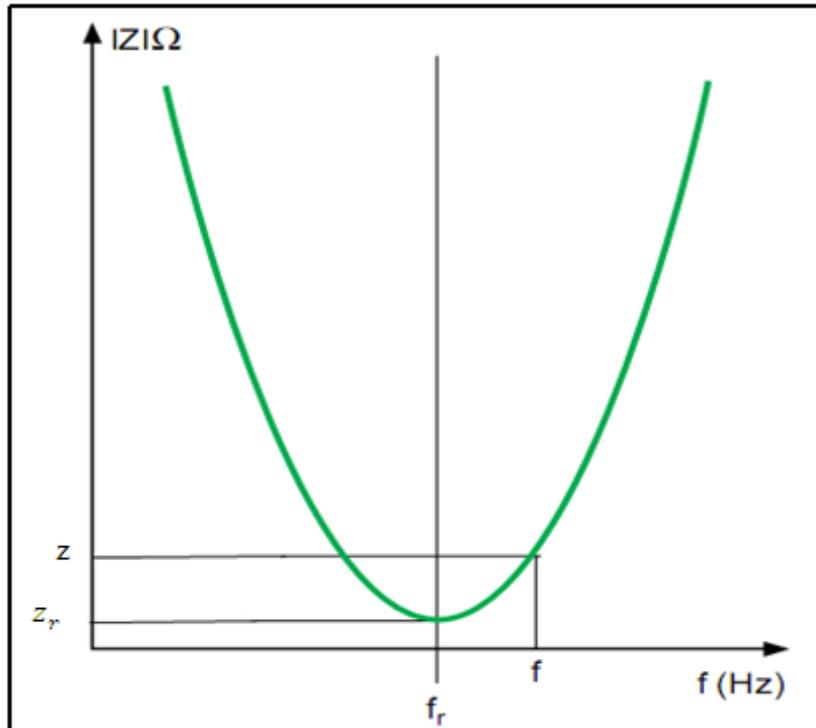
A partir des éléments L et C en série, l'impédance globale s'exprime par la relation suivante :

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

Il y a résonance lorsque le numérateur est égal à zéro. L'impédance est alors nulle. La fréquence de résonance est donnée par :

$$f_{r,s} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_s}} \quad (\text{II.4})$$

Ainsi, pour une fréquence particulière, le courant est uniquement limité par la faible résistance du circuit. Celle-ci étant généralement faible, la valeur du courant sera donc élevée



Z_r : Impédance de résonance.

f_r : Fréquence de résonance.

Z : Impédance en un point quelconque.

f : Fréquence en un point quelconque.

Figure II .8 : Impédance harmonique vue au primaire du transformateur-résonance série

Vu que la fréquence de résonance peut être connue à l'avance, il est possible d'éviter sa coïncidence avec les fréquences harmoniques qui sont présentes sur le réseau.

Et son calcul se fait de la manière suivante :

L'inductance globale du circuit amont s'obtient à partir de la puissance de court-circuit S_{cc} et la tension d'alimentation V suivant l'expression :

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{VV}{VI} = \frac{V^2}{S_{cc}} = L\omega \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Avec : } S_{cc} = \frac{S_{\text{Transformateur}}}{U_{cc}} \quad (\text{II.6})$$

Soit l'inductance :

$$L = \frac{V^2}{\omega S_{cc}} \quad (\text{II.7})$$

La puissance réactive des condensateurs :

$$Q = CV^2\omega \Rightarrow C = \frac{Q}{\omega V^2} \quad (\text{II.8})$$

La fréquence de résonance étant connue :

$$f_r = \frac{1}{2\pi LC} \quad (\text{II.9})$$

En remplaçant (II.7) et (II.8) dans (II.9), on aura :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{V^2 Q}{\omega S_{cc} \omega V^2}}} \quad (\text{II.10})$$

$$f_r = \frac{\omega}{2\pi \sqrt{\frac{Q}{S_{cc}}}} = \frac{\omega}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \quad (\text{II.11})$$

Et $\omega = 2\pi f$, on aura :

$$f_r = \frac{2\pi f}{2\pi} \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \quad (\text{II.12})$$

$$f_r = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \quad (\text{II.13})$$

Lorsque cette fréquence est très élevée, le risque de résonance est écarté.

5. Solution de filtrage : [11]

Pour palier au problème des perturbations dans un réseau, notamment à la pollution harmonique, il existe aujourd'hui plusieurs solutions qui peuvent être envisagées, parmi elles le filtrage passif et le filtrage actif.

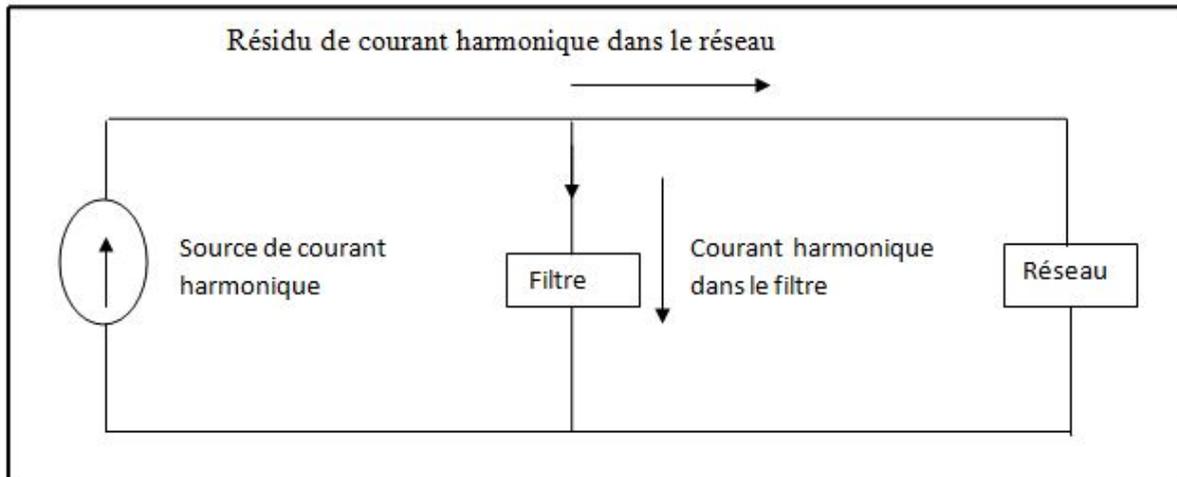


Figure II.9 : Mise en parallèle d'un filtre avec le réseau

5.1. Filtre passif :

❖ Principe :

Son principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et d'éliminer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire.

Une connaissance précise des rangs harmoniques qui doivent être filtrés et des atténuations requises est nécessaire pour la réalisation d'un filtre.

On distingue deux types de filtre assurant la limitation des tensions harmoniques.

- Filtré résonnant (filtre de type shunt)
- Filtré amorti

a- Filtré résonnant :

Le filtré résonnant est constitué d'une inductance L en série avec un condensateur C .

Les valeurs de l'inductance L et de la capacité C sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

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 :

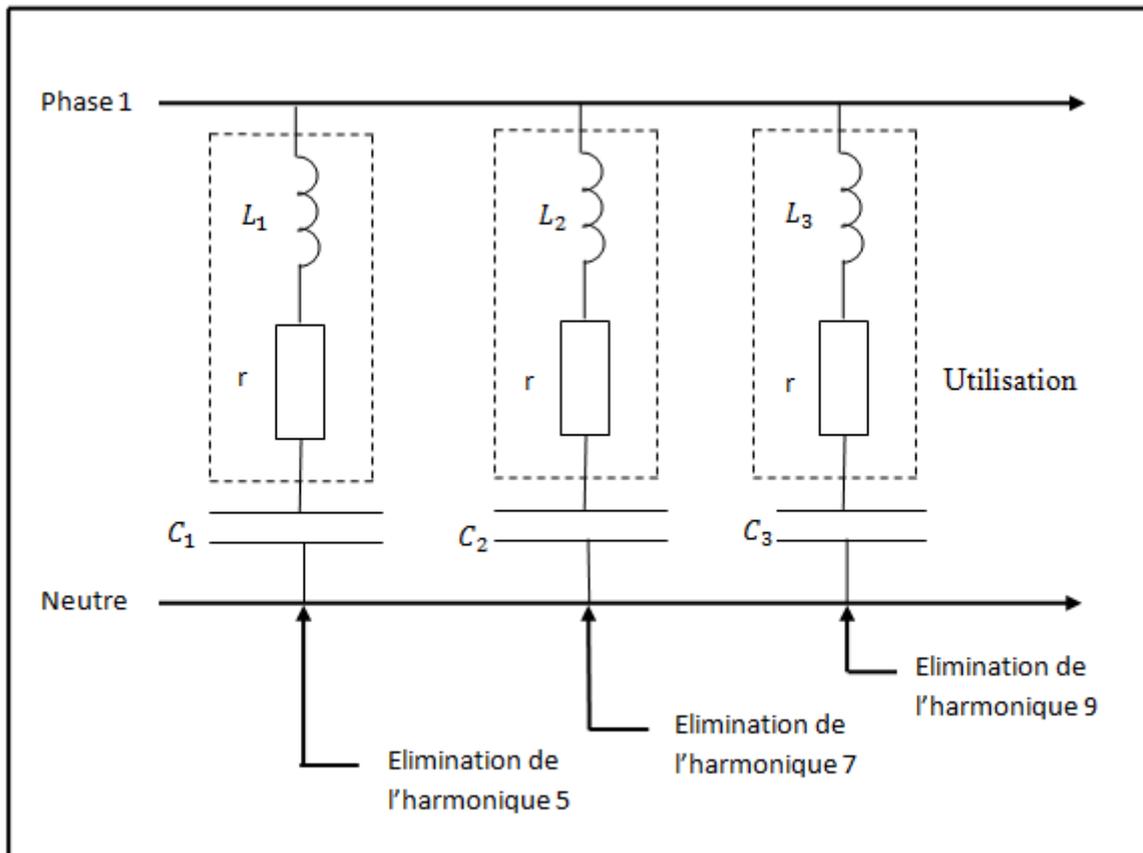


Figure II.10 :Filtre résonnant agissant sur plusieurs rangs harmoniques

Lorsque plusieurs shunts résonants sont installés, l'impédance équivalente du réseau a l'allure suivante :

