

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D 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

**ETUDE DE LA PROPAGATION
DES HARMONIQUES DANS UN
RESEAU ELECTRIQUE**

Proposé et dirigé par :

M^r : BESSAI . H

Réalisé par :

M^{elle} : KARA Sabrina

M^{elle} : MILOUDI Sihem

Promotion 2009/2010



Remerciements

*Nous tenons à remercier vivement notre dévoué promoteur
Mr H.BESSAI pour son encadrement et pour sa contribution
à travers sa disponibilité, son temps et son expérience, ainsi qu'à Mr
S.RABAHALLAH.*

*Nous tenons à exprimer toutes nos gratitudees à monsieur le président et les
membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger
notre modeste travail*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont participé à
notre formation et nos familles, pour leur amour, leur soutien, leur générosité
et leur sacrifice.*

*Nos remerciements les plus chaleureux s'adressent à tous (tes) nos amis (es) et
tous ceux qui ont contribués de prés ou de loin à la réalisation de ce modeste
travail.*

A tous merci

La qualité de l'énergie est devenue un pôle attracteur de chercheurs, expérimentateurs, managers et consultants, vu le grand rôle qu'elle joue sur le plan technique et économique. L'objectif de notre travail est de calculer la distorsion harmonique dans un réseau électrique de transport de 14 nœuds [1] en présence de deux charges polluantes, la station à haute tension continue (HVDC) et le compensateur statique (SVC) composé de bobines contrôlées par thyristors (TCR).

La méthode de calcul programmée sous MATLAB, basée sur l'utilisation de la matrice impédance nodale du réseau a permis de déterminer les niveaux des taux de distorsion harmonique de la tension aux différents jeux de barres.

D'après les résultats trouvés nous constatons que le HVDC pollue plus le réseau par rapport au SVC.

Les filtres placés aux niveaux des sources harmoniques sont indispensables pour la dépollution harmonique du réseau.

L'utilisation des deux sources d'harmoniques ensemble n'augmentent pas considérablement les niveaux des TDH.

La variation du niveau de la compensation au jeu de barre 9 modifie très peu les niveaux des TDH.

Enfin les résultats obtenus avec notre méthode de calcul sont assez proches de ceux donnés par la référence et l'utilisation des modèles plus détaillés concernant le HVDC et le SVC est nécessaire.

Introduction générale.

Chapitre I : les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques

Introduction	3
I.1. Perturbations dans le réseau électrique	3
I.1.1. Creux de tension	3
I.1.2. Surtensions	3
I.1.3. Fluctuations de la tension	4
I.1.4. Distorsions de l'onde	4
I.2. Pollution harmonique	4
I.2.1. Explication du phénomène harmonique	4
I.2.2. Caractéristiques d'un signal déformé	5
I.2.3. Notion de charge linéaire et non linéaire	10
I.2.4. Sources génératrices d'harmoniques	11
I.2.4.1. Emission en courant	11
I.2.4.2. Emission en tension	13
I.2.5. Conséquences des harmoniques	14
I.2.5.1. Effets instantanés	15
I.2.5.2. Effets à long terme	16
I.2.6. Remèdes	18
I.2.6.1. Utilisation des équipements peu perturbateurs	18
I.2.6.2. Compensation de la puissance réactive	18
I.2.6.3. Filtrage	18
I.3. Propagation des harmoniques	22
I.3.1. Impédance des réseaux	22
I.3.2. Résonance	24
I.3.3. Foisonnement	25
I.3.4. Conditions de propagation des harmoniques sur les réseaux	25

Chapitre II : Modélisation du réseau électrique en régime harmonique.

Introduction	28
--------------------	----

II.1. Modélisation des éléments du réseau	28
II.1.1. Modèle d'un réseau amont	28
II.1.2. Modèle d'une ligne de transport	29
II.1.3. Modèle d'un transformateur	30
II.1.4. Modèle d'une batterie de condensateur	31
II.1.5. Modèle d'un filtre en régime harmonique	31
II.1.6. Modèle d'une charge linéaire	34
II.1.7. Modèle d'une machine synchrone	36
II.2. Modèle d'une charge non linéaire	37
II.3. Méthode utilisée pour l'évaluation de la distorsion harmonique dans le réseau ...	41

Chapitre III : Applications et résultats.

Introduction	44
III.1. Données du réseau.....	45
III.2. Données des sources d'harmoniques	47
III.3. Calcul de la distorsion harmonique.....	49

Conclusion générale.

Introduction :

La sensibilisation à la qualité de l'énergie électrique est devenue incontournable dans l'enseignement de l'électrotechnique d'aujourd'hui. Nous exposons dans ce qui suit la position du problème de la qualité de l'énergie électrique. La qualité du réseau électrique peut être affectée en touchant les paramètres caractéristiques du système sinusoïdal triphasé. L'altération d'un ou des paramètres engendrent divers perturbations.

I.1. Perturbations dans le réseau électrique : [2]

La perturbation est un phénomène électromagnétique susceptible de dégrader les performances d'un dispositif, équipement ou système électrique.

Ces perturbations peuvent pénétrer dans les équipements sensibles par divers accès.

I.1.1. Creux de tension :

C'est la diminution brusque de la tension de fourniture à une valeur située entre 90% et 100% de la tension d'alimentation. Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle.

Seules les chutes de tension inférieures à 10% sont considérées ici.

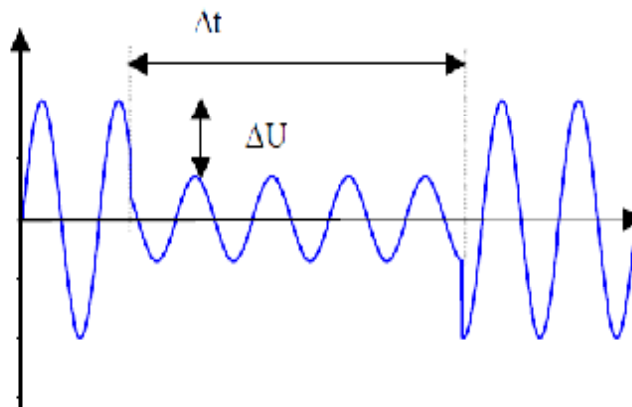


Figure I-1 : Creux de tension.

I.1.2. Surtensions :

La surtension est définie comme étant l'inverse du creux de tension. Elle se caractérise par une élévation modérée (>à10%) de la tension sur plusieurs cycles.

Les surtensions proviennent des délestages des grosses charges électriques comme les moteurs, les ascenseurs, l'éclairage, le chauffage, etc...

I.1.3. Fluctuations de la tension :

Les variations rapides de la tension sont des variations de la valeur efficace de la tension entre deux niveaux consécutifs maintenus pendant des durées définies mais non spécifiées.

La fluctuation de la tension est une suite de variations de tension

Les variations rapides de tension sont provoquées par des récepteurs dont la charge est régulièrement fluctuante : soudure par point, four à arc, scie alternative... etc.

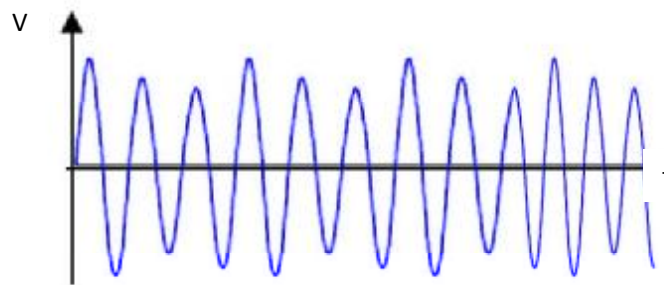


Figure I-2 : Fluctuation de tension.

I.1.4. Distorsions de l'onde :

La distorsion se traduit par la déviation de l'onde sinusoïdale de sa forme idéale due à la présence d'harmoniques et inter-harmoniques causés par les charges non linéaires.

I.2. Pollution harmonique :

Le niveau des harmoniques sur les réseaux de distribution et de transport augmente au fil des ans.

I.2.1. Explication du phénomène harmonique : [3]

La forme d'onde des grandeurs électriques sur les réseaux d'énergie s'éloigne assez souvent de la sinusoïde pure. Cependant tout signal $S(t)$ périodique (de pulsation ω) peut être décomposé en une somme de fonctions sinusoïdales. Les amplitudes et les phases de ces différentes sinusoïdes sont données par la série de Fourier.

$$S(t) = S_0 + S_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} S_h \cos(h\omega t + \varphi_h) \quad (I.1)$$

Signal périodique = composante continue + fondamental + harmoniques

Une grandeur harmonique est l'une des composantes sinusoïdales de la grandeur initiale, à une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. La grandeur harmonique de rang h est la sinusoïde d'amplitude a_h , de pulsation ω_h et de phase ϕ_h .

I.2.2. Caractéristiques d'un signal déformé :

1- Analyse de Fourier :

L'analyse de Fourier est la décomposition d'un signal périodique en série de sinusoïdes, donc ce signal est décomposé en onde sinusoïdale à la fréquence du réseau et la somme de signaux, de fréquence 2, 3, 4, 5, ... h fois la fréquence du réseau

Soit $S(t)$ le signal à décomposer :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(\omega_h t) + b_h \sin(\omega_h t)] \quad (I.2)$$

Avec $a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt$ (I.3)

Et pour $h \geq 1$, $a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(\omega_h t) dt$ (I.4)

Et $b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(\omega_h t) dt$ (I.5)

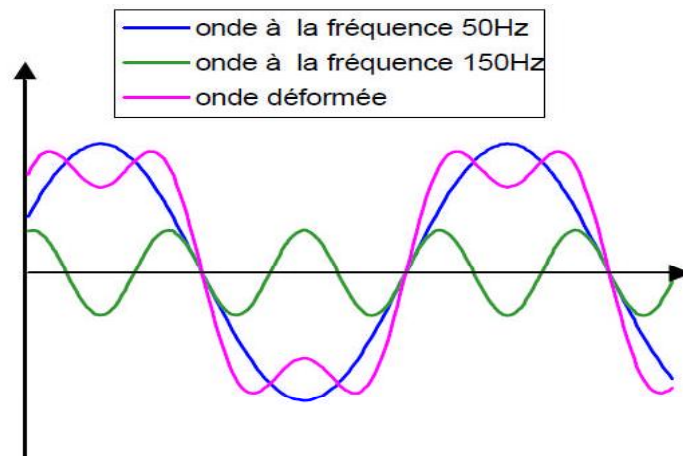
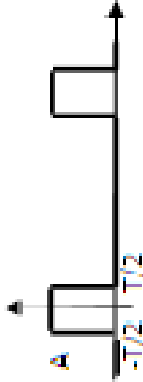
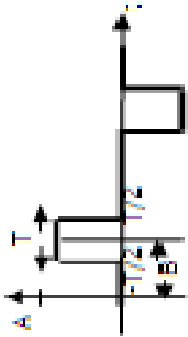
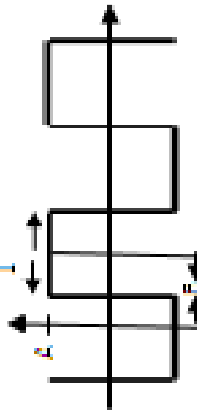
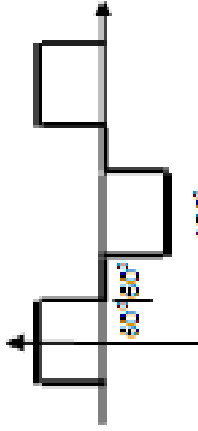
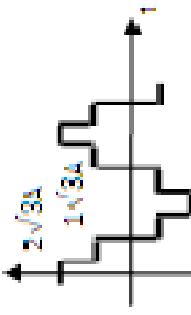


Figure I-11 : Onde déformée et sa décomposition.

• Série de Fourier de formes d'ondes usuelles

	Forme d'onde	Série de Fourier
Onde en créneau		$f(t) = A \frac{1}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2A}{n\pi} \sin\left(n\pi \frac{T}{T}\right) \cos(n\omega t)$
Onde en créneau bipolaire décalée		$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4A}{n\pi} \sin\left(n\pi \frac{B}{T}\right) \cos(n\omega t - \beta^n)$ <p>Pour n impaire</p>
Onde carrée		$f(t) = \frac{4A}{\pi} \left(\cos\omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right)$
Onde bipolaire de 120° de largeur		$f(t) = \frac{2\sqrt{3}A}{\pi} \left[\cos\omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right]$
Onde trapézoïdale en escalier à trois niveaux		$f(t) = \frac{2\sqrt{3}A}{\pi} \left[\cos\omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right]$

2-Rang harmonique :

Le rang harmonique h est un nombre entier égal au rapport entre la fréquence de l'harmonique et la fréquence du fondamental

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (I.6)$$

3-Spectre d'harmonique :

C'est l'histogramme qui donne l'amplitude relative par rapport au fondamental de l'harmonique en fonction du rang

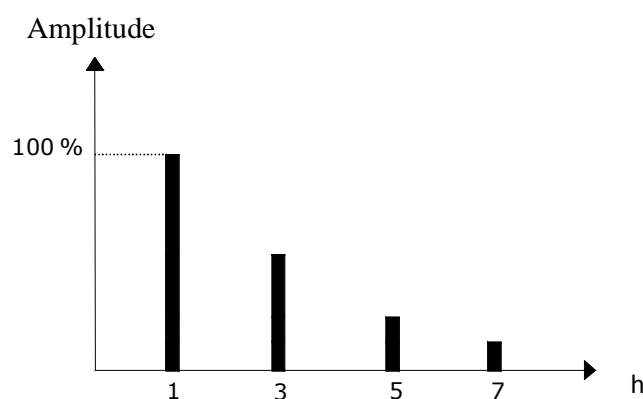


Figure I-12 : Spectre d'harmoniques.

4-Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale :

L'application de la formule générale :

$$Y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Y^2 dt} \quad (I.7)$$

Donne avec la représentation harmonique :

$$Y = \sqrt{\sum Y_h^2} \quad (I.8)$$

5-Courant harmonique : [2]

Les charges non linéaires se comportent comme des sources de courant harmonique ; autrement dit le courant harmonique est fixé par la charge.

Un courant $i(t)$ de période T peut s'écrire :

$$i(t) = \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{h=3,5,7,\dots} \sqrt{2} Y_h \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (I.9)$$

φ_h : Déphasage du courant de rang h par rapport au fondamental.

Y_h : Valeur efficace du courant de rang h .

6- Tension harmonique : [2]

Les courants harmoniques qui circulent dans le réseau rencontrent l'impédance du réseau et créent une tension harmonique selon la loi d'ohm

$$U_h = I_h Z_h \quad (I.10)$$

Une tension déformée $v(t)$ de période T peut s'écrire de la façon suivante :

$$U(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} U_h \sin(\omega h t + \phi_h) \quad (I.11)$$

U_h : Valeur efficace de la tension harmonique de rang h .

ϕ_h : Déphasage de la tension harmonique de rang h par rapport au fondamental.

7-Expression des puissances :

- **Puissance active**

La puissance active transportée par un signal périodique déformé est égale à la somme des puissances actives transportées par chaque harmonique de ce signal.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (I.12)$$

ϕ_h : Déphasage entre le courant harmonique de rang h et la tension harmonique de rang h .

- **Puissance réactive [2]**

La puissance réactive définie pour les régimes purement sinusoïdaux, n'a pas de sens pour un signal non sinusoïdal.

Son expression est donnée par :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \quad (I.13)$$

- **Puissance apparente**

L'expression du carré de la puissance apparente est définie comme suit :

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad (I.14)$$

Donc, on aura :

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 + \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (I.15)$$

- **Puissance déformante**

En présence d'harmoniques dans un réseau électrique ; l'expression du carré de la puissance apparente qui est $S^2 = P^2 + Q^2$ n'est pas valide

Dans ce cas, une autre puissance apparaît dans le dimensionnement qui est la puissance déformante. Elle est due au contenu harmonique dans le réseau ; ce qui implique que l'expression du module de la puissance apparente devient :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{I.16})$$

$$\text{D'où} \quad D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (\text{I.17})$$

8- Facteur de puissance :

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

$$F = \frac{P}{S} \quad (\text{I.18})$$

- **Facteur de déphasage**

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

$$\cos \phi = \frac{P}{S} \quad (\text{I.19})$$

- **Facteur de crête**

Il est défini par le rapport entre la valeur de crête de l'onde et de sa valeur efficace.

$$F = \frac{I_{\text{crête}}}{I_{\text{efficace}}} \quad (\text{I.20})$$

Avec $I_{\text{crête}}$: Valeur de crête.