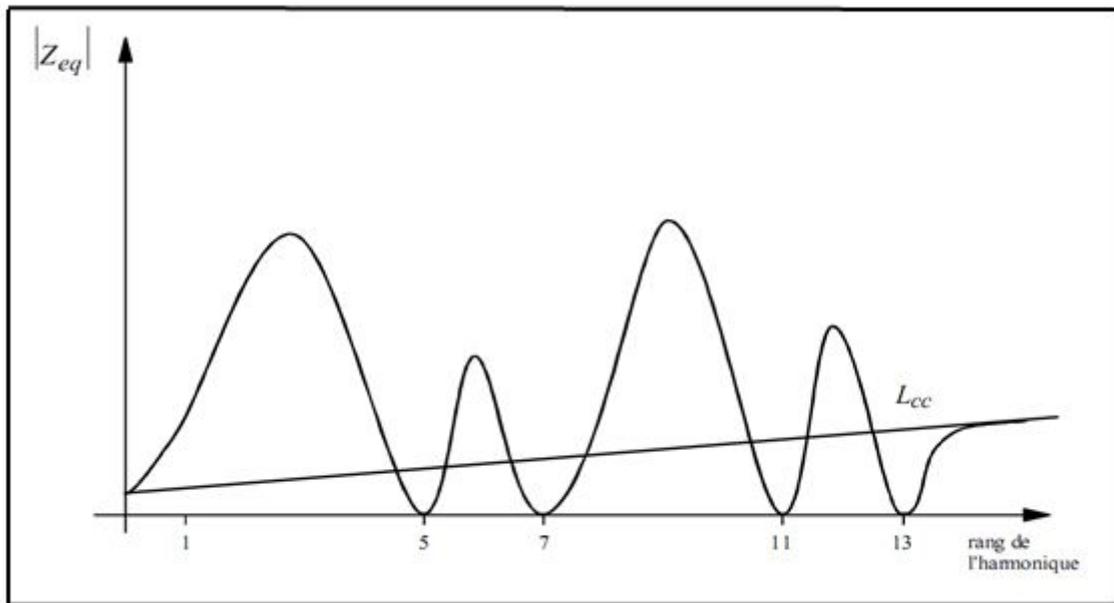


Figure II.11 : Spectre d'impédance du réseau lorsque plusieurs shunts résonants sont installés

Pour éviter d'éventuelles anti-résonances à l'enclenchement, il faut enclencher les shunts du rang le plus bas vers le rang plus élevé. Si on enclenche le rang 13 avant le rang 11, il y a risque d'anti-résonance sur le rang 11.

b- Filtre amorti : (filtre passe haut) :

Le filtre amorti est constitué d'une capacité C en série avec un ensemble composé de la mise en parallèle d'une inductance L et d'une résistance appelée « résistance d'amortissement », il est utilisé pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre, et non une fréquence particulière.

Ce filtre assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonnant, mais sans éliminer correctement ces perturbations, c'est-à-dire, il ne réalise pas la suppression de ces harmoniques, mais contribue à améliorer le taux de distorsion harmonique global d'une installation polluée.

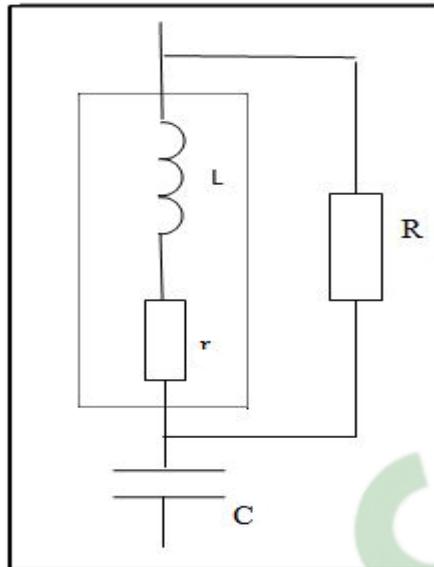


Figure II.12: Structure d'un filtre amorti

On a plusieurs filtres amortis :

➤ *Filtre en premier ordre :*

$$Z = \frac{R}{1+jC\omega} \quad (\text{II.14})$$

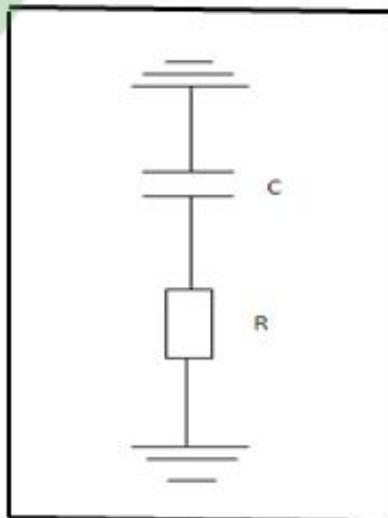


Figure II.13 : Filtre amorti du premier ordre

➤ *Filtre en deuxième ordre :*

$$Z = \frac{1}{jC\omega} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{jL\omega} \right)^{-1} \quad (\text{II.15})$$

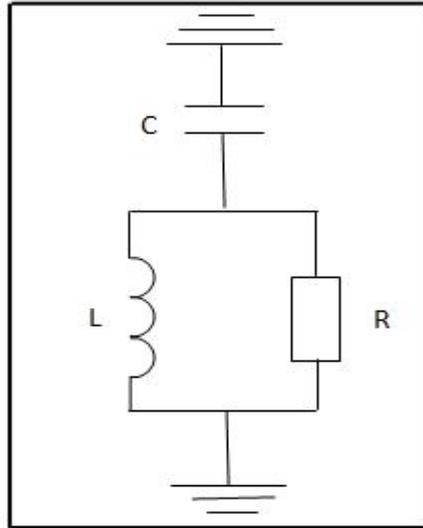


Figure II.14 : Filtre amorti du deuxième ordre

➤ *Filtre en troisième ordre :*

$$Z = \frac{1}{jC\omega} + \left[\frac{jRL\omega + \frac{L}{C_1}}{jC\omega + \left(R + \frac{1}{jC_1\omega} \right)} \right] \quad (\text{II.16})$$

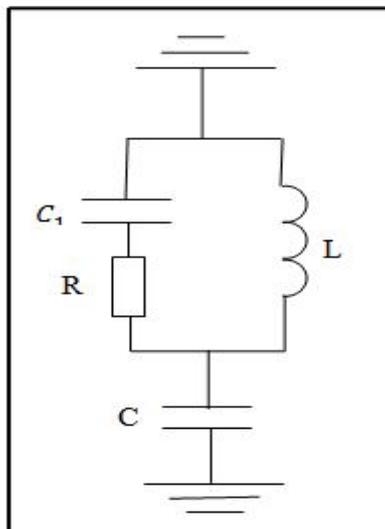


Figure II.15 : Filtre amorti du troisième ordre

➤ *Filtre en amorti type-C :*

$$Z = \frac{1}{jC\omega} + \left[\frac{jRL\omega}{jL\omega + (R(1 - LC_1\omega))} \right] \quad (\text{II.17})$$

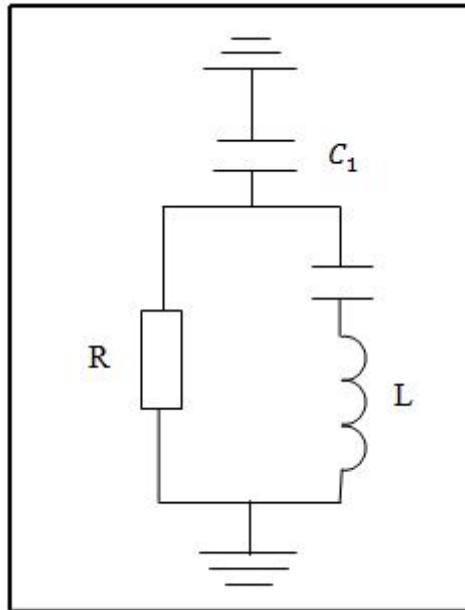


Figure II.16: Filtre amorti du type-C

On peut associer un filtre résonant et un filtre amorti dans certaines applications industrielles, mais cela peut provoquer entre eux la circulation des courants harmoniques très importants qui mènent rapidement à leur destruction.

Et aussi les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.

3. 2. Filtre actifs :

Un filtre actif compense les pertes dues aux perturbations présentes sur le réseau en injectant des courants harmoniques de même intensité mais en opposition de phase. Pour cela, il met en œuvre des convertisseurs de puissances asservis aux niveaux harmoniques mesurés sur le réseau. La commande d'un filtre actif s'adapte donc en permanence aux variations des harmoniques à compenser.

Il existe deux types de filtres actifs : les filtres séries et les filtres shunt (connectés en série ou en parallèle avec la charge polluante), leur fonction est de dépolluer respectivement la charge ou le réseau.

Ce dispositif ne nécessite pas la précaution particulière d'emploi, il se présente sous la forme de module à connecter. Les filtres actifs absorbent les courants harmoniques émis par les charges perturbatrices pour une gamme de fréquence qui varie avec la puissance du filtre.

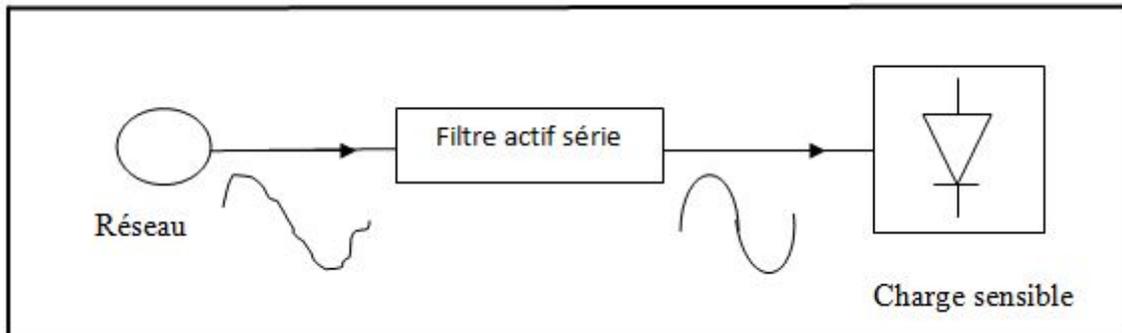


Figure II.17: Protection d'une charge sensible par filtrage de la tension

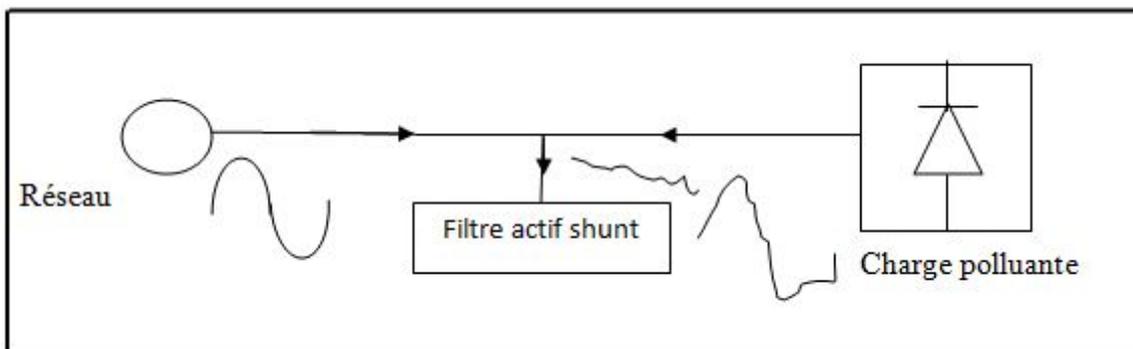


Figure II.18 : Protection du réseau par filtrage du courant

6. Modélisation des éléments du réseau en régime harmonique : [14]

On rencontre des problèmes de résonance et autres sur les réseaux industriels, pour cela on procède au calcul et à la visualisation des différentes grandeurs harmoniques tension, courant...etc. Le calcul peut être manuel si l'étude du réseau comporte peu d'éléments, dans le cas contraire, on a recours à des logiciels de simulation.