I_{efficace} : Valeur efficace.

9- Taux de distorsion :

- **Taux de distorsion globale**

Il est donné par le rapport entre la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques et celle du fondamental.

$$\text{TDH} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (\text{I.21}) \quad \text{avec TDH} > 0$$

C'est le taux de distorsion qui nous permet d'évaluer et quantifier la perturbation harmonique.

- **Taux de distorsion individuel**

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

$$\text{TDHi}(\%) = 100 * \frac{I_n}{I_1} \quad (\text{I.22})$$

- **Inter-harmonique**

L'appellation **inter-harmonique** renvoie à des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celles du fondamental ; autrement dit de rang non entier.

- **Infra-harmonique**

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.

La présence d'**inter-harmoniques** ou d'**infra-harmoniques** est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs.

I.2.3. Notion de charge linéaire et non linéaire : [4]

- Une **charge est dite linéaire** lorsque son **impédance est constante**, le **courant qu'elle absorbe est de la même forme que la tension d'alimentation**

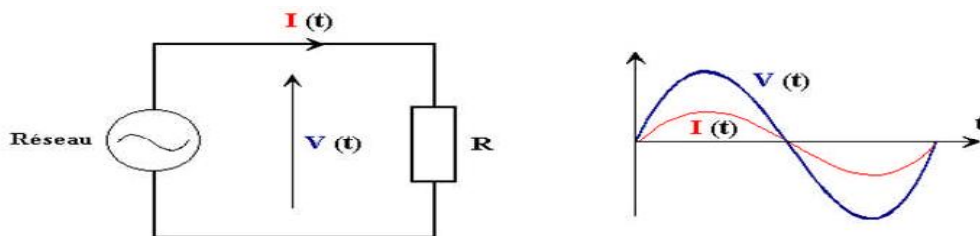


Figure I-3 : Signaux relatifs à une charge linéaire.

- Une charge est dite **non linéaire** lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le **courant qu'elle absorbe n'est pas de même forme que la tension d'alimentation**

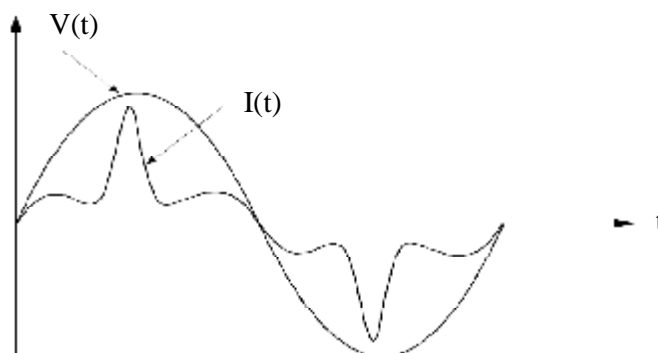


Figure I-4 : Signaux relatifs à une charge non linéaire.

I.2.4. Sources génératrices d'harmoniques : [4] [5]

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.2.4.1. Emission en courant :

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.

Les principales sources de courants harmoniques sont :

- **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.

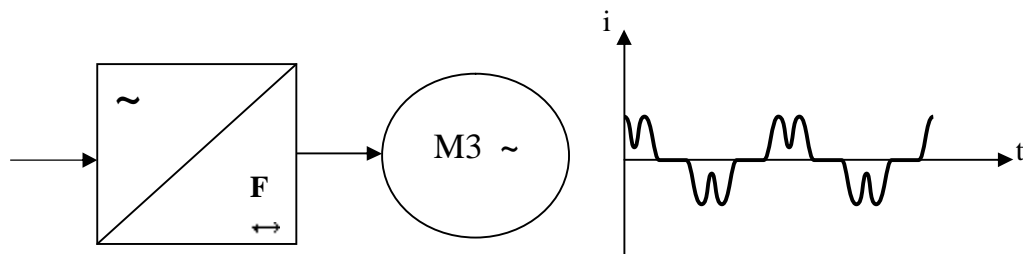


Figure I-5 : Variateur de vitesse à fréquence variable.

- **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 tension 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 charges 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 matériel électroménager et les ballasts électroniques.

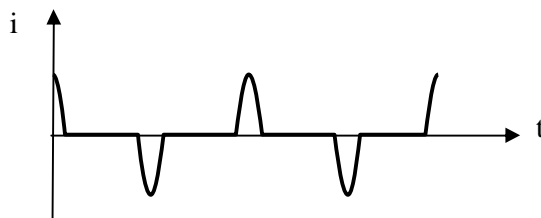


Figure I-6 : Alimentation à découpage dans un micro-ordinateur

- **L'éclairage**

Les ballasts électroniques des appareils fluorescents d'éclairage sont générateurs de courant harmonique. Dans certains cas, un taux de 25% de courant harmonique peut être relevé.

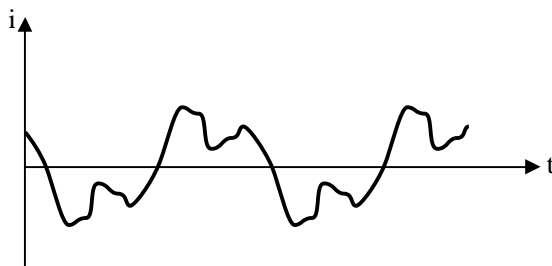


Figure I-7 : Eclairage fluorescent

- **Les convertisseurs statiques**

Ces appareils sont parmi les pollueurs les plus répandus. Certains facteurs concourent à modifier les amplitudes de leurs harmoniques caractéristiques. De plus, dans le cas de ponts à thyristors, un déphasage des harmoniques en fonction de l'angle de retard à l'amorçage peut être observé. Les liaisons à courant continu figurent parmi les plus puissants convertisseurs statiques raccordés au réseau.

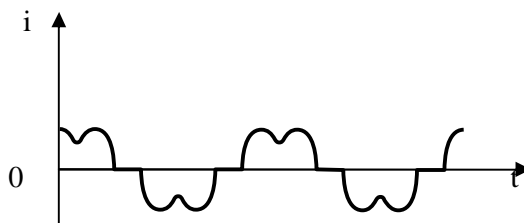


Figure I-8 : Redresseur

- **Les fours à arc**

Dans un four à arc, des arcs électriques sont créés entre des électrodes plongées dans une charge de ferrailles métalliques solides. La chaleur transmise par l'arc fait fondre le métal.

Qu'il soit alimenté en courant continu ou en courant alternatif, le four à arc représente un élément pollueur très important pour le réseau.

Les fours à arc produisent de véritables bruits électriques contenant toutes les fréquences dont l'amplitude décroît avec l'augmentation de la fréquence.

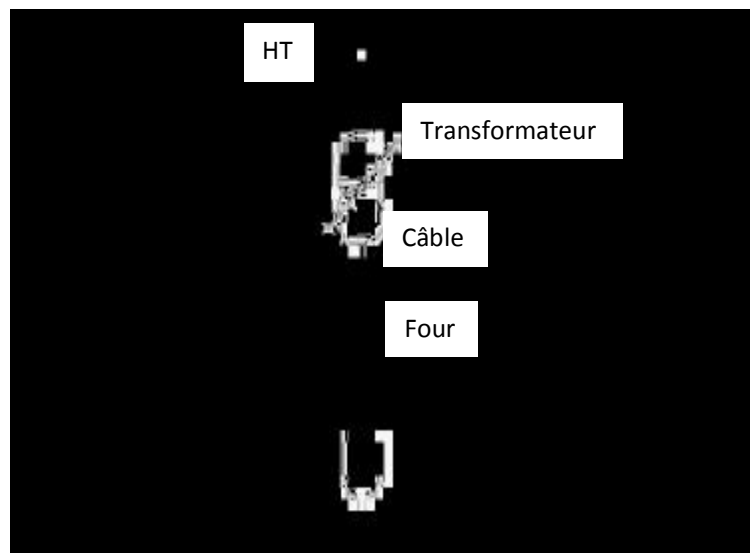


Figure I-9 : Four à arc alimenté en alternatif.

I.2.3.2. Emission en tension :

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 principales sources de tensions harmoniques sont :

- **Les alternateurs**

Les alternateurs des centrales de production émettent des tensions à moins de 0.5% d'harmoniques.

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 transformateurs**

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

- **Les ASI (alimentations statiques ininterrompibles)**

Les charges non linéaires alimentées par les ASI provoquent la naissance de tension harmonique. Le taux de distorsion diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI. La distorsion harmonique pour une ASI est de 4% si elle alimente une charge linéaire et elle est de 7% si elle alimente une charge non linéaire.

En charge, le taux harmonique est dû essentiellement aux courants créés par les charges non linéaires.

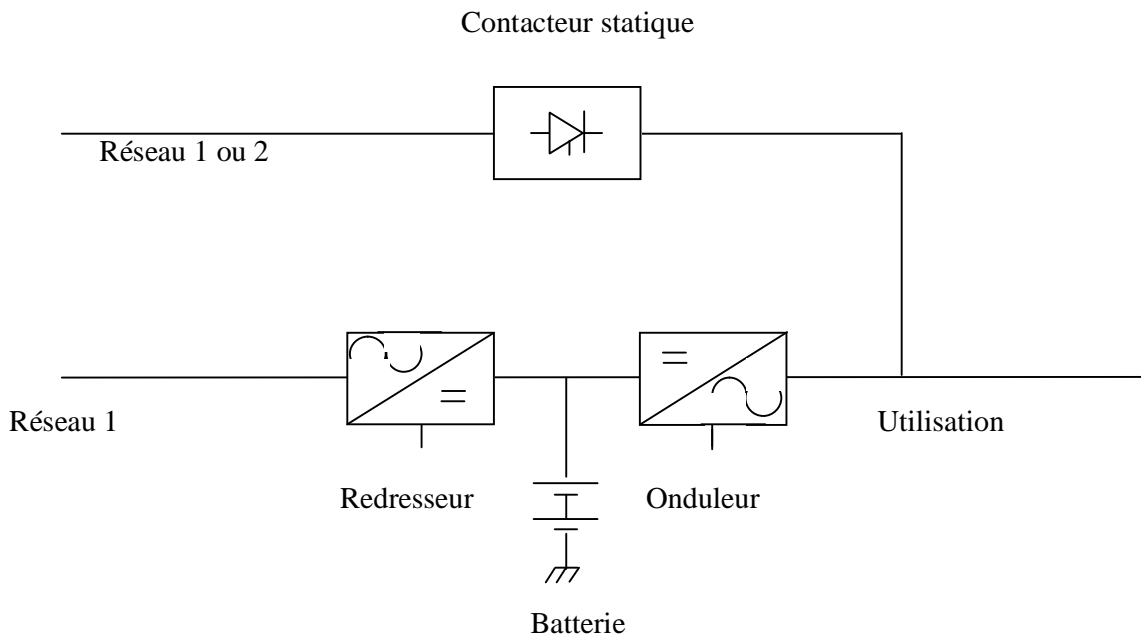


Figure I-10 : Schéma d'une ASI

I.2.5. Conséquences des harmoniques : [7]

L'utilisation des convertisseurs statiques a provoqué des progressives perturbations sur les réseaux.

Les effets des harmoniques diffèrent selon les récepteurs rencontrés, soit des effets instantanés ou des effets à long terme.

I.2.5.1. Effets instantanés :

Ce sont des effets immédiats sur le fonctionnement des appareils.

- **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 pour 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.

- **Interférence :**

Lorsqu'une ligne à courant faible suit une canalisation de distribution électrique dont le signal est déformé, les interférences sont présentes, c'est le cas des lignes téléphoniques.

La commande de relais utilisant des fréquences inter-harmoniques peut être perturbée par la présence des tensions harmoniques de fréquence voisine, ce qui peut mener à des déclenchements intempestifs ou la perte de sensibilité de ces relais.

I.2.5.2. Effets à long terme :

Ces effets concernent tous les types de matériels et sont liés à la présence de niveaux harmoniques moins importants. Ils vont d'une perte partielle de fonctionnalité ou une indisponibilité jusqu'à une destruction totale de l'appareil.

- **L'échauffement :**

Certains matériaux sont différemment atteints par l'échauffement, on peut citer :

- ✓ **Les condensateurs :**

Ils sont sensibles aux surtensions dues aux harmoniques qui favorisent les pertes supplémentaires ; par conséquent l'échauffement qui est causé par deux phénomènes : la conduction et l'hystérésis dans le diélectrique

- ✓ **Les conducteurs (câbles) :**

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

- ✓ **Les machines tournantes :**

Elles sont aussi affectées par cet effet qui consiste au sur-échauffement du stator.

- **Le vieillissement :**

Les matériels soumis à un échauffement pour lequel ils ne sont pas prévus subissent une diminution de leur durée de vie.

Les isolants subissent aussi l'échauffement des âmes conductrices d'où leur vieillissement, il est aussi à noter que la présence de la tension harmonique en plus de la tension fondamentale constitue aussi une contrainte quand à la ténacité de l'isolation

➤ **Tableau de sensibilité des matériels [8]**

Matériels	Type de sensibilité : ou	Type de gêne dû aux harmoniques
Lignes		-Pertes ohmiques supplémentaires -Induction de courants psophométriques dus à la présence d'une ligne voisine.
Câbles	et	-Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans le câble du neutre en présence d'harmoniques de rang 3 -Pertes diélectriques liées au facteur crête de la tension
Moteurs asynchrones		-Pertes supplémentaires dans les enroulements, proportionnelles à u_h^2 / h^2 -Limitation des performances en puissance
Moteurs synchrones	et	-Pertes supplémentaires (pertes joule dans le cuivre) dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs en présence : -de courants harmoniques pour les alternateurs (pertes proportionnelles à I_h^2 / h^2) -et de tensions pour les moteurs synchrones (pertes proportionnelles à u_h^2 / h^2) -Limitation des caractéristiques en puissance et couple pulsatoire.
Condensateurs de puissance	et	-Troubles fonctionnels liés à la distorsion de tension
Electronique industrielle, redresseurs, variateurs		-Limitation du courant en présence d'une charge avalé présentant un fort facteur de crête
ASI		-Déclenchement intempestif des systèmes de protection
Variateurs		-Déclenchement intempestif en présence d'harmoniques de rang 3 -Perte de sensibilité des relais différentiels par effet de saturation
Relais de protection		-Pertes diélectriques supplémentaires se traduisant par une fin de vie plus ou moins rapide -Pertes proportionnelles à u_h^2 / h^2
Eclairage		-Lampes à décharge : flicker en présence d'une tension harmonique de rang 2 -Claquage par facteur de crête de la tension

I.2.6. Remèdes :

I.2.6.1. Utilisation des équipements peu perturbateurs : [6]

L'utilisation de charges non linéaires produit des courants harmoniques. La recherche de convertisseurs «propres», de nouvelles conceptions répondant exactement à la même fonction sont l'une des préoccupations actuelles des fabricants.

Les IGBT ont permis le développement industriel de convertisseurs de puissance aptes à garantir la non-pollution au point de raccordement (le prélèvement sinusoïdal), puis la dépollution des réseaux (le filtrage actif).

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec en plus, un cosinus proche de l'unité, c'est une technique très intéressante qui devrait être de plus en plus utilisée

I.2.6.2. Modification de l'installation :

- Séparation des sources des harmoniques, des condensateurs pour éviter les résonances.
- Sur dimensionner les équipements du réseau (les transformateurs, les câbles, les machines synchrones et asynchrones.
- La mise en place des techniques qui consistent à modifier au cas par cas les conditions de la propagation des harmoniques.

I.2.6.3. Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

I.2.6.4. Filtrage :

• Filtre actif :

Le filtre actif est un convertisseur qui élimine les perturbations harmoniques de même amplitude que celle générée par le processus industriel, mais en opposition de phase.

Il s'agit d'une solution qui n'est pas applicable qu'en basse tension pour des installations industrielles de faible puissance.

Il est composé généralement de quatre parties principales. La figure ci-dessous donne un schéma simplifié de ce filtre.

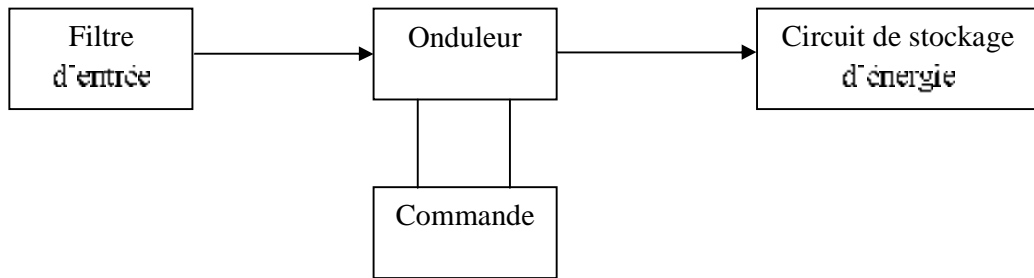


Figure I.11 : Structure générale d'un filtre actif

Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

✓ Filtrage actif série

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, etc. en revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

La figure qui suit montre la position du filtre série dans un réseau quelconque.

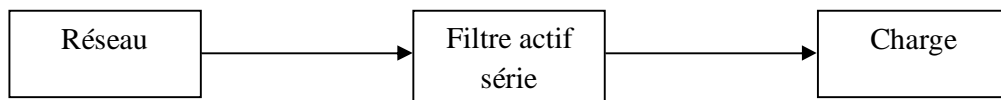


Figure I.12 : Schéma de principe d'un filtre actif série.

✓ Filtrage actif parallèle

Le filtrage actif parallèle injecte dans les réseaux les courants harmoniques consommés par la charge de telle sorte que le générateur ne fournit plus que le courant fondamental.

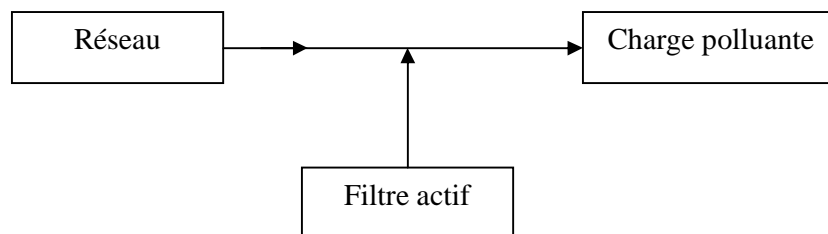


Figure I.13 : Schéma de principe d'un filtre actif parallèle

- **Filtre passif : [4]**

Le principe est d'abaisser l'impédance harmonique du réseau, de façon à réduire les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques là où nécessaire.

Les filtres passifs participent à la compensation en énergie réactive. Ils sont composés d'ensemble condensateurs-selfs dont la fréquence de résonance est accordée sur les rangs des harmoniques générés.

On distingue deux types de filtre passif :

- **Filtre résonnant (filtre shunt)**

Le filtre résonnant est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C .

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer.

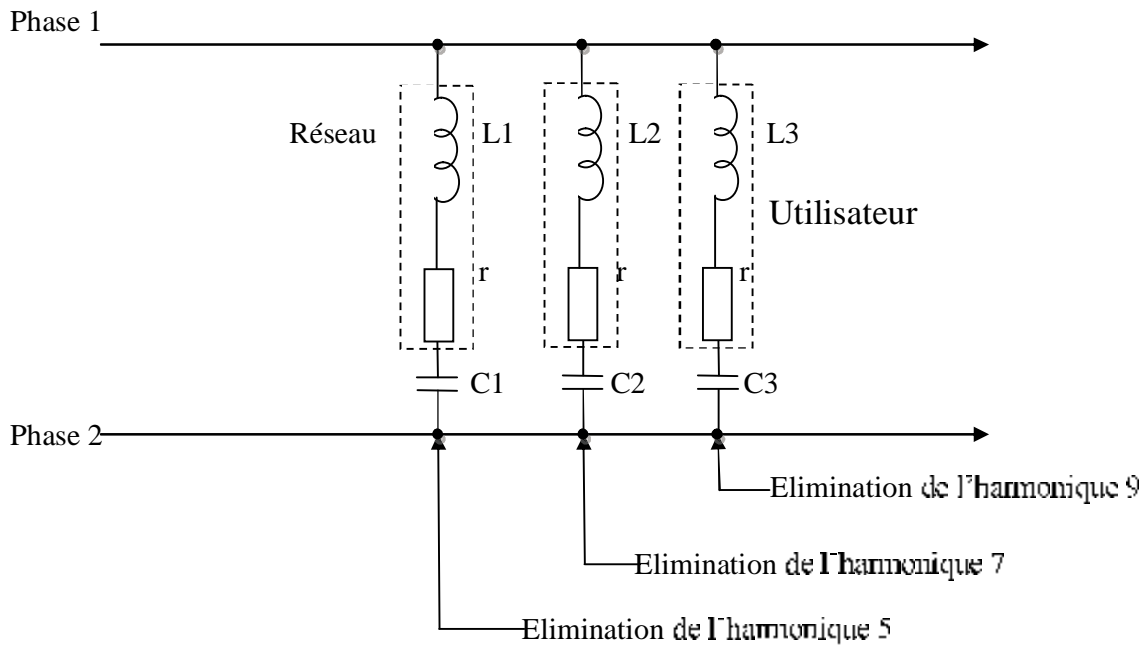


Figure I.14 : Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

▪ Filtre amorti

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonnant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance. Le filtre amorti assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonnant.

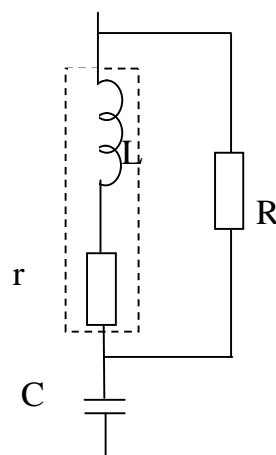


Figure I.15 : structure du filtre amorti.

I.3. Propagation des harmoniques :

La propagation des harmoniques dans un réseau dépend des impédances et des charges qui y sont raccordées.

Les tensions harmoniques se propagent généralement des niveaux de tension élevés vers les niveaux inférieurs.

I.3.1. Impédance des réseaux : [3]

L'impédance des éléments du réseau conditionne largement la propagation des perturbations harmoniques. On peut définir en tout point du réseau une impédance qui dépend du rang harmonique h considéré. Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point.

Lorsqu'on parle de l'impédance d'un réseau il faut toujours préciser la position de l'observateur et le sens de l'observation

Si l'on considère le schéma suivant :

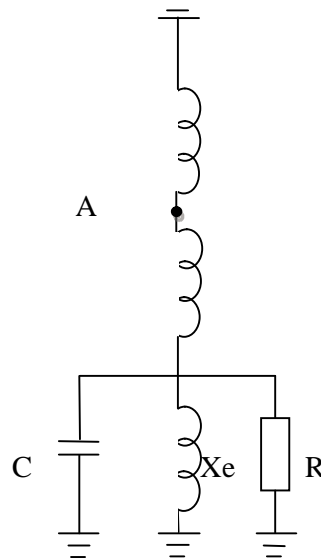


Figure I-16 : Exemple d'un réseau industriel.

- ✓ Vue du point A, en regardant vers le réseau aval l'impédance équivalente ne tient compte que des éléments en aval du point d'observation.

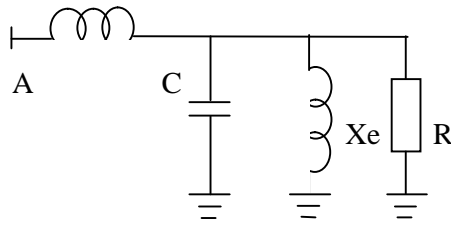


Figure I-17 : impédance « aval » au point A.

- ✓ En regardant vers le réseau amont, l'impédance équivalente serait celle qui ne tient compte que des éléments en amont.

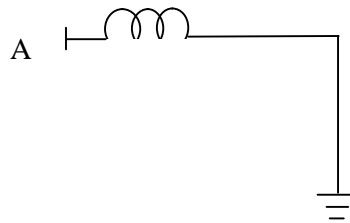


Figure I.18 : impédance « amont » au point A

- **Variation de l'impédance du réseau en fonction de la fréquence :**

L'impédance d'un circuit est proportionnelle à la fréquence et se présente différemment suivant le rang harmonique.

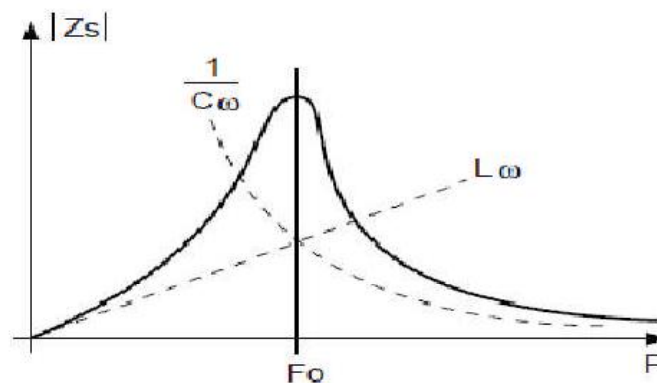


Figure I.19 : variation de l'impédance de sortie du réseau en fonction de la fréquence.

I.3.2. Résonance : [4]

Les phénomènes de résonance proviennent de la présence dans le réseau d'éléments inductifs et capacitifs, générant ainsi des amplitudes élevées sur certains rangs harmoniques.

En effet l'impédance d'une inductance augmente avec l'augmentation de la fréquence ($Z_L=L\omega$) et celle d'une capacité diminue ($Z_C=1/\omega C$), ainsi dans un circuit intégrant des inductances et des capacités, il y'aura une fréquence f_r donnant l'égalité entre les deux impédances, cette fréquence est la fréquence de résonance.

$$f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Leftrightarrow LC\omega^2 = 1 \quad (I-23)$$

Selon que les éléments capacitifs et inductifs sont associés en parallèle ou en série, on distingue deux types de résonance.

- **Résonance parallèle :**

La mise en parallèle d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance.

L'expression simplifiée de l'impédance globale est

$$Z_p = \frac{L}{L - LC^2\omega^2} \quad (I.24)$$

A la résonance $L - LC^2\omega^2 = 0$, ce qui annule le dénominateur, l'impédance Z tend alors vers l'infinie

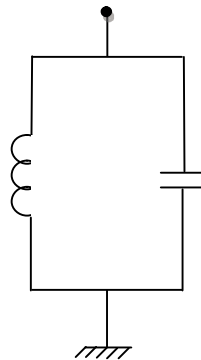


Figure I.20 : Résonance parallèle.

- **Résonance série**

L'association en série d'une capacité et d'une inductance constitue une impédance

L'expression simplifiée de l'impédance globale est donnée par :

$$Z = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{j} \quad (I.25)$$

A la résonance le numérateur égal à zéro, l'impédance Z est alors nulle

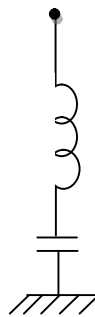


Figure I.21 : Résonance série.

I.3.3. Foisonnement : [8]

Le phénomène de foisonnement est une diminution du niveau de perturbation harmonique à cause de la multiplication des sources harmoniques.

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, plus la résultante pourra devenir négligeable.

I.3.4. Conditions de propagation des harmoniques sur les réseaux : [3]

Les courants harmoniques injectés dans le réseau d'alimentation s'y propagent et s'y répartissent entre les branches suivant la loi commune des nœuds et mailles, le produit du

Le courant harmonique par l'impédance du réseau donne une tension harmonique à la fréquence du courant injecté.

$$= \quad (I.26)$$

Pour réaliser une étude harmonique, il convient d'évaluer des phénomènes atténuateurs liés à la propagation des harmoniques.

On distingue une atténuation liée à :

- La propagation des harmoniques à travers les réseaux qui consiste à étudier l'évolution de la perturbation engendrée par une injection harmonique, au cours de son transit d'un point à l'autre du réseau
- La sommation vectorielle des harmoniques qui consiste à calculer la perturbation résultante de plusieurs injections.

Les tensions harmoniques se propagent plus facilement dans le sens des niveaux de tension décroissants (de la HTB vers la BT) que dans le sens inverse. Les courants harmoniques quant à eux circulent mieux en direction des niveaux de tension supérieurs.

Les conditions de propagation dépendent de :

➤ **La puissance de court-circuit**

La propagation de la tension harmonique a un fort impact sur la valeur de la puissance de court-circuit au point d'injection. La transmission est meilleure si cette puissance est faible.

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.

En l'absence de tout phénomène de résonance, il apparaît que la perturbation harmonique globale croît lorsque la puissance de court-circuit diminue.

➤ **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 sont présentes aux fréquences correspondantes, 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, la perturbation augmente.

Introduction :

Le réseau d'énergie électrique est le siège de perturbations électromagnétiques, qui peuvent se propager plus au moins suivant les éléments du réseau (ligne de transport d'énergie, les impédances des transformateurs et leurs couplages, les condensateurs shunt, les charges linéaires connectées au réseau, etc....).

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 (ligne, condensateurs, transformateurs, filtres, etc...), des charges linéaires et des charges non linéaires (pont de Graëtz, TCR, ...etc.).

II.1. Modélisation des éléments du réseau :

II.1.1. Modèle d'un réseau amont : [8]

Le réseau amont est assimilable à une inductance L_{CC} en série avec une résistance R_r .

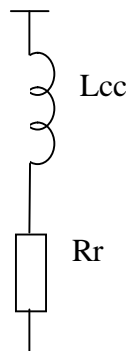


Figure II.1 : modèle d'un réseau amont

- **En régime normal**

$$L_{CC} = \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{CC}} \text{ (H)} \quad (\text{II.1})$$

- **En régime harmonique**

$$R_r(h) = \sqrt{h} * R_r \quad (\text{II.2})$$

$$L_{CC}(h) = \frac{U_n^2}{\omega_0 P_{CC}} * h \text{ (H)} \quad (\text{II.3})$$

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).

II.1.2. Modèle d'une ligne de transport : [9]

Le moyen de transport de l'énergie électrique, de la source vers le client est fait à travers des lignes aériennes. Ces dernières sont des lignes de HT 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 ainsi qu'à l'inter-connexion des réseaux électriques.

Une modélisation précise doit prendre en compte l'effet de peau (pour le calcul de R) et l'effet de propagation dans les lignes et dans les câbles.

Les lignes sont représentées par un quadripôle symétrique donné par un schéma en π .

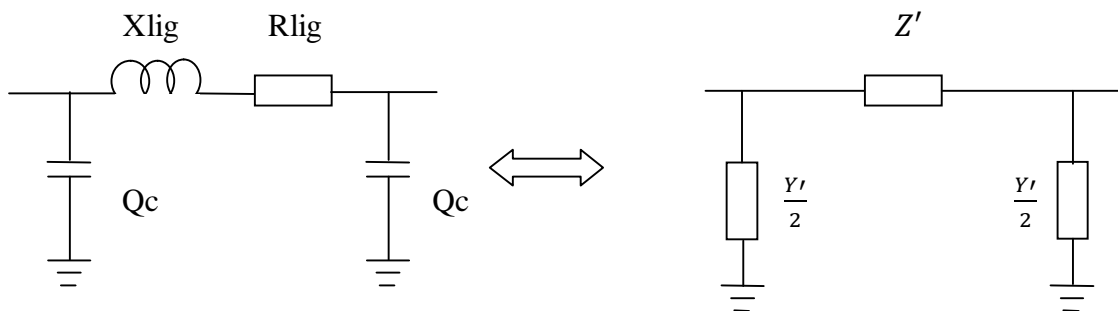


Figure II.2 : modèle d'un câble ou d'une ligne aérienne.

La figure illustre le schéma en π de la ligne où R, L et Q_c sont respectivement la résistance linéique en (mH/km), l'inductance linéique en (mH/km) et la demi perte latérale capacitive en (kvar/km) transversale.