Dans le but de simuler notre réseau, nous avons besoin de modéliser les différents éléments du réseau, ainsi que les charges non linéaires connectées.

6.1 Modélisation d'un réseau amont :

Lorsqu'on étudie un 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 réactance X en série avec une résistance R .

✓ En régime normal :

$$L_{cc} = \frac{U_n^2}{\omega P_{cc}} \quad (H) \quad (II.18)$$

✓ En régime harmonique :

$$R_r(h) = \overline{h} R_r \quad (\Omega) \quad (II.19)$$

$$L_{cc}(h) = h \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (H) \quad (II.20)$$

P_{cc} : Puissance du court-circuit du réseau en (MVA)

U_n : Tension nominale en (kV)

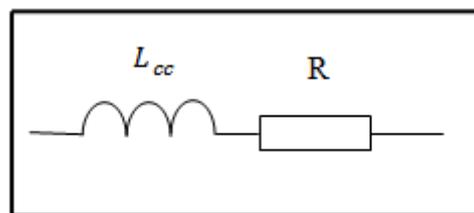


Figure II.19 : Modèle d'un réseau amont

6.2 Modélisation des transformateurs :

Les transformateurs sont modélisés en régime harmonique, par une inductance L_h en parallèle avec une résistance R_h , en série avec une résistance R_s .

✓ En régime normal :

$$R_s = \frac{1}{100} \frac{U_{n1}^2}{S_n} \quad (\Omega) \quad (\text{II .21})$$

$$R_h = \frac{20U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\Omega) \quad (\text{II .22})$$

$$L_h = \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (H) \quad (\text{II .23})$$

✓ En régime harmonique :

$$L_h = \frac{U_{cc}}{100} \frac{U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad h \quad (\text{II .24})$$

S_n : Puissance nominale du transformateur en (MVA)

U_{cc} : Tension du court-circuit en %

U_{n1} : Tension au primaire du transformateur en (kV)

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

X_h : Réactance de fuite ($X_h = L_h \omega$)

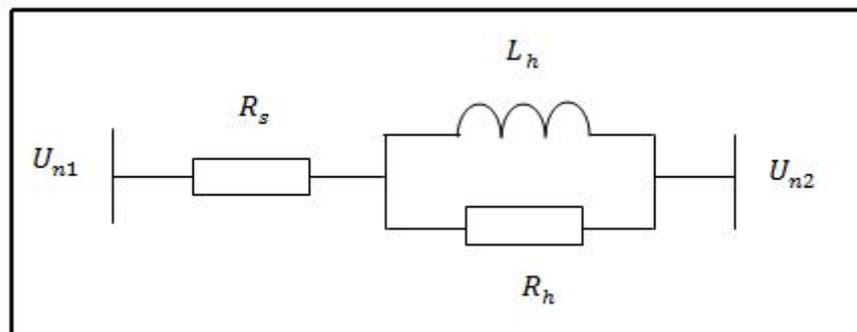


Figure II.20 : Modèle d'un transformateur

Remarque : Dans notre cas, nous avons pris directement le modèle du transformateur à partir de la boîte Power lib de MATLAB SIMULINK.

6.3 Modélisation des câbles et des lignes :

Pour les câbles ou les lignes, l'impédance équivalente pour ces deux ouvrages est modélisée par une représentation dite en « π ».

✓ En régime normal :

$$Z = (R_{lig} + jL_{lig}\omega)L \quad (\text{II .25})$$

$$Y = (j\omega C)L \quad (\text{II .26})$$

✓ En régime harmonique :

$$Z(h) = (R_{lig} + jh\omega_0 L_{lig})L \quad (\text{II .27})$$

$$Y(h) = (j\omega_0 C h)L \quad (\text{II .28})$$

R_{lig} : Résistance linéique en (Ω/km)

L_{lig} : Inductance linéique en (m H/km)

Q_c : Demi-pertes latérales capacitives en (krav/km)

L : Longueur en (km)

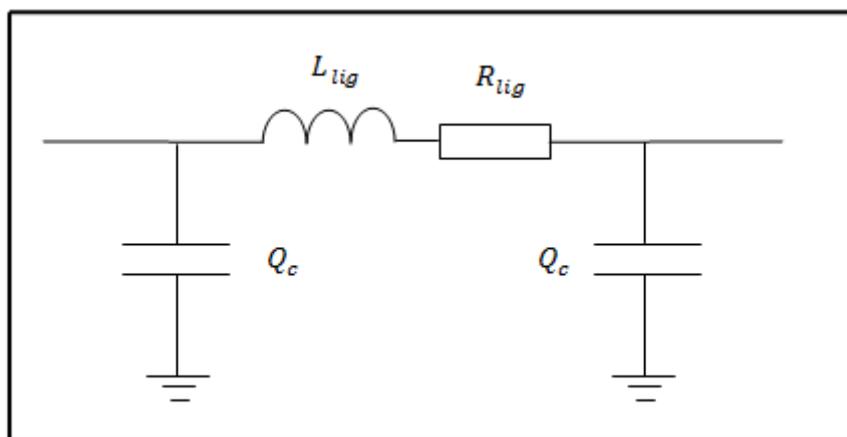


Figure II.21 : modèle d'un câble ou d'une ligne aérienne

6.4 Modélisation d'une charge linéaire : [14]

Trois modèles des charges non perturbatrices sont proposés :

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

✓ En régime normal :

$$R_m = \frac{U_n^2}{\left(1 + \frac{Q^2}{P^2}\right)P} \quad (\Omega) \quad (II.29)$$

$$L_m = \frac{U_n^2}{\omega \left(1 + \frac{P^2}{Q^2}\right)Q} \quad (H) \quad (II.30)$$

✓ En régime harmonique :

$$R_m = h \frac{U_n^2}{\left(1 + \frac{Q^2}{P^2}\right)P} \quad () \quad (II.31)$$

$$L_m = h \frac{U_n^2}{\omega \left(1 + \frac{P^2}{Q^2}\right)Q} \quad (H) \quad (II.32)$$

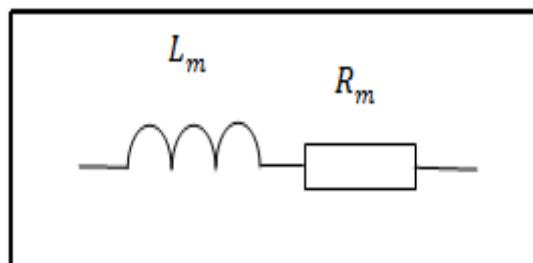


Figure II.22: modèle d'un moteur

2. Les modèles CIGRE : Une résistance et une réactance X_s en série et placé en parallèle avec une réactance X_h .

CIGRE : Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à haute tension.

✓ En régime normal :

$$R_s = \frac{U_n^2}{P} \quad (\Omega) \quad (\text{II .33})$$

$$X_s = 0.073 R \quad (\Omega) \quad (\text{II .34})$$

$$X_h = \frac{R_s}{6.7 \tan\varphi - 0.74} \quad (\Omega) \quad (\text{II .35})$$

✓ En régime harmonique :

$$X_s = 0.073 R h \quad (\Omega) \quad (\text{II .36})$$

$$X_h = \frac{R}{6.7 \tan\varphi - 0.74} h \quad (\Omega) \quad (\text{II .37})$$

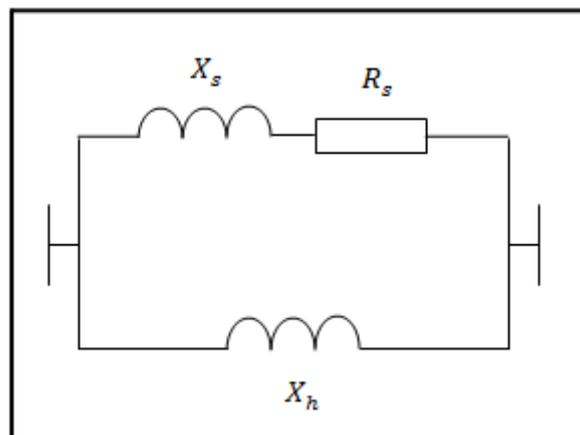


Figure II.23 : modèle de CIGRE

3. Une résistance en parallèle avec une inductance.

✓ En régime normal :

$$R_h = \frac{U_n^2}{P} \quad (\Omega) \quad (\text{II .38})$$

$$X_h = \frac{U_n^2}{Q} \quad (\Omega) \quad (\text{II .39})$$

✓ En régime harmonique :

$$R_h = \frac{U_n^2}{P} \quad (\Omega) \quad (\text{II .40})$$

$$X_h = h \frac{U_n^2}{Q} \quad (\Omega) \quad (\text{II .41})$$

P : Puissance active de la charge en (MW)

Q : Puissance réactive de la charge en (MVar)

U_n : Tension nominale du réseau en (kV)

S_n : Puissance nominale en (MVA)

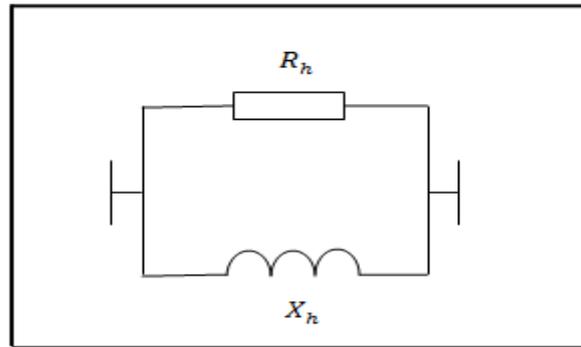


Figure II.24 : Modèle d'une résistance en parallèle avec une inductance

6.5 Modélisation d'une charge perturbatrice :

On peut les modéliser en redresseur triphasé en pont de Graetz comme suit :