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

- **En régime normal**

$$Z = R + jL\omega \quad (\text{II.4})$$

$$Y = j C\omega \quad (\text{II.5})$$

- **En régime harmonique**

$$Z(h) = R + jh\omega_0 L \quad (\text{II.6})$$

$$Y(h) = j\omega_0 Ch \quad (\text{II.7})$$

II.1.3. Modèle d'un transformateur : [8]

Le modèle est représenté par une inductance L_p en parallèle avec une résistance R_p et en série avec une résistance R_s .

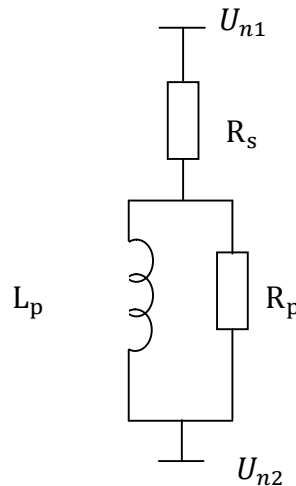


Figure II.3 : modèle d'un transformateur.

- **En régime normal**

$$R_s = \frac{1}{100} * \frac{U_{n2}^2}{S_n} \quad (\Omega) \quad (\text{II.8})$$

$$R_p = 20 * \frac{U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\Omega) \quad (\text{II.9})$$

$$L_p = \frac{U_{cc}}{100} * \frac{U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} \quad (\text{H}) \quad (\text{II.10})$$

- **En régime harmonique**

$$L_p = \frac{U_{cc}}{100} * \frac{U_{n2}^2}{\omega_0 P_{cc}} * h \quad (\text{H}) \quad (\text{II.11})$$

Avec S_n : puissance nominale du transformateur en (MVA).

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

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

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

* Dans notre exemple d'application, les transformateurs sont modélisés par leurs impédances de court-circuit.

Le schéma du modèle utilisé est représenté ci-dessous.

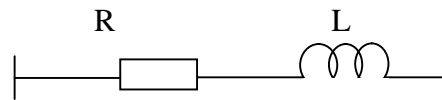


Figure II.4 : modèle utilisé

II.1.4. Modèle d'une batterie de condensateur :

La batterie de condensateur est modélisée par la réactance X_c

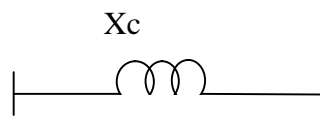


Figure II.5 : modèle d'une batterie de condensateur

- **En régime normal**

$$X_c = \frac{U_n^2}{Q} \quad (\Omega) \quad (\text{II.12})$$

- **En régime harmonique**

$$X_c(h) = \frac{U_n^2}{hQ} \quad (\Omega) \quad (\text{II.13})$$

Avec U_n : tension nominale (kV)

Q : puissance réactive en (Mvar)

II.1.5. Modèle d'un filtre en régime harmonique : [10]

Les valeurs des éléments sont obtenues en fonction de deux paramètres : la puissance réactive du filtre et son facteur de qualité.

$$C = \frac{Q_c}{\omega h U_n^2} \quad (\text{F}) \quad (\text{II.14})$$

$$L = \frac{1}{2\pi C F^2} \quad (\text{H}) \quad (\text{II.15})$$

$$R = \frac{L 2\pi f_0}{F} \quad (\Omega) \quad (\text{II.16})$$

Avec f_0 : fréquence d'accord en (hz)

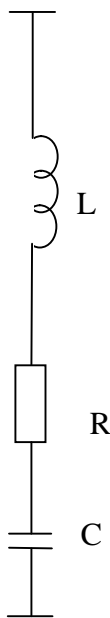
F : facteur de qualité

ω : Pulsation nominale en (rad.s^{-1})

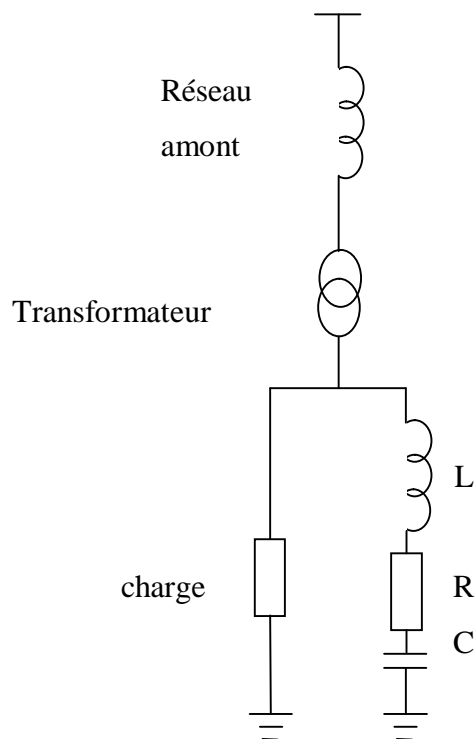
Q_c : puissance réactive du filtre en (Mvar)

Û Filtre résonnant

Un filtre résonnant est un ensemble d'éléments résistifs, inductifs et capacitifs en série, est placé en parallèle avec la charge, pour filtrer un courant à des fréquences particulières (basses fréquences de rang 5, 7,11).



-filtre résonnant série-

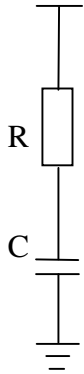


-filtre résonnant dans un réseau électrique-

Figure II.6 : modèle d'un filtre résonnant

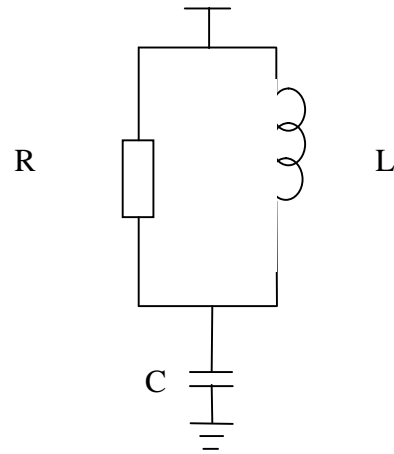
Û Filtre amorti

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, on l'utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre, et non une fréquence particulière. C'est un filtre « passe-haut », d'ordre 2.



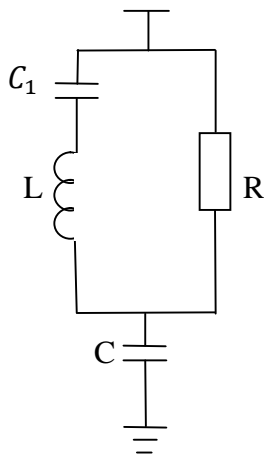
-Filtre en premier ordre-

$$Z = R + \frac{1}{jC\omega}$$



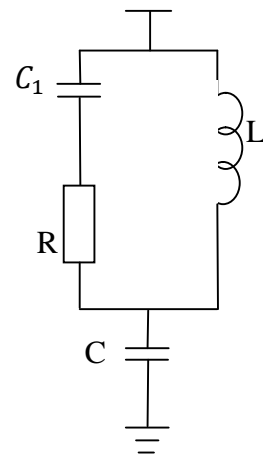
-Filtre en deuxième ordre-

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



-Filtre en amorti c-type-

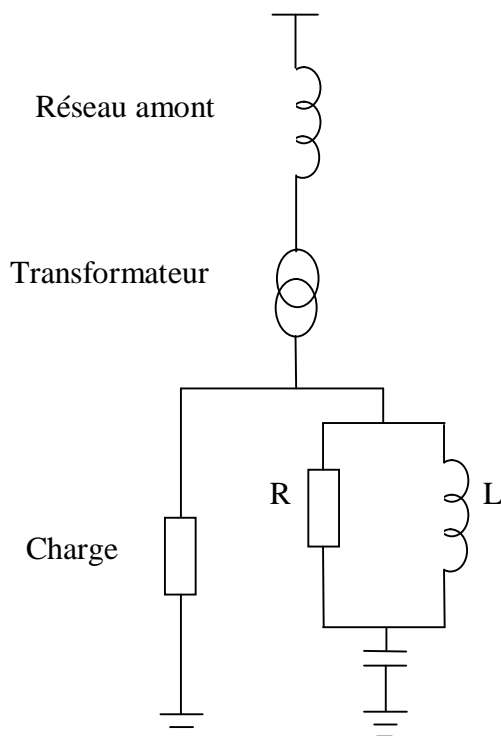
$$Z = \frac{1}{jC\omega} + \left[\frac{jRL\omega}{jL\omega + R(1 - LC\omega^2)} \right]$$



-Filtre en troisième ordre-

$$Z = \frac{1}{jC\omega} + \left[\frac{jRL\omega + \frac{L}{C}}{jL\omega + \left(R + \frac{1}{jC\omega} \right)} \right]$$

Le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre amorti, en aval d'un transformateur est représenté par la figure ci-dessous.



-Filtre amorti dans un réseau électrique-

Figure II.7 : Modèle des différents types du filtre amorti.

II.1.6. Modélisation d'une charge linéaire : [9]

Trois modèles des charges non perturbatrices sont proposés.

- Le premier modèle consiste à mettre en parallèle une résistance R avec une inductance X .

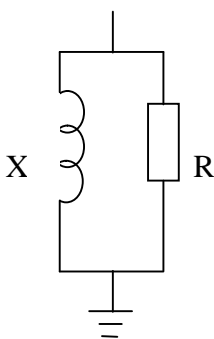


Figure II.8 : modèle d'une résistance en parallèle avec une inductance.

- **En régime normal**

$$R_p = \frac{U_n^2}{P} \quad (\Omega) \quad (\text{II.17})$$

$$X_p = \frac{U_n^2}{Q} \quad (\Omega) \quad (\text{II.18})$$

- **En régime harmonique**

$$X_p = \frac{U_n^2}{Q} * h \quad (\Omega) \quad (\text{II.19})$$

Avec P : puissance active de la charge en (Mw)

Q : puissance réactive de la charge en (Mvar)

U_n : Tension nominale de réseau en (kv)

- Le deuxième modèle est représenté par une résistance R_s en série avec une réactance X_s .

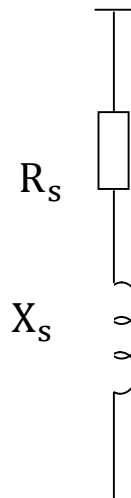


Figure II.9 : modèle d'une résistance en série avec une inductance.

- Le troisième modèle est représenté par une résistance R_s en série avec une réactance X_s qui est en parallèle avec une réactance X_p .

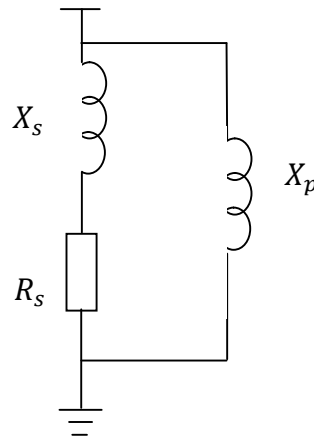


Figure II.10 : le troisième modèle.

- **En régime normal**

$$R_s = \frac{U_n^2}{p} \quad (\Omega) \quad (\text{II.20})$$

$$X_s = 0.073 * R_s \quad (\Omega) \quad (\text{II.21})$$

$$X_p = \frac{R_s}{6.7 \tan \varphi - 0.74} \quad (\Omega) \quad (\text{II.22})$$

$$\text{Avec } \tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (\text{II.23})$$

- **En régime harmonique**

$$X_s = 0.073 * R_s * h \quad (\Omega) \quad (\text{II.24})$$

$$X_p = \frac{R_s}{6.7 \tan \varphi - 0.74} * h \quad (\text{II.25})$$

Dans notre étude, nous avons utilisé le troisième modèle.

II.1.7. Modèle d'une machine synchrone :

Le modèle simple, le plus rencontré, consiste en la représentation de la machine pour la séquence directe et inverse par sa réactance subtransitoire comme le montre la figure(II.17)

En général, le générateur est isolé du réseau par un transformateur à couplage $Y\Delta$ et donc l'impédance homopolaire n'est pas importante dans ce cas.

L'inductance subtransitoire des machines synchrones est constante pour les harmoniques de rang inférieur. Cependant, le modèle de la figure ci-dessous est utilisé.

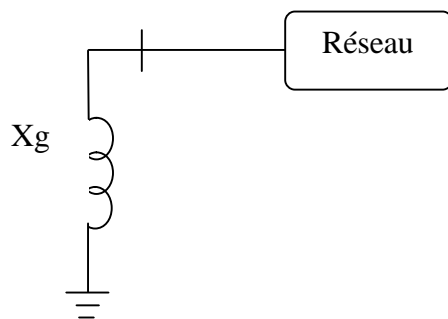


Figure II.11 : modèle harmonique de la machine synchrone.

II.2. Modèle d'une charge non linéaire :

Les charges non linéaires peuvent être modélisées comme l'addition de plusieurs sources de courant (une pour chaque composante fréquentielle) mises en parallèle.

1. Modèle du pont de Graëtz

Le redresseur alimenté par un réseau triphasé est représenté par la figure suivante :

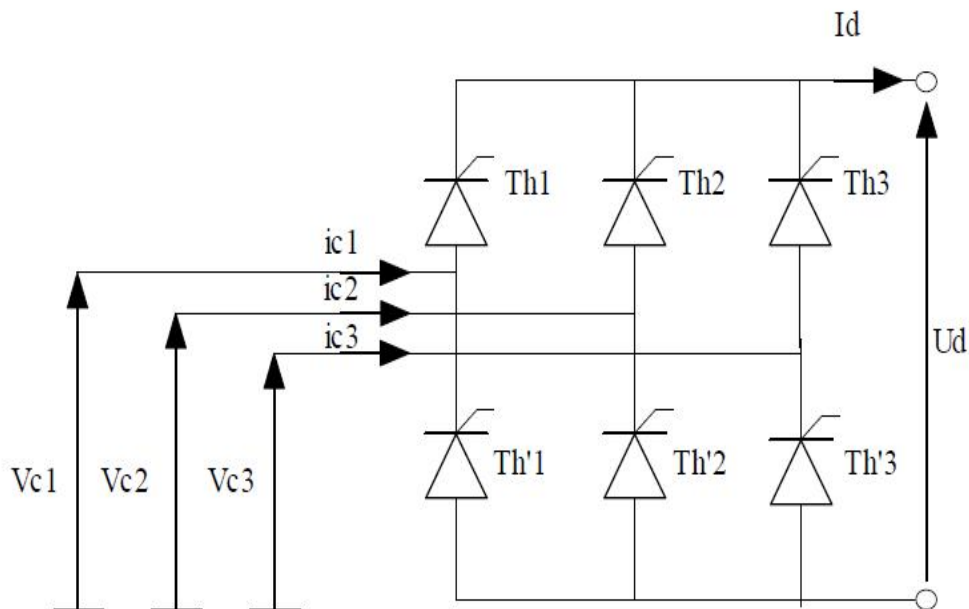


Figure II.12 : modèle du pont de Graëtz.

Chaque thyristor conduit pendant $\frac{T}{3}$.

Avec T : la période du courant i_c

Le courant $i_c(t)$ est décomposé en série de Fourier selon la formule suivante :

$$i_c(t) = \frac{2\sqrt{3}A}{\pi} \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \dots \right) \quad (\text{II.26})$$

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

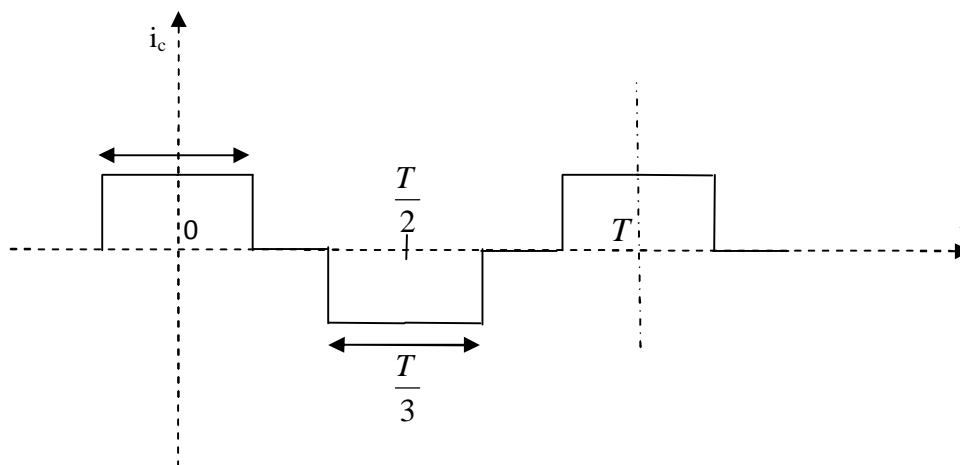


Figure II.13 : allure du courant dans une phase du réseau.

Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

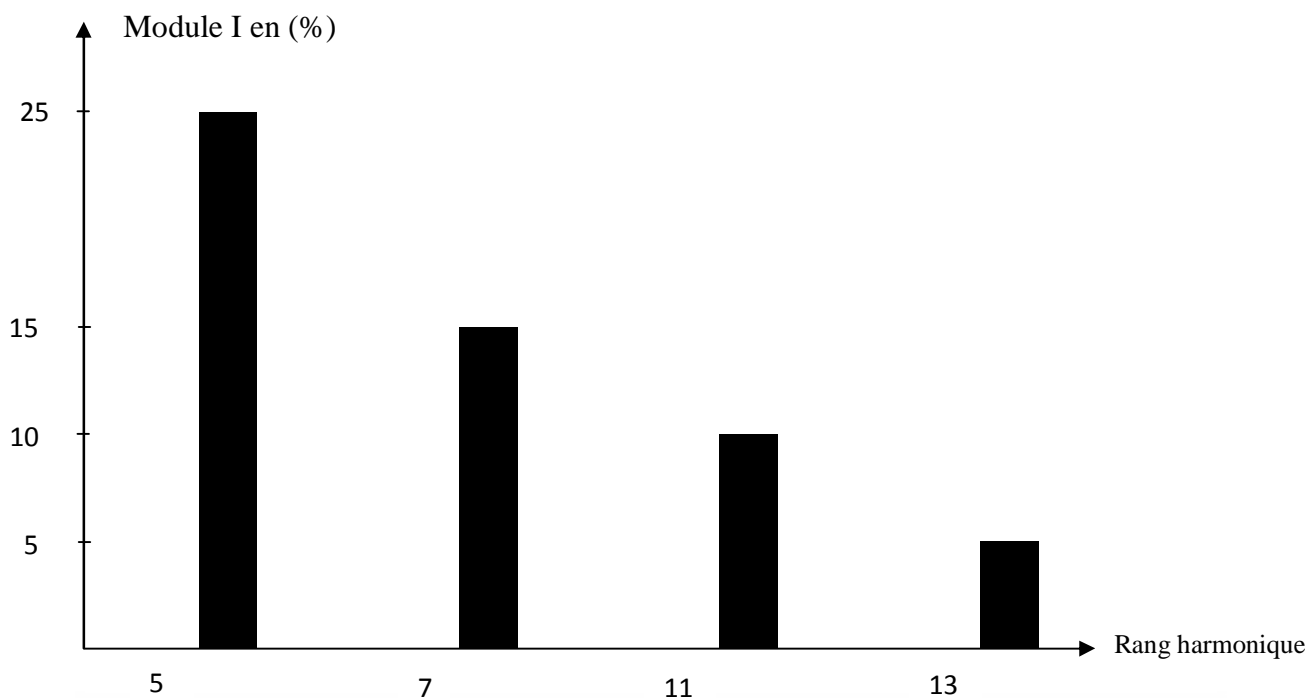
Le contenu de l'émission harmonique du redresseur triphasé à thyristors est donné dans le tableau ci-dessous.

Les seuls rangs présents sont de la forme : $h = 6k \pm 1$, avec k entier.

Rang harmonique	5	7	11	13
Module I_1 (en %)	25	15	10	5

Tableau II.1 : courant harmonique émis par un redresseur triphasé à thyristors.

Û Représentation spectrale



2. Pont dodécaphasé :

Deux redresseurs hexaphasés montés en série font composer ce pont, qui est le pont le plus utilisé (cas des puissances importantes). Donc, toujours dans le souci de repousser le premier harmonique présent sur un spectre pollué, l'association de deux ponts triphasés en série a été envisagée comme il est illustré sur le schéma de la figure ci-dessous :

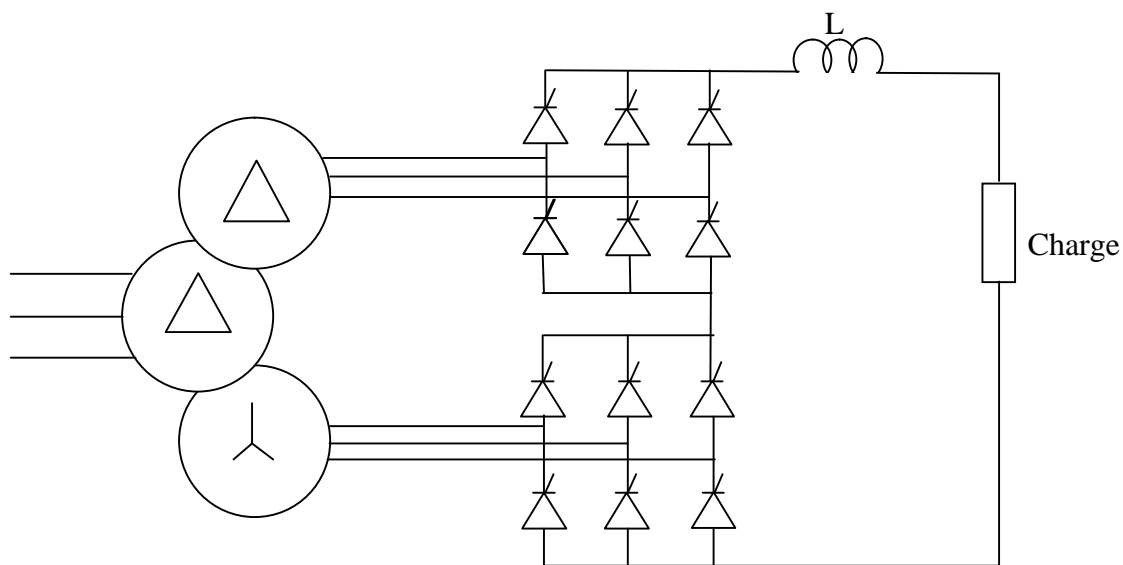


Figure II.14 : Montage dodécaphasé.

Ce montage présente l'avantage de diminuer considérablement les harmoniques de rangs 5, 7, 17, 19, En effet, en théorie, les seuls rangs harmoniques présents dans le spectre d'émission sont de la forme :

$$h = 12k \pm 1, k \text{ entier}$$

L'amplitude des courants harmoniques présents est fournie par la même formule que pour le pont hexaphasé.

Dans la réalité, les imperfections du montage génèrent des courants harmoniques dits « non caractéristiques » de rang 5, 7, 17, 19... de faible amplitude (de l'ordre de 20% du taux correspondant à un montage hexaphasé).

3. Modèle d'une bobine contrôlée par thyristors (TCR) [9]

Le TCR se compose principalement d'une inductance en série avec deux thyristors montés en tête bêche.

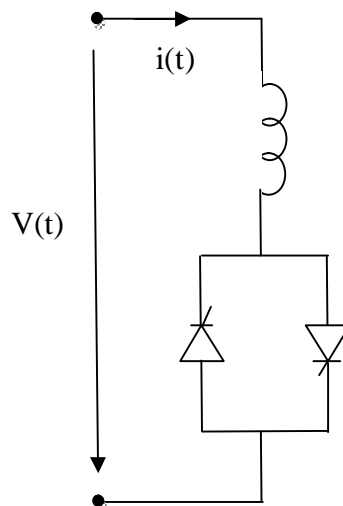


Figure II.15 : Représentation de la bobine contrôlée par thyristors (TCR)

Les deux thyristors conduisent chaque demi-cycle de la fréquence fondamentale. La durée de conduction dépend des angles d'amorçage α des thyristors.

La génération d'harmonique dans le TCR dépend de son angle de conduction (σ), qui est lui-même fonction des conditions de fonctionnement du réseau.

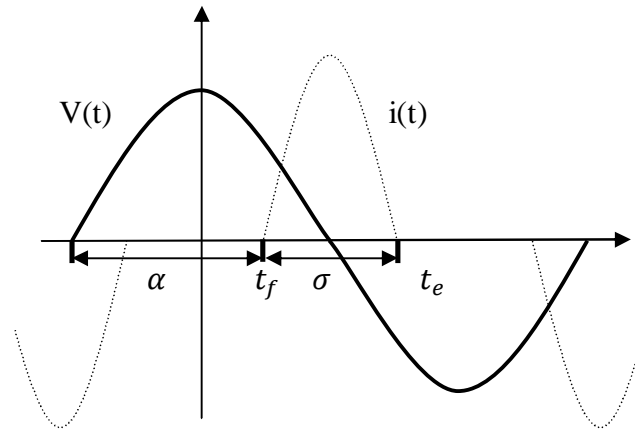


Figure II.16 : Formes d'ondes.

II.3. Méthode utilisée pour l'évaluation de la distorsion harmonique dans le réseau :

Plusieurs approches existent pour l'étude et l'analyse des harmoniques dans les réseaux électriques.

L'approche classique est basée sur le calcul de l'impédance équivalente du réseau au point considéré et la détermination des tensions harmoniques en ce même point pour chaque source de courants harmoniques.

La méthode utilisée dans notre travail, consiste à déterminer les niveaux des tensions harmoniques par injection des courants au nœud perturbateur, moyennant la matrice impédance nodale $[Z_{BUS}]$.

L'étude se fait dans le domaine fréquentiel, où les éléments non linéaires sont modélisés par des sources de courants et le réseau linéaire est représenté par des admittances, pour chaque rang harmonique.

Dans notre méthode, nous avons à résoudre le système

$$[V^{(h)}] = [Y^{(h)}]^{-1} * [I^{(h)}] \quad (II.27)$$

Où : $[V^{(h)}]$ est le vecteur des tensions harmoniques aux nœuds du réseau, pour le rang h.

$[I^{(h)}]$ vecteur des courants injectés aux différents nœuds du réseau pour le rang h tel que

$$I^{(h)} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ I_p^{(h)} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$I_p^{(h)}$ représente le courant harmonique injecté au nœud pollueur.

$[Y_{BUS}^{(h)}]$ représente la matrice admittance nodale du réseau pour le rang h.

$$\text{Avec :} \quad [Y_{BUS}^{(h)}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}^{(h)} \quad (\text{II.29})$$

L'élément diagonal $Y_{ii}^{(h)} = \sum_{j=1}^n y_{ij}^{(h)}$.

L'élément non diagonal $Y_{ij}^{(h)} = -y_{ij}^{(h)}$.

Avec $y_{ij}^{(h)}$: admittance de la ligne i-j au rang h.

* organigramme de la méthode de calcul :

L'organigramme de la figure II.17, décrit le processus de calcul :

- 1- Lecture des données ;
- 2- Calcul de $Z_{BUS}^{(h)}$ et de $Y_{BUS}^{(h)}$ pour les rangs h = 5, 7 et 11;
- 3- Injection des courants harmoniques ;
- 4- Calcul de $V_{BUS}^{(h)}$;
- 5- Calcul des TDH ;

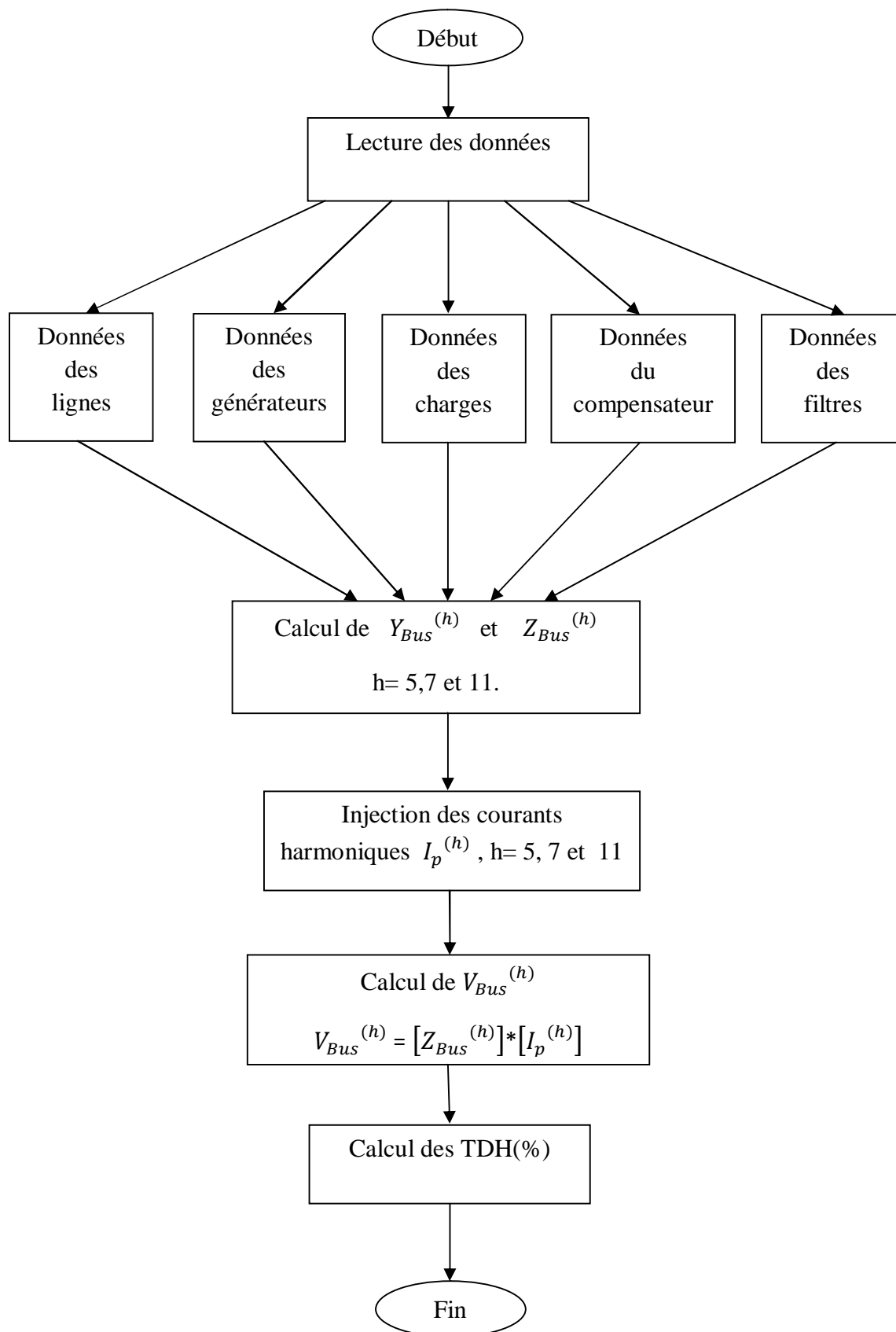


Figure II.17 : Organigramme de la méthode de calcul.

Introduction

Un réseau test de 14 nœuds [1], a été choisi pour appliquer notre méthode de calcul.

Dans ce réseau de transport, on note la présence de deux sources génératrices d'harmoniques : la liaison à courant continu HVDC au nœud 3 et le compensateur statique SVC au nœud 8.

Le programme réalisé sous MATLAB, permet le calcul de la distorsion harmonique de la tension aux différents jeux de barres du réseau.

Différentes configurations ont été étudiées :

- Présence du HVDC seul.
- Présence du SVC seul.
- Présence du HVDC + SVC.
- Effet des filtres sur les taux de distorsion harmonique.