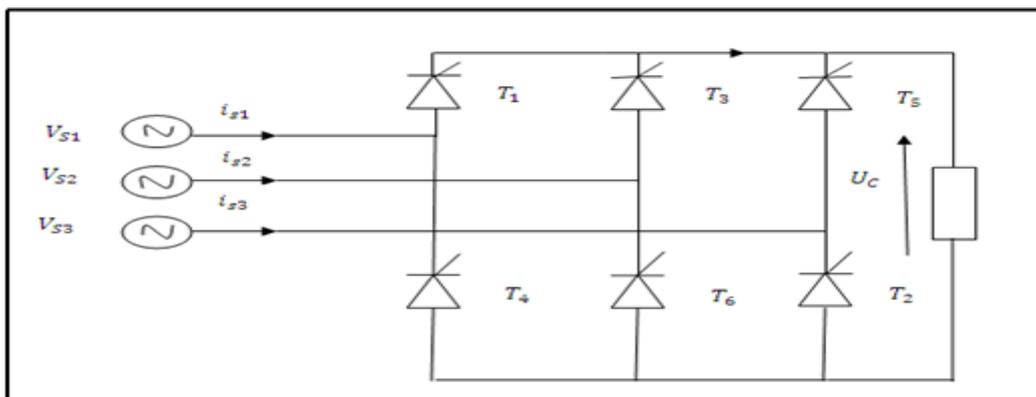


Figure II. 25 : Schéma simplifié d'un redresseur triphasé en pont de Graetz

Chaque thyristor conduit pendant un temps $T/3$. (T : la période du courant I_s)

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

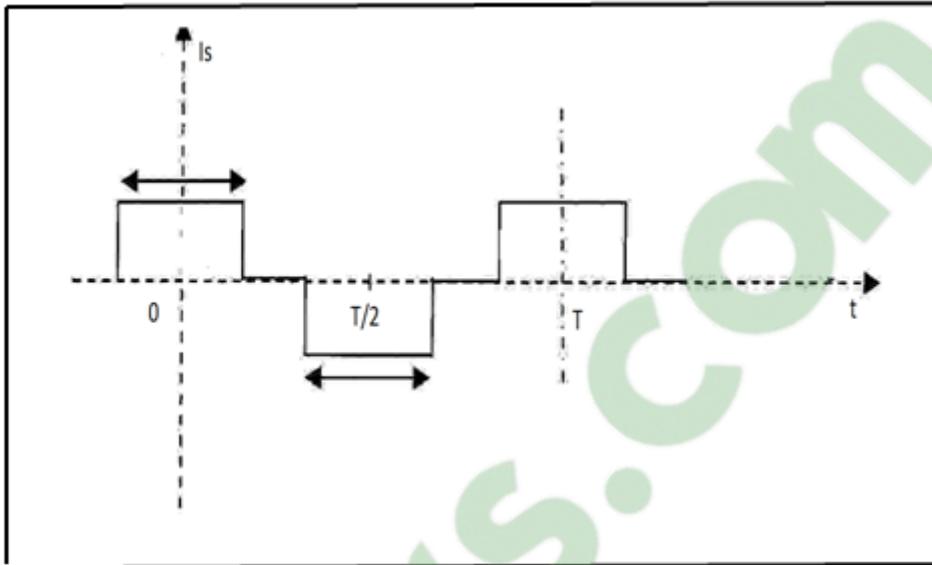


Figure II.26 : Allure du courant dans une phase du réseau

Pour les applications de forte puissance ; le montage majoritairement rencontré est le montage dodécaphasé suivant :

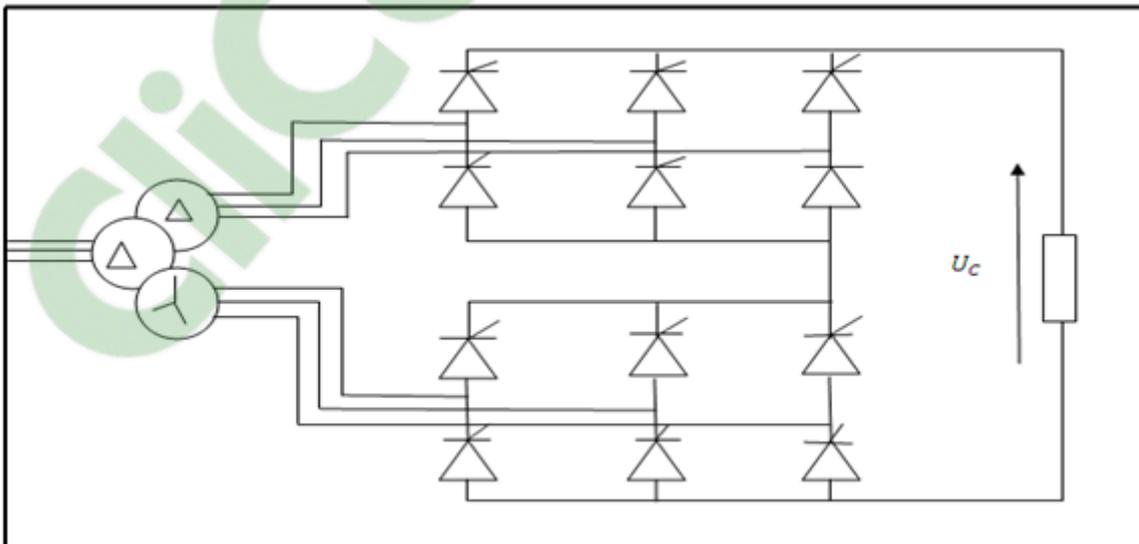


Figure II .27 : Montage dodécaphasé

Ce montage présente l'avantage de diminuer considérablement les harmoniques des rangs 5, 7, 17, 19 ...etc., et les rangs présent dans le spectre d'émission sont de la forme :

$$h = (12k \pm 1)$$

6.6 Modélisation d'une batterie de condensateur :

La batterie de condensateur est modélisée par une réactance X_C

✓ En régime normal :

$$C = \frac{Q_c}{\omega U_n^2} \quad (\mu F) \quad (\text{II .42})$$

✓ En régime harmonique :

$$C = \frac{Q_c}{\omega U_n^2 h} \quad (\mu F) \quad (\text{II .43})$$

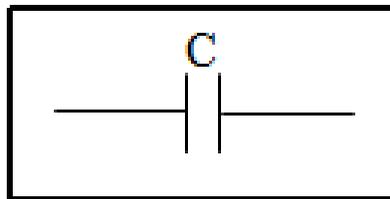


Figure II.28 : Modèle d'un condensateur

7. Normes en vigueur : [8]

Les émissions de courants harmoniques créent des perturbations de l'alimentation (tensions harmoniques).

Les normes doivent donc limiter les émissions de courants harmoniques des appareils et des utilisateurs afin de maintenir un niveau de compatibilité électromagnétique (tensions harmoniques) convenable.

Le distributeur doit quant à lui fournir une alimentation avec une impédance de court circuit suffisamment faible afin de ne pas générer des tensions harmoniques trop importantes.

Il faut donc déterminer un compromis entre l'amélioration du niveau d'émission et d'immunité des récepteurs et l'amélioration du réseau de distributeur.

La norme CEI 61000-2-4 définit les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques et inter harmoniques sur les réseaux industriels.

Harmoniques impairs non Multiple de 3				Harmoniques impairs Multiples de 3				Harmoniques pairs			
Rang harmonique h	Tension harmonique %			Rang harmonique h	Tension harmonique %			Rang harmonique h	Tension harmonique %		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3		Classe 1	Classe 2	Classe 3		Classe 1	Classe 2	Classe 3
5	3	6	8	3	3	5	6	2	2	2	3
7	3	5	7	9	1.5	1.5	2.5	4	1	1	1.5
11	3	3.5	5	15	0.3	0.3	2	6	0.5	0.5	1
13	3	3	4.5	21	0.2	0.2	1.75	8	0.5	0.5	1
17	2	2	4	>21	0.2	0.2	1	10	0.5	0.5	1
19	1.5	1.5	4					>10	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5								
25	1.5	1.5	3.5								
>25	$2 + \frac{12.5}{h}$	$2 + \frac{12.5}{h}$	$5 \sqrt{\frac{11}{h}}$								
Taux global de distorsion											
5% pour classe 1			8% pour classe 2			10% pour classe 3					

Tableau II.1 : Tableau de la norme CEI61000-2-4

Classe 1 : cette classe s’applique aux réseaux protégés, elle est à des niveaux de compatibilité plus bas que ceux des réseaux publics. Elle se rapporte à l’utilisation d’appareils très sensibles aux perturbations du réseau de puissance, par exemple instrumentations de laboratoires technologiques, certains équipements d’automatisation et de protection, certains ordinateurs ...etc.

Elle contient normalement des équipements qui nécessitent d’être alimentés par une alimentation sans interruption. Elle s’applique seulement pour des réseaux basse tension.

Classe 2 : elle s’applique au point de livraison du distributeur et au réseau interne. Les niveaux de compatibilité sont identiques à ceux des réseaux publics.

Classe 3 : elle s’applique seulement au réseau interne. Les niveaux de compatibilités sont supérieurs à ceux de la classe 2.

Introduction :

Un réseau test de 13 nœuds a été choisi pour calculer la distorsion harmonique causé par la présence de variateurs de vitesse à base d'électronique de puissance.

Le réseau est alimenté à partir d'un poste 69 kV et représenté par un schéma unifilaire.

Les branches capacitives des lignes et des câbles sont négligées.

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 POWER LIB.

MATLAB SIMULINK 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 barres...etc.

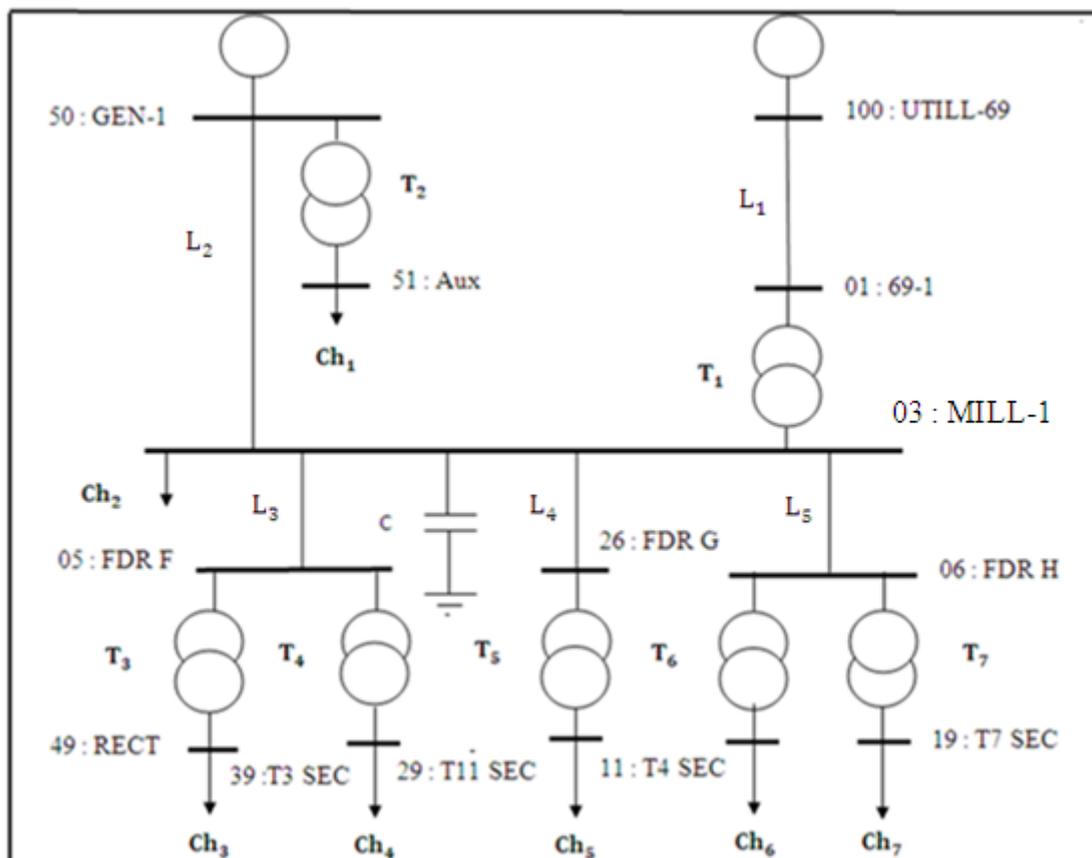
1. Représentation du réseau test : [1]

Figure III .1 Réseau étudié

2. Paramètres du réseau : [1]

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 :

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

$$R = \frac{X}{22.2} = \frac{4.761}{22.2} = 0,214 \Omega$$

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

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

2.3 Impédance des lignes et câbles :

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

lignes	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
R (pu)	0.00139	0.00122	0.00075	0.00157	0.00109
X (pu)	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	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
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

2.4 Transformateurs : [1]

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	2.4
Tap	69	13.45	13.45	13.11	13.45	13.8	13.11
S (k VA)	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	5.9537	5.6831	5.4360	5.4810

Tableau III.3 : Données des transformateurs

Nous remarquons que les transformateurs sont munis de prises pour le réglage de la tension (Tap).

2.5 Données aux nœuds : [1]

Jeux de barres	V _{mag} (pu)	δ (Degré)	P _{gen} (kW)	Q _{gen} (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 : T3 SEC	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)

2.6 Compensation :

La puissance réactive fournie est de 6000 kVar au nœud 03 : MILL-1.

2.7 Source polluante : [1]

Le variateur de vitesse pour moteur connecté au nœud (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 :

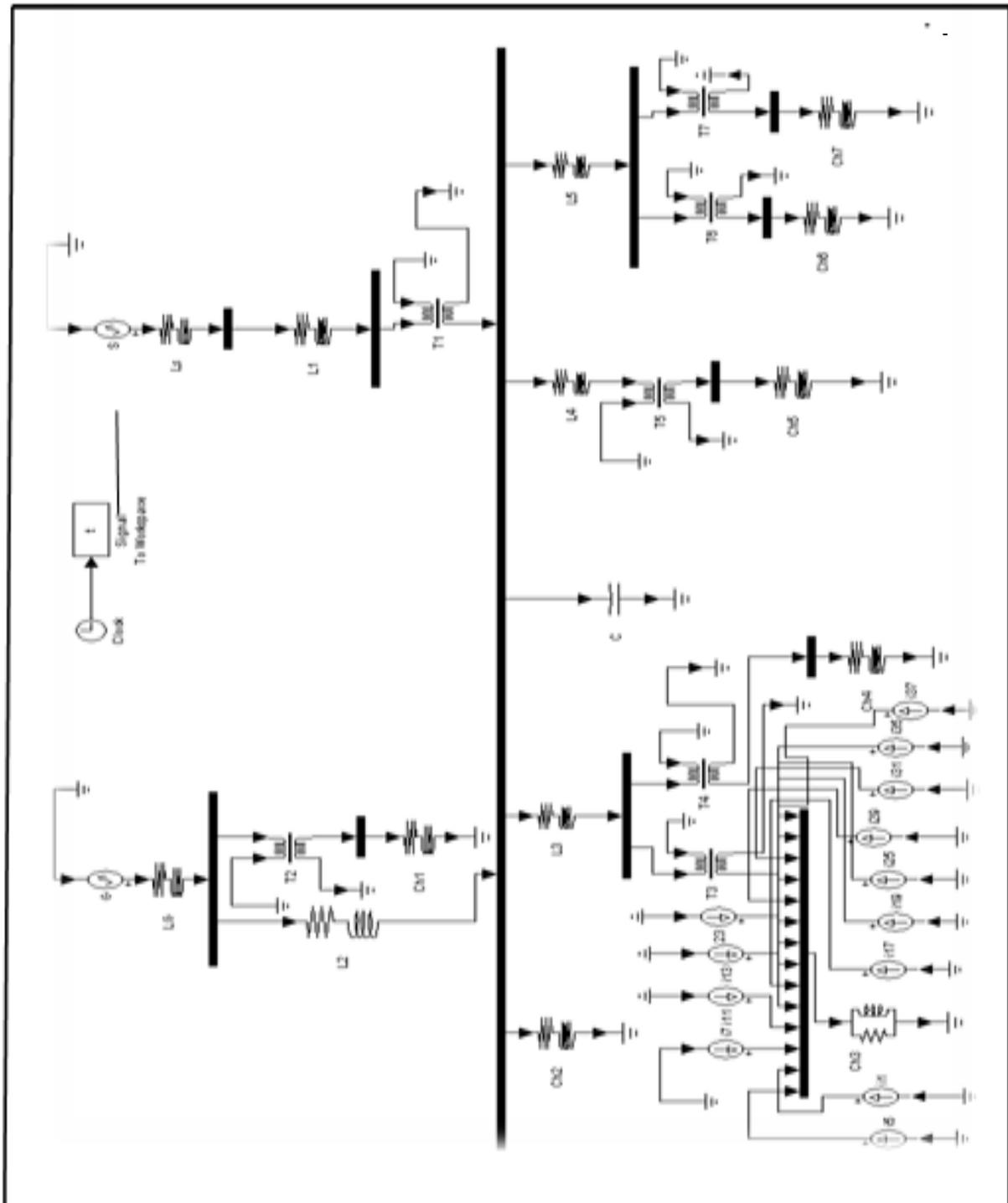
Rang harmonique	I_h (%)	Angle relatif (Degrés)
1	100.00	00.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

Tableau III.5 : Données de la source d'harmoniques

3. Résultats de simulation :

Le schéma du réseau sous MATLAB SIMULINK est donné par la figure ci-dessous :

3.1 Représentation du réseau sous MATLAB SIMULINK



3.2 Taux de distorsion harmonique en tension aux nœuds :

Numéro du jeu de barres	Jeux de barres	$V_1 (V_{LN})$	$TDH_V(\%)$
1	100 : UTIL-69	39562.62	0.80
2	01 :69-1	39555.55	0.81
3	03 : MILL-1	7813.52	3.32
4	50 : GEN-1	7848.88	2.48
5	51 : Aux	260.21	2.39
6	05 : FDR F	7806.45	3.30
7	49 : RECT	261.34	8.95
8	39 : T3 SEC	2152.43	3.07
9	26 : FDR G	7806.45	3.32
10	06 : FDR H	7799.38	3.32
11	11 : T4 SEC	263.46	3.25
12	19 : T7 SEC	1252.99	3.11
13	29 : T11 SEC	252.79	3.18

Tableau III .6 : Tableau donnant les tensions et les taux de distorsion aux différents jeux de barres

Les résultats donnés par la référence [1] sont les suivants :

Jeux de barres	$V_1(V_{LN})$	$V_5(V_{LN})$	$V_7(V_{LN})$	$TDH_V(\%)$
100: UTIL -69	39645.70	40.37	104.23	0.28
01 :69-1	39538.00	52.36	135.14	0.37
03: MILL -1	7712.77	53.51	138.13	1.93
50: GEN – 1	7726.55	51.72	13351	1.87
51: AUX	262.74	1.72	4.40	1.81
05: FDR F	7709.24	54.07	138.35	1.94
49: RECT	269.89	12.79	12.83	8.02
39 :T3 SEC	2240.05	14.83	37.21	1.80
26: FDR G	7709.07	53.48	138.04	1.93
06: FDR H	7703.35	53.43	137.91	1.93
11 :T4 SEC	260.40	1.78	4.59	1.90
19 :T7 SEC	1302.74	8.58	21.78	1.81
29 :T11SEC	256.29	1.71	4.36	1.84

Tableau III .7 : Résultats donnés par la référence [1]

➤ **Interprétation des résultats :**

Nous constatons que les résultats trouvés sont assez proches de ceux publiés dans la référence [1].

Cette légère différence des résultats est due à l'utilisation de modèles différents notamment pour les transformateurs où nous avons tenu 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.

La distorsion harmonique de la tension est assez importante au niveau du jeu de barres pollueur 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.