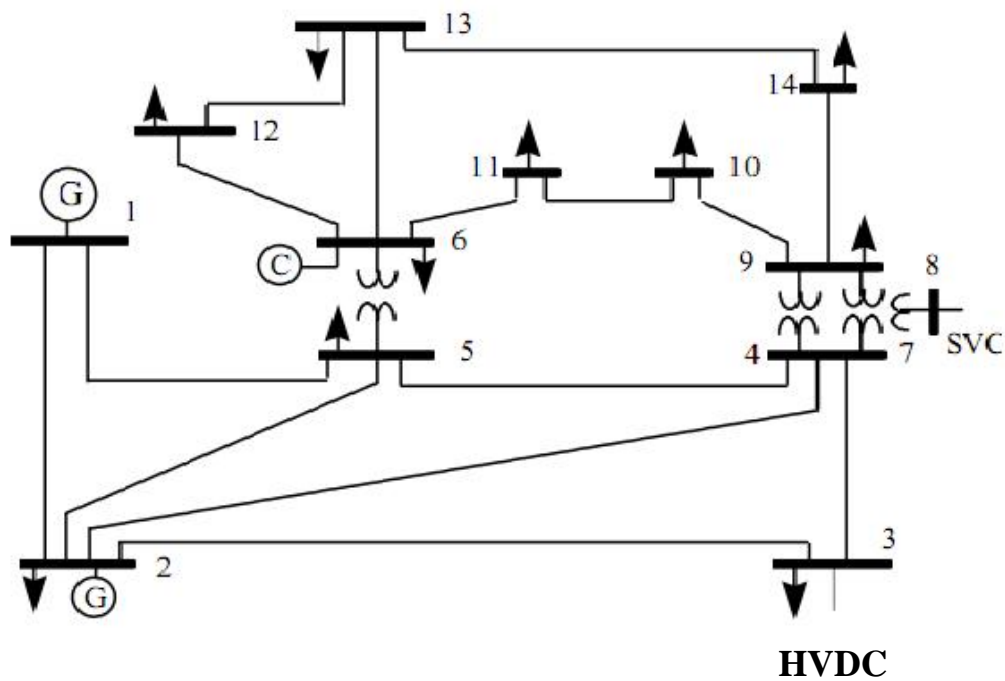


Figure III.1 : Schéma du réseau à 14 nœuds.

III.1. Données du réseau : [1]

- **Données aux nœuds**

Nœud	Tension nominale (kV)	Pch (kW)	Qch (kvar)	Module de la tension (pu)	Phase de la tension (°)
1	230	0	0	1.0600	0.00
2	230	0	0	1.0450	-5.68
3	230	0	0	1.0427	-15.30
4	230	47790	-3900	1.0282	-11.41
5	230	7599	1599	1.0337	-9.82
6	230	0	0	1.0700	-15.87
7	230	0	0	1.0193	-14.47
8	13.8	0	12900	1.0209	-14.49
9	115	29499	16599	1.0147	-16.09
10	115	9000	5799	1.0168	-16.33
11	115	3501	1800	1.0394	-16.21
12	115	6099	1599	1.0528	-16.72
13	115	13500	5799	1.0458	-16.73
14	115	14901	5001	1.0154	-17.39
15	35.4	59505	3363	1.0417	-16.18
16	35.4	59505	3363	1.0417	-16.18

Tableau III.1 : Résultats de l'écoulement de puissance (tensions) et puissances mises en jeu aux nœuds [1].

Les valeurs de base :

$$S_b = 100 \text{ MVA}$$

$$V_{b1} = 230 \text{ KV}$$

$$V_{b1} = 115 \text{ KV}$$

- **Données des lignes et des transformateurs**

Ligne p-q	Nœud p	Nœud q	R1 (pu)	X1 (pu)	B1 (pu)
Xfmr (Y-Y)	4	7	0.00000	0.20900	0.00000
Xfmr (Y-Y)	4	9	0.00000	0.55618	0.00000
Xfmr (Y-Y)	5	6	0.00000	0.25020	0.00000
Ligne	6	11	0.09495	0.19887	0.00000
Ligne	6	12	0.12285	0.25575	0.00000
Ligne	6	13	0.06613	0.13024	0.00000
Xfmr (Y-Δ)	7	8	0.00000	0.17615	0.00000
Xfmr (Y-Y)	7	9	0.00000	0.11000	0.00000
Ligne	9	10	0.03181	0.08448	0.00000
Ligne	9	14	0.01270	0.27033	0.00000
Ligne	10	11	0.08203	0.19202	0.00000
Ligne	12	13	0.22087	1.19985	0.00000
Ligne	13	14	0.17089	0.34795	0.00000
Ligne	1	2	0.01937	0.05916	0.05279
Ligne	1	5	0.05402	0.22300	0.04920
Ligne	2	3	0.04697	0.19794	0.04380
Ligne	2	4	0.05810	0.17628	0.03740
Ligne	2	5	0.06700	0.17384	0.03386
Ligne	3	4	0.01335	0.17099	0.03460
Ligne	4	5	0.52510	0.04209	0.01280
Xfmr (Y-Y)	3	15	0.00000	0.02800	0.00000
Xfmr (Y-Δ)	3	16	0.00000	0.02800	0.00000

- **Puissances aux nœuds générateurs**

Les données des puissances mises en jeu sont représentées au tableau ci-dessous.

Nœud	Type	Tension (pu)	P gen (kW)	Q gen (kvar)	X (p.u)
1	Bilan	1.0600	261.681	-28.633	0.2500
2	PV	1.0450	18.200	5.857	0.2500
6	PV	1.0700	-11.200	44.2	0.2500

- **Données des filtres**

Les filtres utilisés aux nœuds 3 et 8 sont accordés aux rangs harmoniques 5, 7 et 11 dont les paramètres sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Rang harmonique	Nœud p	Nœud q	R1 (pu)	X1(pu)	B1 (pu)
5	8	0	0.52510	1.32635	0.03015
7	8	0	0.52510	0.67307	0.03015
11	8	0	0.00136	0.27515	0.03015
11	3	0	0.00136	0.02772	0.24916
11	3	0	0.00136	0.02772	0.24916

- **Données du compensateur**

Nœud p	Nœud q	R1 (pu)	X1(pu)	B1 (pu)
9	0	0.00000	0.00000	0.06330

III.2. Données des sources d'harmoniques

III.2.1. la station à haute tension continue (HVDC)

La station à haute tension continue (HVDC) est représentée par deux convertisseurs de puissance en pont de Graëtz, alimentés par un transformateur à deux enroulements secondaires avec des couplages Y-Y et Y- Δ (fig.II.1).

Les données du transformateur sont les suivants :

$$S = 135 \text{ MVA}$$

$$230\text{kV} / 35.42 \text{ kV}$$

$$X = 2.8\%$$

Le filtre F est composé de deux filtres résonnants avec $C=1.5 \mu\text{F}$, $L=39\text{mH}$ et $R= 300\Omega$.

La puissance transmise côté continu est de 100MW sous une tension de 83.3kV.

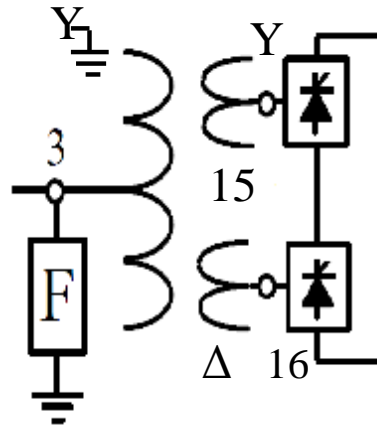


Figure III.2 : représentation du HVDC.

Dans notre programme de calcul, nous avons représenté le HVDC par deux sources de courants aux nœuds 15 et 16, le spectre harmonique de chaque source est donné par le tableau ci-dessous.

Rang harmonique	HVDC	
	Module (p.u)	Angle (deg)
1	1.0000	-49.56
5	0.1941	-67.77
7	0.1309	11.90
11	0.0758	-7.13
13	0.0586	68.57
17	0.0379	46.53
19	0.0329	116.46
23	0.0226	87.47
25	0.0241	159.32
29	0.0193	126.79

III.2.2. Le compensateur statique (SVC)

Le compensateur statique composé de bobines contrôlées par thyristors (SVC), est alimenté par un transformateur à trois enroulements 230kV / 115kV / 13.8kV.

Le compensateur statique est composé aussi d'un ensemble de filtres résonnants accordés aux rangs harmoniques 5, 7 et 11.

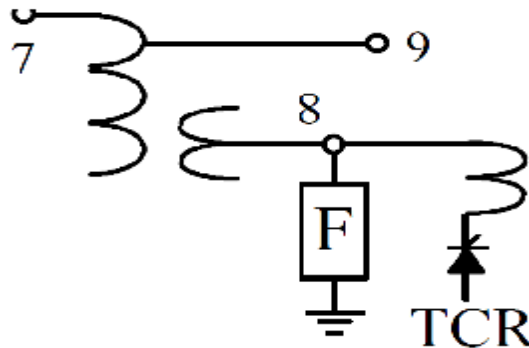


Figure III.3 : représentation d'un SVC.

Dans notre programme de calcul, nous avons représenté le TCR par une source de courant dont le spectre harmonique est donné par le tableau suivant.

Rang harmonique	SVC	
	Module (p.u)	Angle (deg)
1	1.0000	46.92
5	0.0702	-124.40
7	0.0250	-29.87
11	0.0136	-23.75
13	0.0075	71.50
17	0.0062	77.12
19	0.0032	173.43
23	0.0043	178.02
25	0.0013	-83.45
29	0.0040	-80.45

III.3. Calcul de la distorsion harmonique :

Nous présentons, les résultats de calcul pour trois cas, à savoir la présence du SVC seul, du HVDC seul et des deux sources polluantes ensemble.

L'effet des filtres sera également examiné.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux ci-dessous.

1. Réseau avec HVDC seul connecté au nœud 3.

A / Sans filtrage

Nœud	Tension harmonique	TDHi(%)
	Harmonique 11	
1	0.2521 L -96.7239°	23.7830
2	0.1658 L -93.5255°	15.8660
3	0.4530 L 72.2273°	43.4449
4	0.0349 L -126.6268°	3.3942
5	0.1119 L -108.0666°	10.8251
6	0.0471 L -143.2823°	4.4018
7	0.0661 L -173.3250°	6.4848
8	0.0661 L -173.3250°	6.4746
9	0.0893 L 178.0552°	8.8006
10	0.0774 L 179.1226°	7.6121
11	0.0585 L -168.4389°	5.6282
12	0.0454 L -154.7230°	4.3123
13	0.0462 L -159.3256°	4.4176
14	0.0643 L 176.0791°	6.3332
15	0.4759 L 72.7465°	45.6849
16	0.4759 L 72.7465°	45.6849

Tableau III.2 : tensions harmoniques et taux de distorsions harmoniques lorsque seul le HVDC est connecté au réseau, sans filtres.

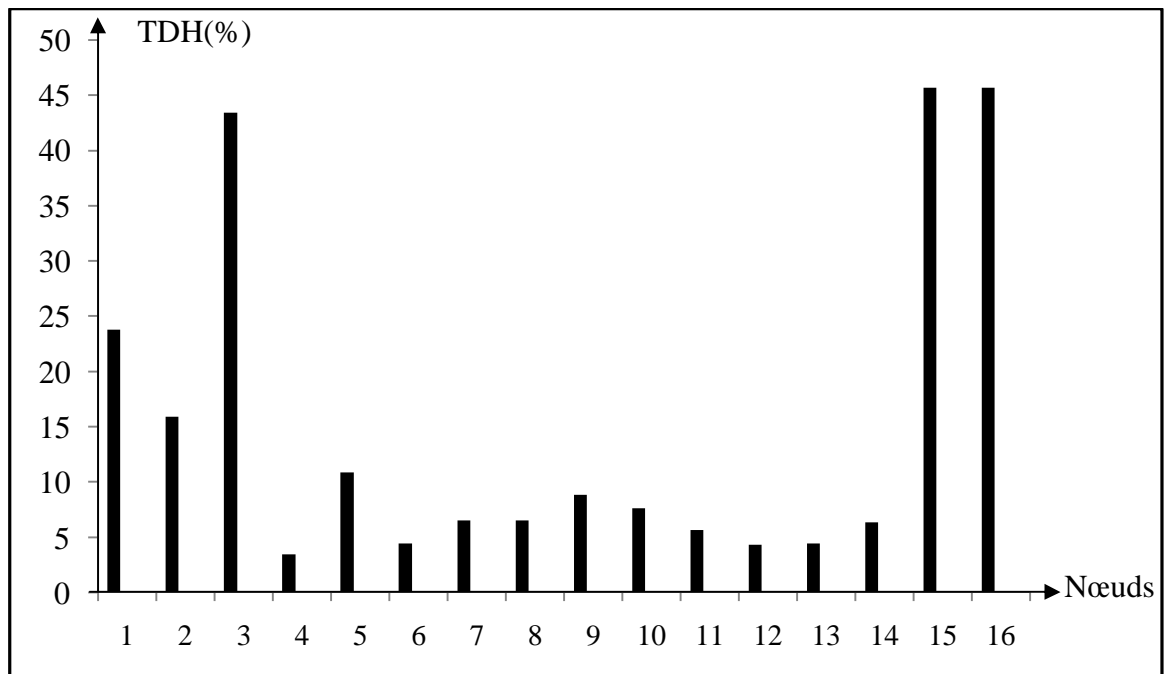


Figure III.4 : Taux de distorsion harmonique aux nœuds en présence du HVDC seul et sans filtrage.

Commentaires :

Les taux de distorsion harmonique de la tension sont très importants, surtout aux nœuds 3(43%), 15(45%) et 16(45%).

La tension est très fortement perturbée d'où la nécessité de placer les filtres au niveau du nœud 3.

B / Avec filtrage

Nœud	Tension harmonique	TDHi(%)
	Harmonique 11	
1	0.0026 ∠ 95.3437°	0.2452
2	0.0017 ∠ 98.5421°	0.1626
3	0.0046 ∠ -95.7051°	0.4411
4	0.0004 ∠ 65.4408°	0.0389
5	0.0011 ∠ 84.0010°	0.1064
6	0.0005 ∠ 48.7853°	0.0467
7	0.0007 ∠ 18.7426°	0.0686
8	0.0007 ∠ 18.7423°	0.0685
9	0.0009 ∠ 10.1228°	0.0886
10	0.0008 ∠ 11.1902°	0.0786
11	0.0006 ∠ 23.6287°	0.0577
12	0.0005 ∠ 37.3446°	0.0474
13	0.0005 ∠ 32.7420°	0.0478
14	0.0006 ∠ 8.1468°	0.0590
15	0.0188 ∠ 82.5276°	1.8047
16	0.0188 ∠ 82.5276°	1.8047

Tableau III.3 : tensions harmoniques et taux de distorsions harmoniques lorsque seul le HVDC est connecté au réseau, avec filtres.

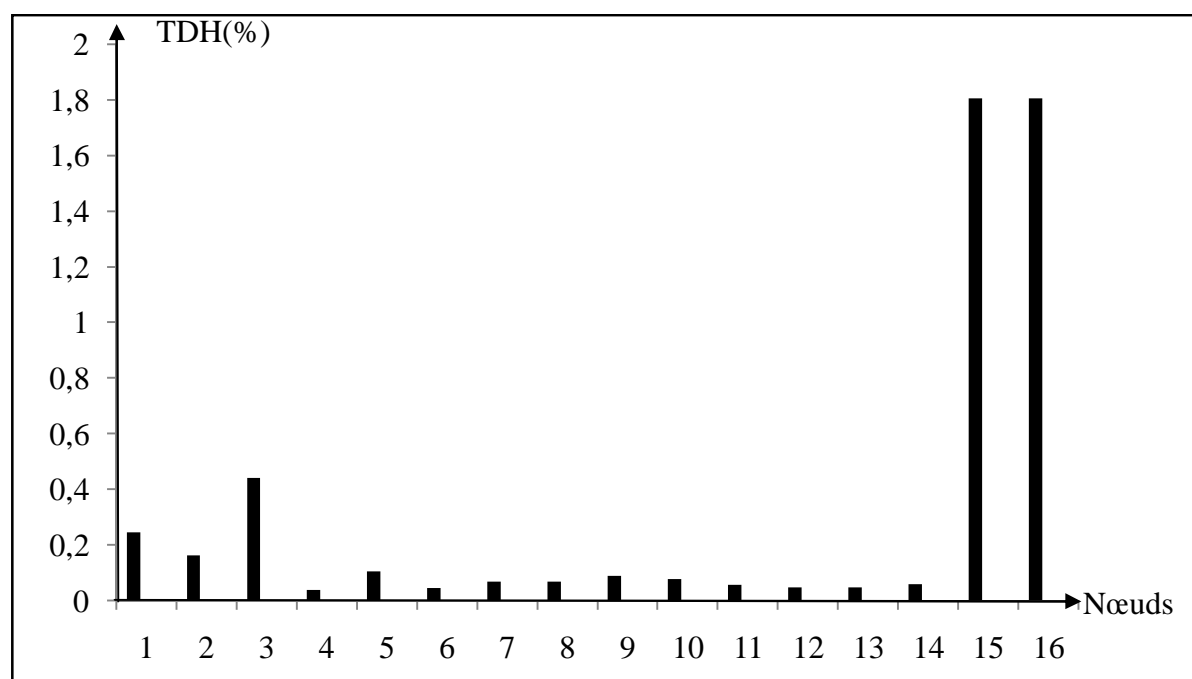


Figure III.5 : Taux de distorsion harmonique aux nœuds en présence du HVDC seul et avec filtrage.