3.3 Formes d'ondes et spectres des signaux tension et courant :

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

a) **Les tensions :**

- **Jeu de barres (100 : UTIL-69) :**

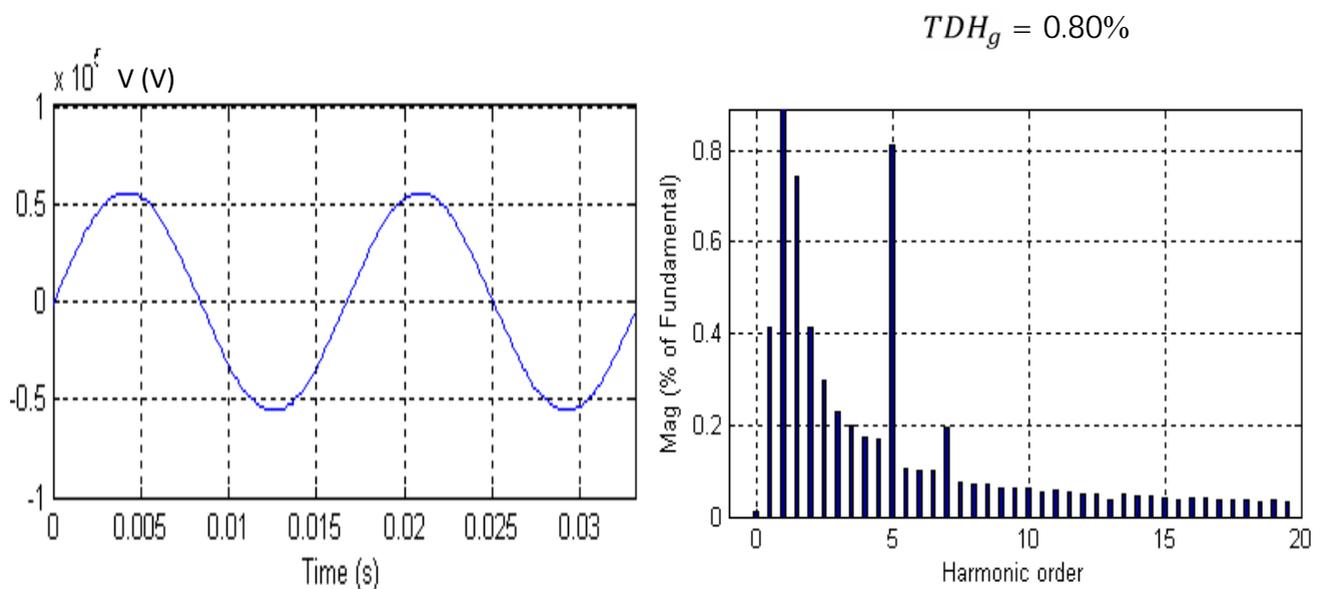


Figure III.2 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (100-UTIL-69)

- **Jeu de barres (03 : MILL-1) :**

$$TDH_g = 3.32\%$$

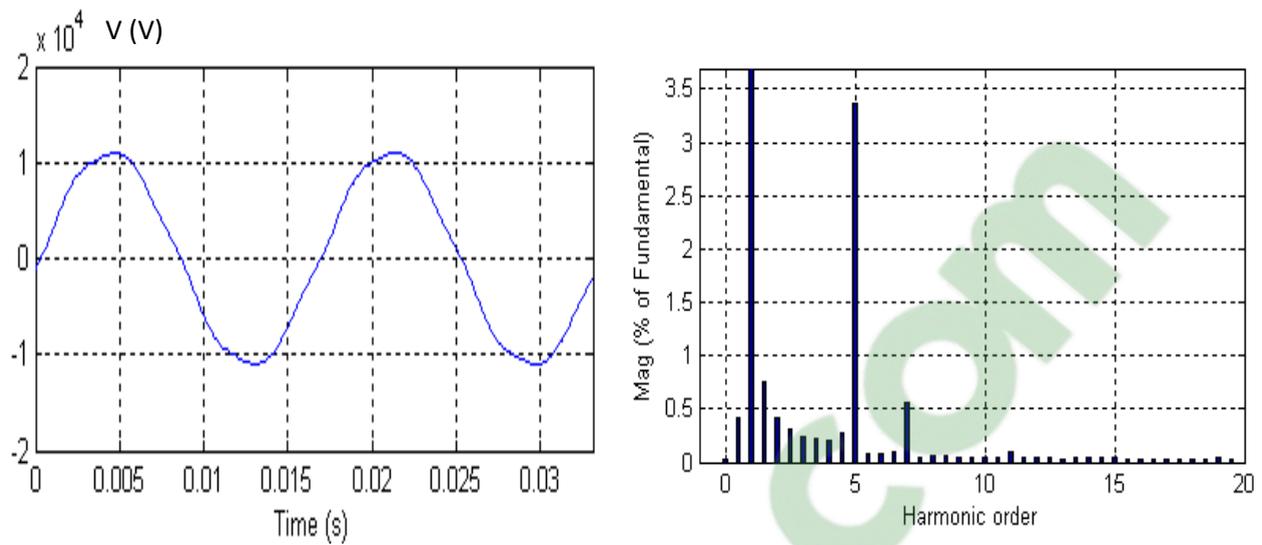


Figure III.3 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (03-MILL-1)

- **Jeu de barres (50 : GEN-1) :**

$$TDH_g = 2.48\%$$

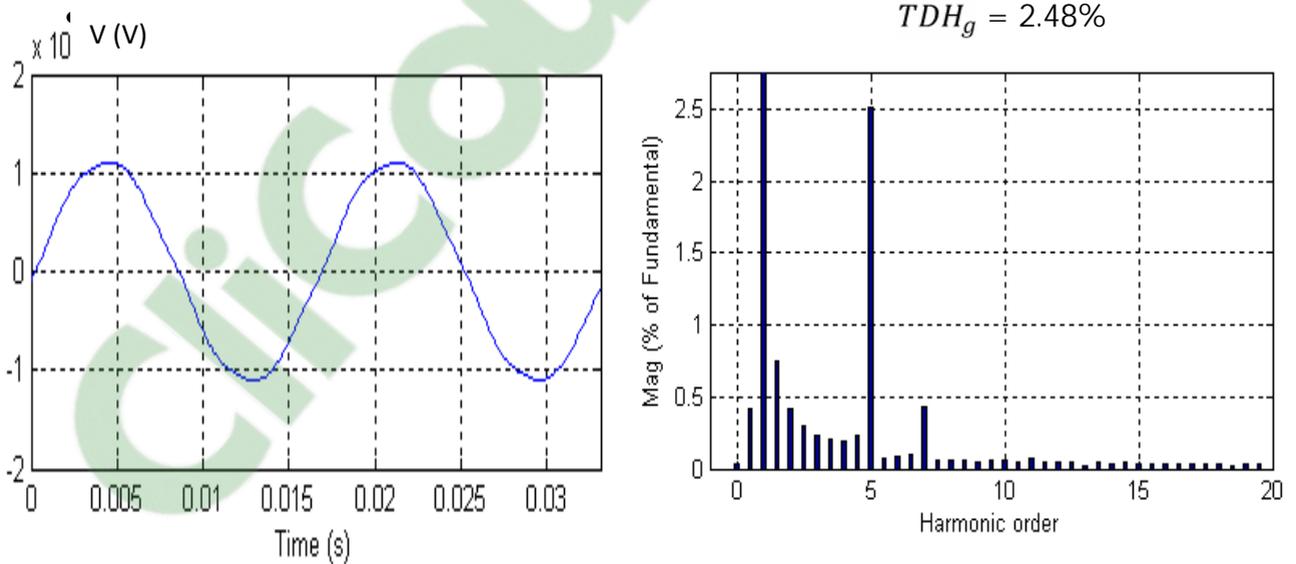


Figure III.4 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (50 : GEN-1)

- **Jeu de barres (05 : FDR F) :**

$$TDH_g = 3.30\%$$

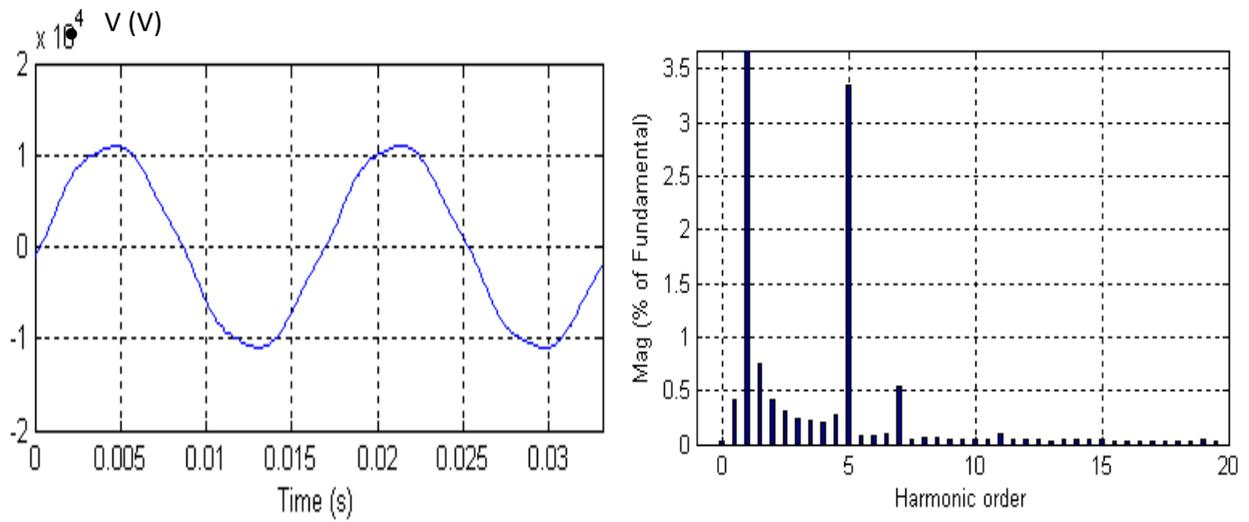


Figure III.5 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (05 : FDR F)

- **Jeu de barres (49 : RECT) :**

$$TDH_g = 8.95\%$$

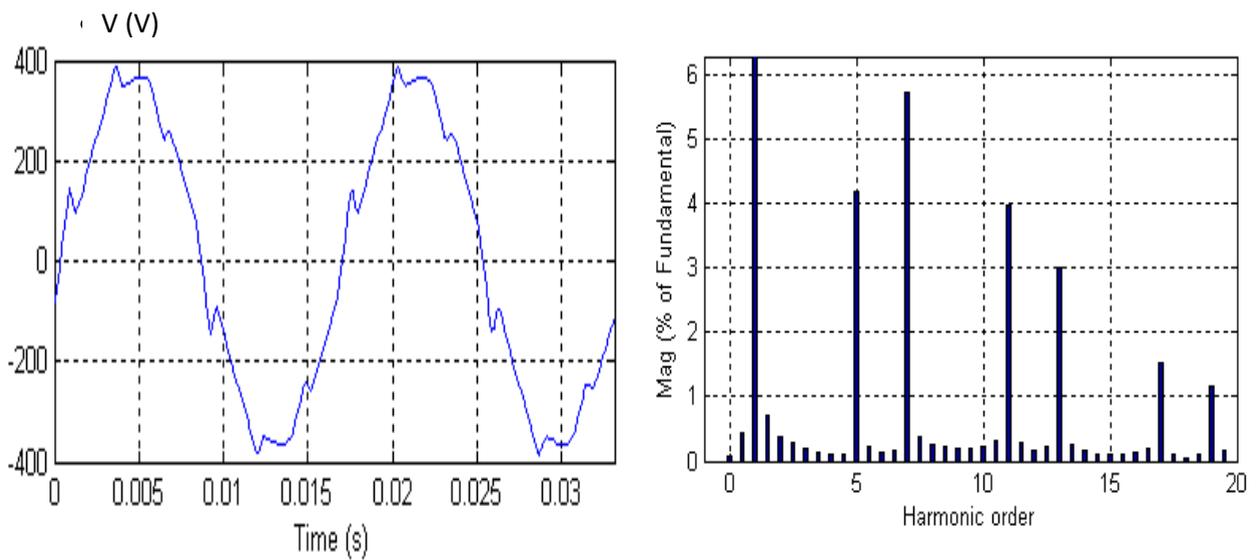


Figure III.6 : Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (49 : RECT)

- **Jeu de barres (19 : T7 SEC) :**

$$TDH_g = 3.11\%$$

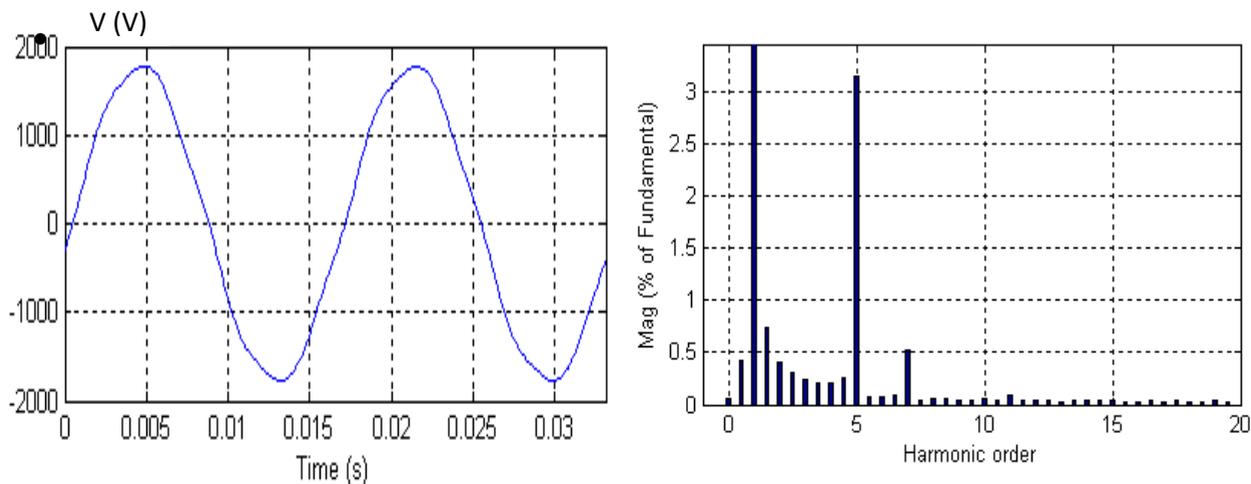


Figure III.7: Forme d'onde et spectre de la tension au jeu de barres (19 : T7 SEC)

➤ **Commentaires :**

D'après les spectres harmoniques des tensions tracés dans les figures précédentes, nous remarquons la prépondérance du rang 5 dans tous les jeux de barres, sauf au nœud pollueur.

L'amplification du rang harmonique 5 et l'atténuation du rang 7 peut s'expliquer par les valeurs de l'impédance harmonique du réseau, qui sera tracée dans la suite de notre travail.

b) Les courants :

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

- **Charge Ch₃ :**

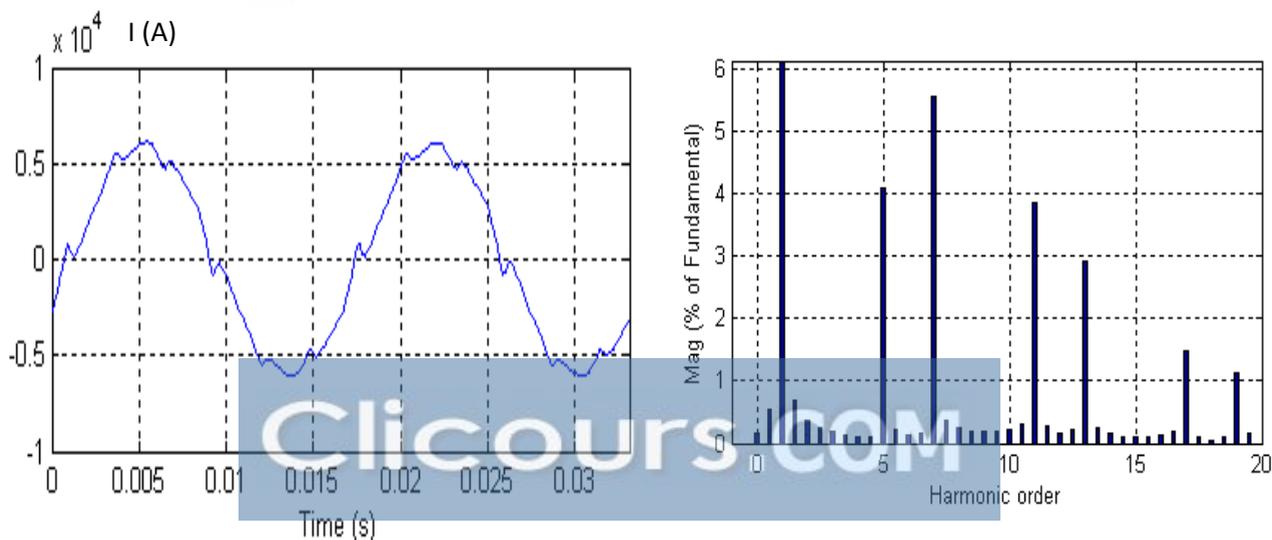


Figure III.8 : Forme d'onde et spectre du courant consommé la charge Ch_3

- **Primaire du transformateur T_3 :**

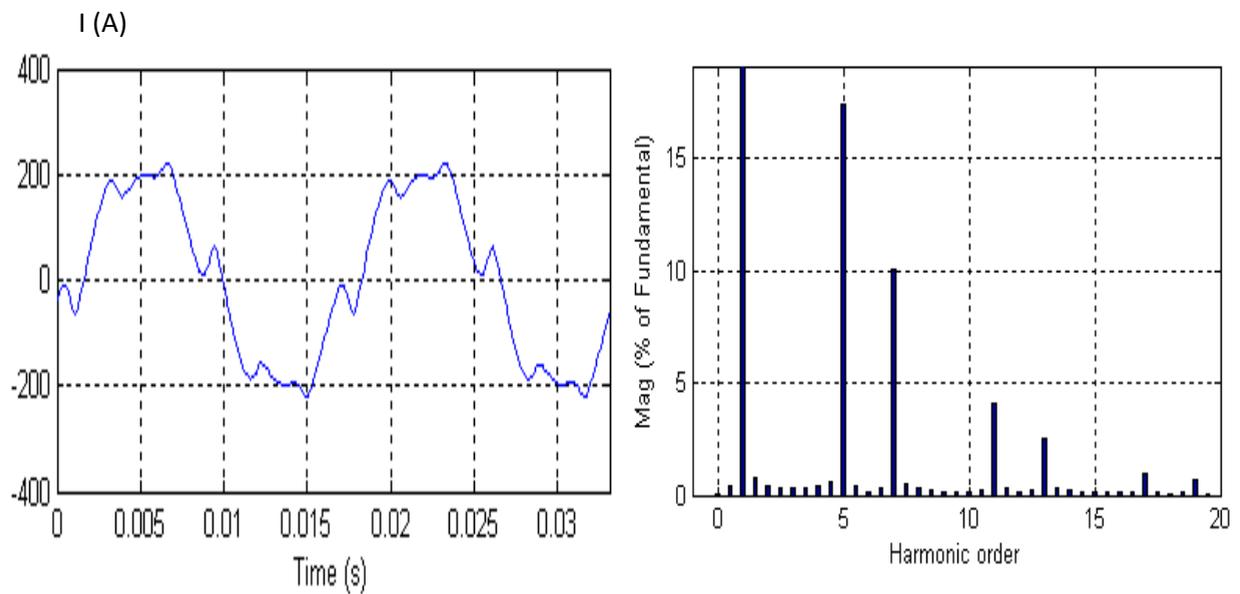


Figure III.9 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers le primaire du transformateur T_3