Commentaires :

Les deux filtres résonnants accordés au rang 11, réduisent d'une manière significative les taux de distorsion harmonique de la tension aux différents nœuds du réseau.

2. Réseau avec SVC seul connecté au nœud 8

A / Sans filtrage

Nœud	Tensions harmoniques			TDH(%)
	Harmonique 5	Harmonique 7	Harmonique 11	
1	0.0430L 172.5948°	0.0116L -124.7564°	0.0100L 177.2047°	4.3062
2	0.0461L 172.3867°	0.0118L -124.9431°	0.0086L 176.6036°	4.6274
3	0.0557L 171.8164°	0.0136L -125.7377°	0.0059L 170.2676°	5.5278
4	0.0453L 172.8400°	0.0062L -122.7354°	0.0060L -5.4476°	4.4849
5	0.0456L 172.2972°	0.0080L -123.1608°	0.0033L -16.6784°	4.4900
6	0.0210L 175.4413°	0.0016L -12.2579°	0.0101L -19.9878°	2.1829
7	0.0189L -107.6783°	0.0186L 50.2843°	0.0292L 12.6484°	3.8696
8	0.0696L -49.4239°	0.0491L 56.4279°	0.0495L 37.9660°	9.6498
9	0.0190L -152.9840°	0.0130L 37.4896°	0.0342L -8.2820°	4.0629
10	0.0187L -160.7547°	0.0107L 34.1065°	0.0289L -11.5679°	3.5451
11	0.0194L -173.9758°	0.0060L 27.3328°	0.0193L -15.0074°	2.6953
12	0.0209L 172.9559°	0.0023L -1.1524°	0.0112L -25.3243°	2.2628
13	0.0206L 174.3457°	0.0030L 5.7862°	0.0124L -24.8902°	2.3169
14	0.0195L -173.6587°	0.0084L 24.6841°	0.0229L -20.4487°	3.0754
15	0.0557L 171.8164°	0.0136L -125.7377°	0.0059L 170.2676°	5.5331
16	0.0557L 171.8164°	0.0136L -125.7377°	0.0059L 170.2676°	5.5331

Tableau III.4 : tensions harmoniques et taux de distorsions harmoniques lorsque seul le SVC est connecté au réseau, sans filtres.

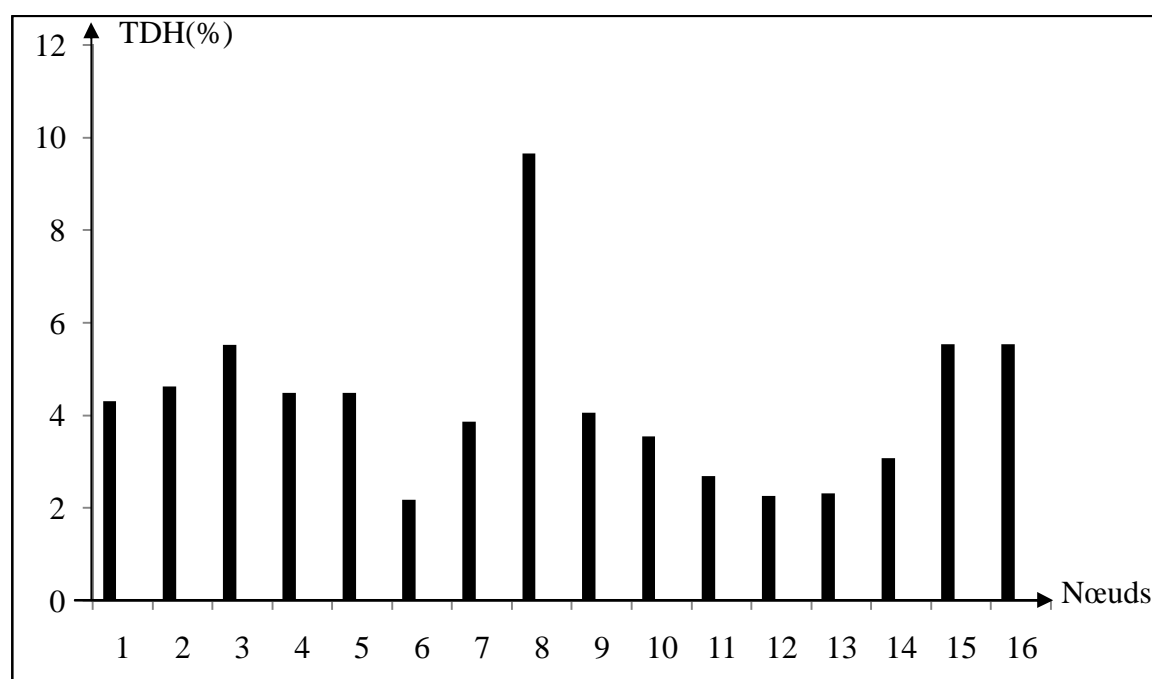


Figure III.6 : Taux de distorsion harmonique aux nœuds en présence du SVC seul et sans filtrage.

Commentaires :

Les TDH sont assez importants surtout au niveau des nœuds 8(9%), 15(5%) et 16(5%).

B / Avec filtrage

Nœud	Tensions harmoniques			TDH(%)
	Harmonique 5	Harmonique 7	Harmonique 11	
1	0.0143L -170.2636°	0.0030L 160.9158°	0.0013L 123.5913°	1.3838
2	0.0156L -170.4597°	0.0030L 160.7291°	0.0011L 122.9903°	1.5238
3	0.0193L -170.8511°	0.0035L 159.9345°	0.0008L 116.6543°	1.8827
4	0.0192L -170.6619°	0.0016L 162.9368°	0.0008L -59.0610°	1.8754
5	0.0179L -171.2357°	0.0020L 162.5114°	0.0004L -70.2917°	1.7428
6	0.0120L -172.4906°	0.0004L -86.5857°	0.0013L -73.6011°	1.1286
7	0.0200L -144.5352°	0.0048L -24.0435°	0.0039L -40.9649°	2.0538
8	0.0297L -112.5996°	0.0126L -17.8999°	0.0066L -15.6473°	3.2256
9	0.0190L -161.0004°	0.0033L -36.8382°	0.0046L -61.8953°	1.9538
10	0.0175L -164.2213°	0.0028L -40.2213°	0.0038L -65.1812°	1.7825
11	0.0148L -168.4207°	0.0015L -46.9950°	0.0026L -68.6207°	1.4528
12	0.0127L -176.1834°	0.0006L -75.4802°	0.0015L -78.9376°	1.2160
13	0.0131L -175.9340°	0.0008L -68.5416°	0.0016L -78.5035°	1.2642
14	0.0166L -172.5213°	0.0022L -49.6437°	0.0030L -74.0620°	1.6753
15	0.0193L -170.8511°	0.0035L 159.9345°	0.0008L 116.6543°	1.8845
16	0.0193L -170.8511°	0.0035L 159.9345°	0.0008L 116.6543°	1.8845

Tableau III.5 : tensions harmoniques et taux de distorsions harmoniques lorsque seul le SVC est connecté au réseau, avec filtres.

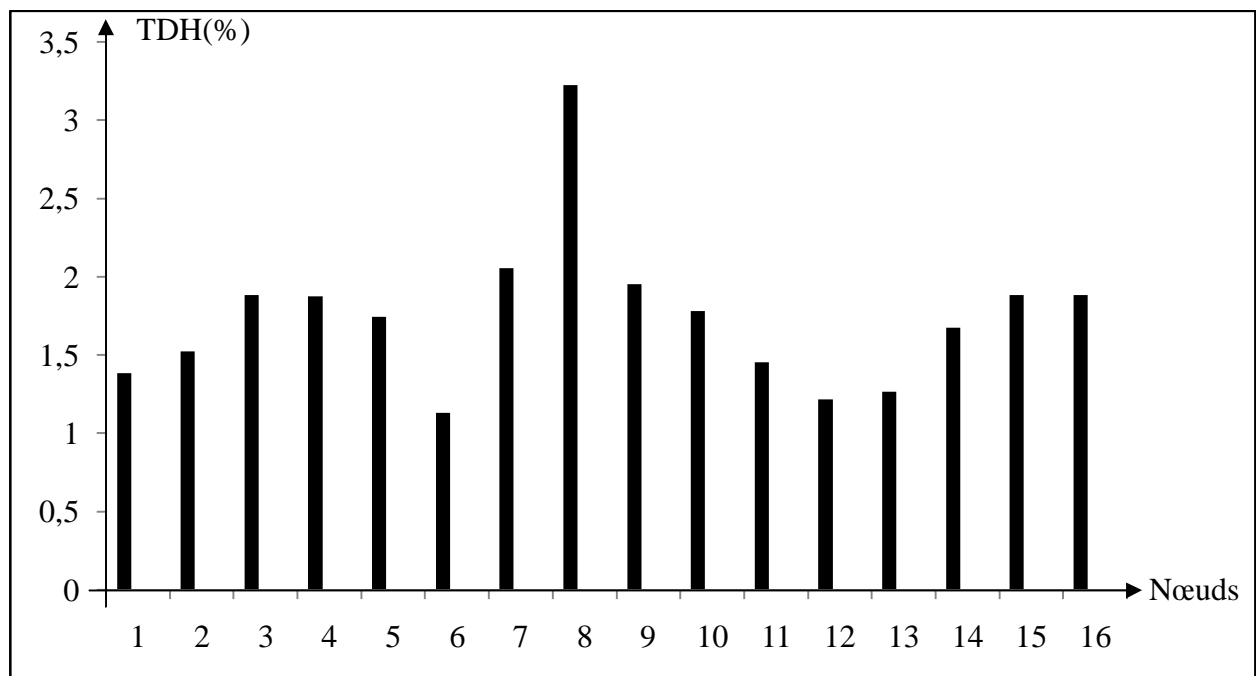


Figure III.7 : Taux de distorsion harmonique aux nœuds en présence du SVC seul et avec filtrage.

Commentaires :

Les taux de distorsion harmonique de la tension ont diminué sensiblement après utilisation des trois filtres résonnants accordés aux rangs 5, 7 et 11, au niveau du jeu de barre 8.

3. Réseau en présence du SVC + HVDC

A / Sans filtrage

Nœud	Tensions harmoniques			TDH(%)
	Harmonique 5	Harmonique 7	Harmonique 11	
1	0.0430L 172.5948°	0.0116L -124.7564°	0.2530L -98.9947°	24.2349
2	0.0461L 172.3867°	0.0118L -124.9431°	0.1660L -96.4970°	16.5249
3	0.0557L 171.8164°	0.0136L -125.7377°	0.4522L 72.9674°	43.7153
4	0.0453L 172.8400°	0.0062L -122.7354°	0.0323L -117.4794°	5.4445
5	0.0456L 172.2972°	0.0080L -123.1608°	0.1119L -106.3723°	11.7151
6	0.0210L 175.4413°	0.0016L -12.2579°	0.0424L -131.8038°	4.4245
7	0.0189L -107.6783°	0.0186L 50.2843°	0.0372L -178.0235°	4.4818
8	0.0696L -49.4239°	0.0491L 56.4279°	0.0350L 139.5373°	9.0201
9	0.0190L -152.9840°	0.0130L 37.4896°	0.0554L -178.0342°	5.9123
10	0.0187L -160.7547°	0.0107L 34.1065°	0.0493L -174.6445°	5.2913
11	0.0194L -173.9758°	0.0060L 27.3328°	0.0421L -156.5949°	4.4969
12	0.0209L 172.9559°	0.0023L -1.1524°	0.0393L -142.0475°	4.2335
13	0.0206L 174.3457°	0.0030L 5.7862°	0.0385L -146.0692°	4.1850
14	0.0195L -173.6587°	0.0084L 24.6841°	0.0429L -175.2064°	4.7140
15	0.0350L 148.6434	0.0193L 133.2888	0.4752L 73.4517°	45.7788
16	0.0803L -178.3931	0.0362L -94.2081	0.4752L 73.4517°	46.3947

Tableau III.6 : tensions harmoniques et taux de distorsions harmoniques lorsque le HVDC et le SVC sont connectés au réseau, sans filtres.

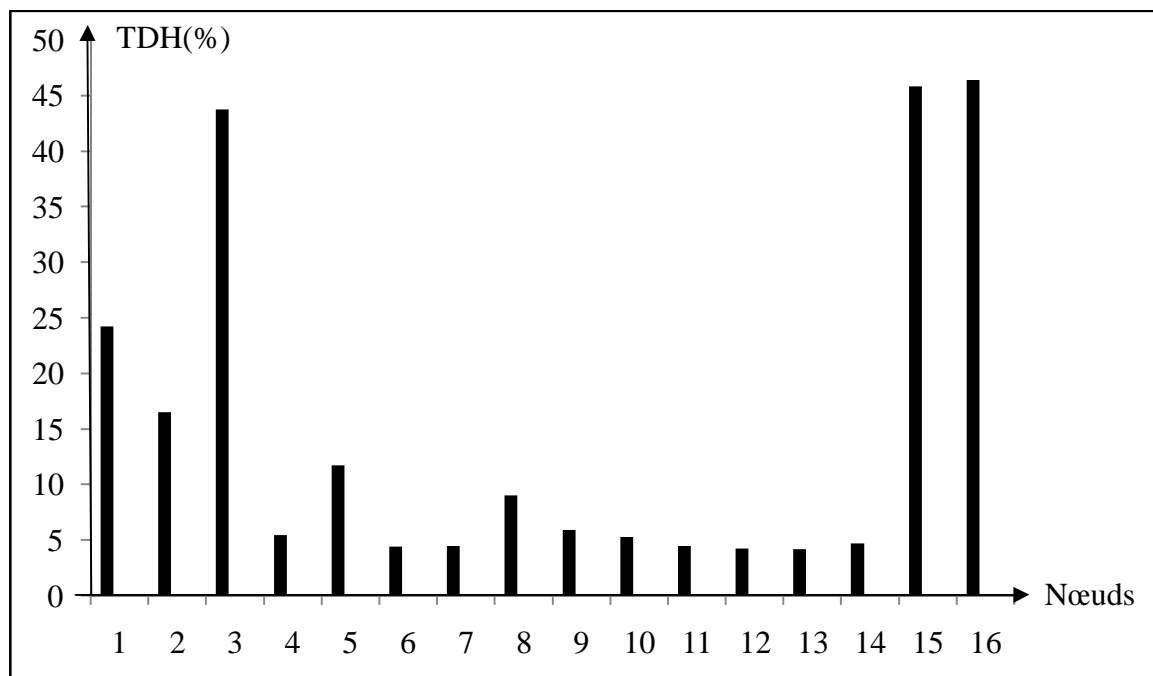


Figure III.8 : Taux de distorsion harmonique aux nœuds en présence du HVDC et du SVC et sans filtrage.

Commentaires :

La qualité de la tension est très fortement perturbée, notamment au niveau des nœuds pollueurs 3(TDH = 43%), 15 et 16(45%).