- **Ligne L_3 :**

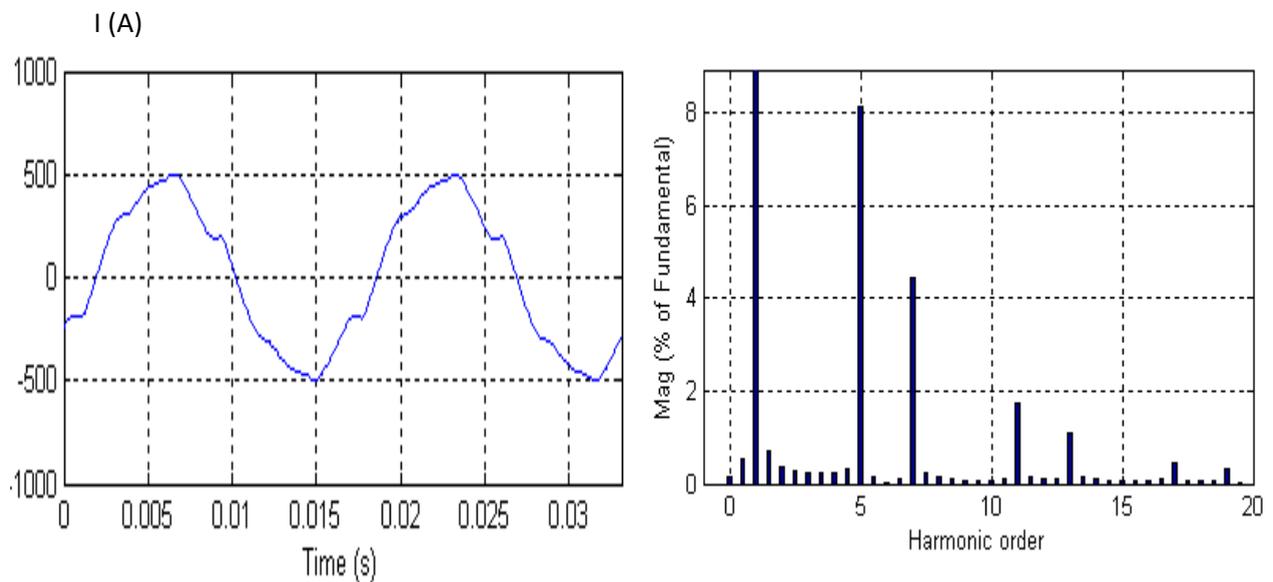


Figure III.10 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L_3

- **Ligne L_1 :**

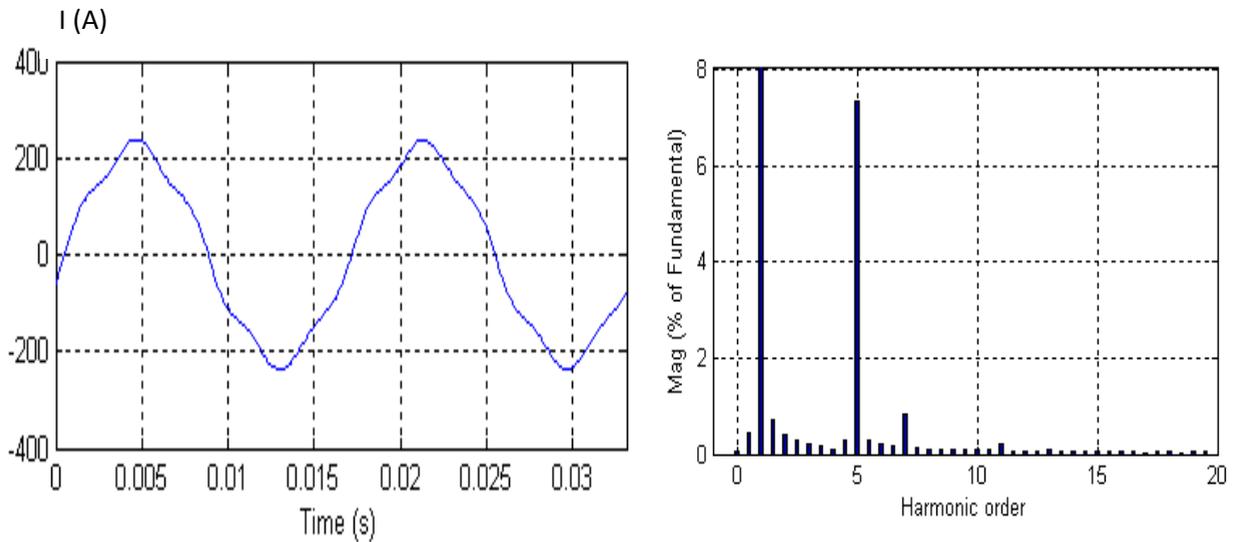


Figure III.11 : Forme d'onde et spectre du courant passant à travers la ligne L_1

➤ **Commentaires :**

En ce qui concerne les courants à travers les lignes du réseau, nous remarquons qu'ils sont plus sensibles à la distorsion par rapport aux tensions.

Nous remarquons aussi que le taux de distorsion du courant augmente pour atteindre des valeurs assez importantes (par exemple pour le courant passant à travers le primaire du transformateur T_3 , nous avons $TDH_i(\%) = 20.57$).

En remontant de la charge polluante vers le poste 69 kV, nous remarquons qu'il y a une atténuation de la distorsion harmonique du courant.

3.4 Impédance harmonique vue des jeux de barres du réseau :

Pour examiner de plus près la propagation harmonique à travers le réseau, nous présentons, dans la suite de notre travail, l'évaluation de l'impédance harmonique vue du jeu de barres (03 : MILL-1)

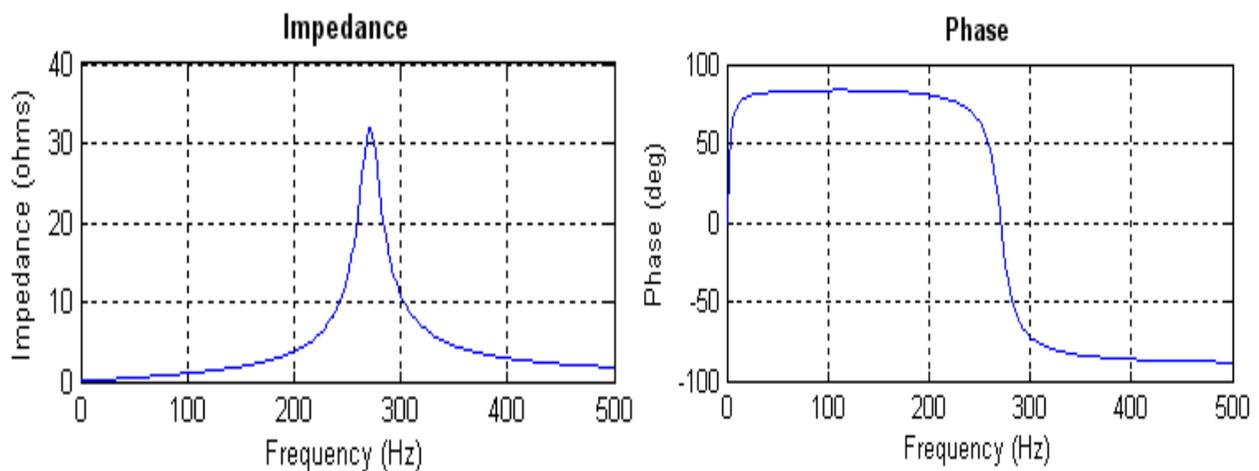


Figure III.12 : Impédance harmonique vue du jeu de barres (03 : MILL-1)

➤ **Commentaires :**

D'après la courbe de l'impédance harmonique, nous constatons qu'au niveau du jeu de barres 03 : MILL-1, se présente une résonance autour de la fréquence 270 Hz proche du rang 5, ce qui explique la prépondérance de ce rang dans les spectres de tensions tracés précédemment.

3.5 Effet de la compensation sur la distorsion harmonique de la tension :

En faisant varier la valeur du condensateur de compensation d'énergie réactive connecté au nœud 3, nous remarquons une variation assez importante de TDH aux différents nœuds (Tableaux III.8, III.9, III.10)

Numéro du jeu de barres	Jau de barres	TDH _v (%)
1	100 : UTIL-69	0.50
2	01 : 69-1	0.50
3	03 : MILL-1	2.21
4	50 : GEN-1	1.61
5	51 : Aux	1.55
6	05 : FDR F	2.23
7	49 : RECT	12.54
8	39 : T3 SEC	2.06
9	26 : FDR G	2.21
10	06 : FDR H	2.21
11	11 : T4 SEC	2.16
12	19 : T7 SEC	2.06
13	29 : T11 SEC	2.11

Tableau III.8 : Tableau des résultats de la distorsion à 25 % Q_c

Numéro du jeu de barres	Jau de barres	TDH _v (%)
1	100 : UTIL-69	0.86
2	01 : 69-1	0.87
3	03 : MILL-1	3.81
4	50 : GEN-1	2.81
5	51 : Aux	2.70
6	05 : FDR F	3.81
7	49 : RECT	11.23
8	39 : T3 SEC	3.53
9	26 : FDR G	3.82
10	06 : FDR H	3.82
11	11 : T4 SEC	3.72
12	19 : T7 SEC	3.56
13	29 : T11 SEC	3.64

Tableau III.9 : Tableau des résultats de la distorsion à 50 % Q_c

Numéro du jeu de barres	Jau de barres	TDH _v (%)
1	100 : UTIL-69	0.35
2	01 : 69-1	0.35
3	03 : MILL-1	1.22
4	50 : GEN-1	0.90
5	51 : Aux	0.87
6	05 : FDR F	1.25
7	49 : RECT	12.42
8	39 : T3 SEC	1.16
9	26 : FDR G	1.22
10	06 : FDR H	1.22
11	11 : T4 SEC	1.19
12	19 : T7 SEC	1.14
13	29 : T11 SEC	1.17

Tableau III.10 : Tableau des résultats de la distorsion à 150 % Q_c

Remarque : Q_c est la valeur donnée par la référence ($Q_c = 6000$ kVar)

➤ **Commentaires :**

Nous constatons que l'effet des condensateurs de compensation d'énergie réactive sur les taux de distorsion harmonique des tensions est important.

- Nous représentons ci-dessous, les variations des TDH_V (%) au nœud pollueur en fonction de la valeur de la compensation d'énergie réactive au nœud (03-MILL-1)



Figure III.13 : TDH_V (%) en fonction de Q_c

Conclusion générale :

Dans ce travail, nous avons analysé l'évolution de la distorsion harmonique dans un réseau de distribution de 13 nœuds due à des variateurs de vitesse des moteurs à induction.

Les résultats obtenus montrent que la distorsion harmonique de la tension est plus importante au voisinage du jeu de barre comprenant la charge polluante.

Cette distorsion diminue en allant vers les jeux de barres de tension supérieures, cela est causé par l'effet d'amortissement des éléments résistifs dans les différentes branches du réseau, en effet les transformateurs alimentant les charges en basse tension isolent le réseau moyenne tension des harmoniques générés au nœud non linéaire.

La présence des condensateurs modifie l'impédance harmonique du réseau par l'apparition des résonances parallèles aux niveaux des jeux de barres.

Bibliographie

[1]: Task Force on Harmonics Modeling and Simulation

« Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation »

PE-260-PWRD-0-11-1997

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

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

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

[3] : T. DEFLANDRE .P MAURAS

« Les harmoniques sur les réseaux électriques. »

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

[4] : D. OLLIVIER

« La simulation des perturbations harmoniques »

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

[5] :T.DEFLANDRE, J .MARTINON

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

Note d'EDF. Edition Eyrolles, 1997

[6] : T.DEFLANDRE, P.MAURAS, M.LE BITOUX

« Qualité de l'alimentation électrique (2^{ème} partie) »

Les cahiers de l'ingénieur, N°58, Note d'EDF, Décembre 1995

« Qualité de l'électricité vers une maîtrise des tensions harmoniques » N°63 .Mars1997

[7] : Mohand Alaa Eddin Alali

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

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

[8] : Christophe Prévé

« Réseau électrique industriel » Tome 2

Edition LAVOISIER, juin 2005

[9]: M.Hamaidi, F .Hamoumi, L.Hammani

« Contribution à l'étude d'un filtre actif parallèle monophasé »

Mémoire d'Ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2002

[10] : M AOUES

« Filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé »

Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2004

[11] : Eric Félice

« Perturbations harmoniques : Effets, Origines, Mesures, Diagnostic, Remède »

Edition DUNOD, Paris, 2000

[12] : Christophe Prévé

« Réseau électrique industriel » Tom 1

Edition LAVOISIER, juin 2005

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

« Simulation des réseaux électriques »

Editions Eyroller, 1997

[14] : M^r BADOU .HAMID

« Etude de la propagation des harmoniques dans un réseau industriel »

Mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2006-2007