B / Avec filtrage

Nœud	Tensions harmoniques			TDH(%)
	Harmonique 5	Harmonique 7	Harmonique 11	
1	0.0186L 123.7953°	0.0123L -125.0557°	0.0041L 104.9492°	2.1389
2	0.0199L 123.5885°	0.0126L -125.2424°	0.0030L 107.9647°	2.2721
3	0.0240L 123.0220°	0.0145L -126.0370°	0.0046L -95.6464°	2.7251
4	0.0195L 124.0485°	0.0066L -123.0347°	0.0006L -31.1524°	2.0030
5	0.0197L 123.4924°	0.0085L -123.4601°	0.0009L 80.1370°	2.0774
6	0.0090L 126.4204°	0.0017L -12.5573°	0.0010L -53.3722°	0.8610
7	0.0083L -157.6930°	0.0198L 49.9850°	0.0040L -35.3142°	2.1425
8	0.0296L -100.5890°	0.0523L 56.1286°	0.0067L -15.8808°	5.8712
9	0.0078L 158.4688°	0.0139L 37.1902°	0.0045L -53.5228°	1.6322
10	0.0078L 150.4557°	0.0114L 33.8072°	0.0038L -56.1028°	1.4089
11	0.0082L 136.9560°	0.0064L 27.0335°	0.0024L -56.8859°	1.0270
12	0.0089L 123.9155°	0.0025L -1.4518°	0.0012L -61.7474°	0.8854
13	0.0088L 125.3006°	0.0032L 5.4869°	0.0013L -62.9780°	0.9039
14	0.0081L 137.3732°	0.0089L 24.3848°	0.0029L -63.9111°	1.2190
15	0.0327L 68.3329°	0.0192L 135.8939°	0.0187L 82.5127°	4.0587
16	0.0395L 165.5675°	0.0370L -95.0182°	0.0187L 82.5127°	5.4969

Tableau III.7 : tensions harmoniques et taux de distorsions harmoniques lorsque le HVDC et le SVC sont connectés au réseau, avec filtres.

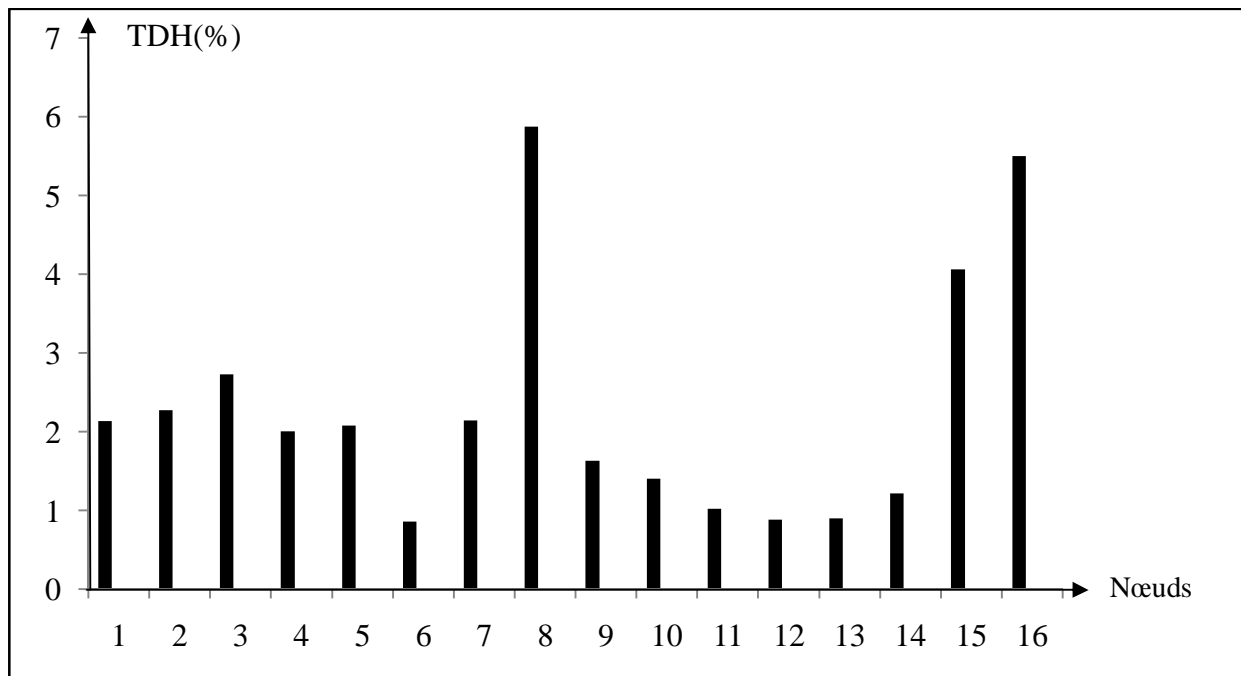


Figure III.9 : Taux de distorsion harmonique aux nœuds en présence du HVDC et du SVC et avec filtrage.

Commentaires :

Nous constatons une nette diminution des TDH de la tension après filtrage.

Le nœud 8 présente le plus fort TDH avec 5.87%.

4. Comparaison des TDH en fonction de la nature de la charge polluante raccordée

Nous présentons dans les deux courbes suivantes une récapitulation des résultats donnés dans les tableaux précédents.

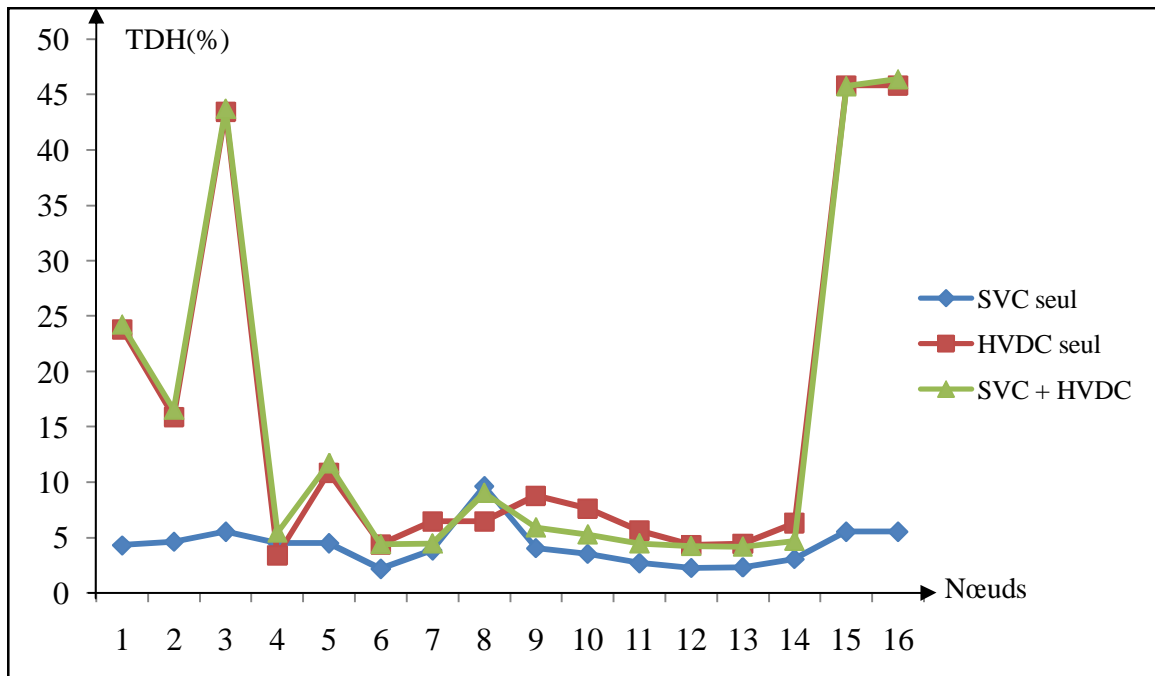


Figure III.10 : Variation de la distorsion harmonique de la tension en fonction de la charge polluante connectée aux jeux de barres, sans filtres.

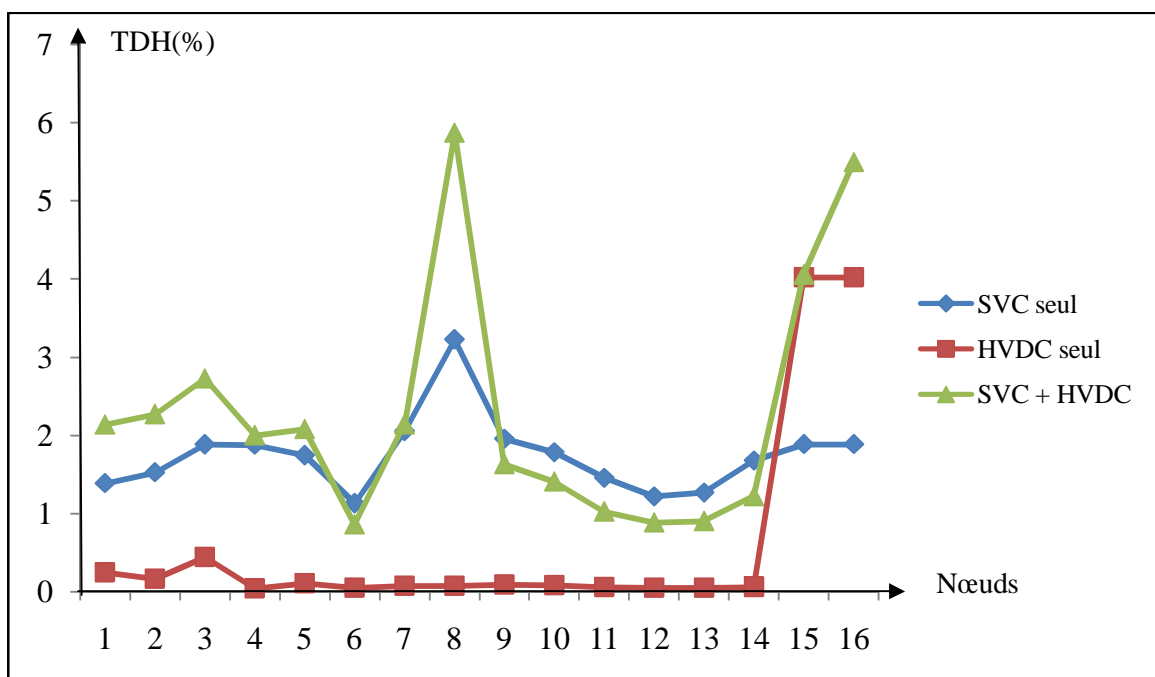


Figure III.11 : Variation de la distorsion harmonique de la tension en fonction de la charge polluante connectée aux jeux de barres, avec filtrage.

5. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus précédemment, nous constatons que :

- La distorsion harmonique se propage à travers tout le réseau.
- Une grande distance d'un nœud quelconque par rapport au nœud pollueur, ne signifie pas moins de distorsion (par exemple : au nœud 1 TDH=24% et au nœud 2 TDH=16%), en effet la propagation des harmoniques à travers le réseau dépend des impédances de lignes et transformateurs ainsi que des charges linéaires raccordées aux différents jeux de barres.
- La présence des deux sources harmoniques ensemble n'apporte pas une augmentation sensible de la pollution harmonique (figure III.10 et III.11), cela peut être expliqué par le phénomène de foisonnement des harmoniques.

6. Comparaison entre les résultats trouvés et ceux publiés dans la référence [1]

Nœud	TDH calculé (%)	TDH publié (%)
1	2.1389	1.767
2	2.2721	2.177
3	2.7251	1.516
4	2.0030	0.376
5	2.0774	0.343
6	0.8610	0.755
7	2.1425	1.462
8	5.8712	0.468
9	1.6322	0.423
10	1.4089	0.522
11	1.0270	0.482
12	0.8854	0.421
13	0.9039	0.394
14	1.2190	0.391
15	4.0587	9.169
16	5.4969	9.169

Tableau III.8 : Résultats publiés du réseau test et ceux trouvés.

Nous remarquons d'après le tableau III.8, que les valeurs des TDH trouvées sont assez proches de celles publiées.

Des différences notables sont signalées aux nœuds 8, 15 et 16, cela peut être dû aux modèles des sources harmoniques utilisées.

En effet une modélisation détaillée de la station HVDC est du SVC est nécessaire, car les spectres des sources harmoniques dépendent des tensions du réseau et vice-versa.

7. Effet du niveau de compensation d'énergie réactive

Pour voir l'effet de la compensation d'énergie réactive au nœud 9 sur les niveaux des TDH, nous faisons varier la compensation de 50% autour de la valeur de référence donnée.

Nœud	TDH(%)		
	50% de compensation	100% de compensation	150% de compensation
1	2.0732	2.1389	2.1778
2	2.2111	2.2721	2.3031
3	2.6636	2.7251	2.7548
4	1.9848	2.0030	1.9744
5	2.0520	2.0774	2.0655
6	0.8516	0.8610	0.8700
7	2.0242	2.1425	2.2505
8	5.7813	5.8712	6.0368
9	1.4066	1.6322	1.9670
10	1.2280	1.4089	1.6756
11	0.9438	1.0270	1.1525
12	0.8207	0.8854	0.9127
13	0.8780	0.9039	0.9464
14	1.0933	1.2190	1.4261
15	4.0457	4.0587	4.1861
16	5.4508	5.4969	5.4302

Tableau III.9 : Taux de distorsions harmoniques aux nœuds en fonction des valeurs de compensation d'énergie réactive au nœud 9.

Les résultats présentés au tableau III.9, montrent que la distorsion harmonique de la tension n'est pas influencée d'une manière significative par les niveaux de la compensation.

Dans cette étude, nous avons analysé la distorsion harmonique de la tension dans un réseau de transport de 14 nœuds, en présence de deux sources d'harmoniques la station à haute tension continue (HVDC) et le compensateur statique (SVC) composé de bobines contrôlées par thyristors (TCR).

La méthode de calcul programmée sous MATLAB, basée sur l'utilisation de la matrice impédance nodale du réseau a permis de déterminer les niveaux des taux de distorsion harmonique de la tension aux différents jeux de barres.

D'après les résultats trouvés nous constatons que le HVDC pollue plus le réseau par rapport au SVC.

Les filtres placés aux niveaux des sources harmoniques sont indispensables pour la dépollution harmonique du réseau.

L'utilisation des deux sources d'harmoniques ensemble n'augmentent pas considérablement les niveaux des TDH.

La variation du niveau de la compensation au jeu de barre 9 modifie très peu les niveaux des TDH.

Enfin les résultats obtenus avec notre méthode de calcul sont assez proches de ceux donnés par la référence et l'utilisation des modèles plus détaillés concernant le HVDC et le SVC est nécessaire.

[1] : IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation

« Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks, Part 1 & 2 », IEEE Trans, on Power Delivery, Vol 11, No.1 January 1996, pp. 452-474.

[2] : A.KHELIL, C.BIROUCHE

« Gestion de la pollution harmonique dans les installations électriques basse tension »

Mémoire de fin d'études, DEUA, UMMTO, promotion 2008

[3] : JEAN MARTINON

« Propagation des perturbations harmoniques sur les réseaux d'énergie maillés de grandes dimensions ».

Thèse de doctorat de l'université de PARIS XI, 1995.

[4] : ERIC FELICE

« Perturbations harmoniques : Effet, origine, mesures, diagnostic, remèdes »

Edition DUNOD 2001

[5] : R.LARABI

« Etude du sens des injections harmoniques sur un réseau pollué »

Mémoire de fin d'études, d'ingénieur de l'UMMTO, promotion 2003.

[6] :L.CHERIEF, O.TALEB

« Analyse expérimentale des perturbations harmoniques générées par les lampes basses consommation (fluo compactes) ».

Mémoire de fin d'études, d'ingénieur de l'UMMTO, promotion 2003

[7] : S.CHALAL, N.YASSA

« Analyse de la propagation harmonique dans un réseau électrique »

Mémoire de fin d'études, d'ingénieur de l'UMMTO, promotion 2005

[8] : T.DEFLANDRE, P.MAURAS

« Les harmoniques sur les réseaux électriques »

Direction des études et des recherches d'EDF. Editions Eyrolles 1998

[9] : H.BESSAI

« Etude déterministe de la propagation des harmoniques dans les réseaux d'énergie électriques ».

Mémoire de magistère de l'UMMTO, promotion 2000.

[10] : O.DAID

« Etude de la pollution harmonique dans un réseau industriel »

Mémoire de fin d'études, d'ingénieur de l'UMMTO, promotion 2006.