

**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'ELECTROTCHNIQUE**



# Mémoire de fin d'études



En vue de l'obtention du Diplôme  
D'Ingénieur d'état en électrotechnique

*Option : Réseaux électriques.*

## Thème

**Evaluation des pertes de puissance  
dues aux harmoniques dans un  
réseau électrique industriel équilibré**

**Proposé par :**

***M<sup>r</sup> S. Rabahallah***

**Etudié par:**

***M<sup>lle</sup> F. Bouzembrak***

***M<sup>lle</sup> O. Iguernaissi***

***M<sup>lle</sup> S. Boudia***

**Promotion : 2009/2010**

## *REMERCIEMENTS*

*Avant tout, nous remercions DIEU le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements et gratitude à notre encadreur : Mr. S. RABAHALLAH pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il nous a toujours manifesté*

*A travers ce mémoire, nous adressons nos reconnaissances à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation depuis la première classe de primaire jusqu'à aujourd'hui.*

*Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.*

*Enfin nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail.*



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à chaque personne que j'estime énormément, que j'aime fortement et que j'adore merveilleusement :*

*A mon cher papa Mohemmed et ma chère maman Nouara, pour vous ma dédicace est la moindre récompense devant votre tendresse, amour et sacrifices pour ma réussite, merci beaucoup et que Dieu vous garde pour moi.*

*A la mémoire de mes grands parents paternels.*

*A mes très chers frères Abd arezek, Sadek, Chérif.*

*A mes très chères sœurs Naima, Taous.*

*A Rachid BOUZAR mon future époux et sa famille.*

*A Kamel ABDI.*

*A mes collègues de travail Ourdia et Samia et leurs familles.*

*A Mes meilleurs amies: Ranya, Nassima, Naima, Kahina, Karima.*



**FATIHA B**



# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à:*

*A la mémoire de mes grands-parents.*

*A mes chers parents.*

*A mes frères :Belaid, Rabah, Mouloud.*

*A ma sœur Mekjoussa.*

*A mes collègues de travail Fatiha et Samia et leurs familles.*

*A Mes amies: Lwiza, Djidji, Djamila...*

*A chaque personne de l'option réseau électrique, promotion  
2010.*

*Ourdia I*





# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de L'ange du paradis Rosa.*

*A la mémoire de ma grand-mère paternel.*

*A mes chers parents.*

*A mes chères sœurs :Samira,Tasseda.*

*A ma chère grand-mère maternelle.*

*A mes chères tentes et oncles.*

*A toute ma famille.*

*A mes collègues de travail Fatiha et Ourdia et leurs familles.*

*A Mes meilleurs amies: Rosa, Djidji, Nadia, Souad, Samia.*



# ***Sommaire***

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les harmoniques.</b>	
I-1 Introduction.....	3
I-2 Définition des harmoniques .....	3
I-3 Les inter-harmoniques .....	3
I-4 Les infra-harmoniques .....	3
I-5 Origine des harmoniques.....	4
I-5-1 Transformateurs et machines tournantes .....	4
I-5-2 Charges non linéaires.....	4
I-6 Caractéristiques d'un signal déformé.....	6
I-6-1 Rang d'un harmonique .....	6
I-6-2 Analyse de FOURIER .....	6
I-6-3 Représentation spectrale.....	8
I-7 Valeurs caractérisant un signal déformé.....	8
I-7-1 Valeur efficace.....	8
I-7-2 Facteur de crête .....	8
I-7-3 Facteur de puissance.....	9
I-7-4 Facteur de déphasage.....	9
I-7-5 Taux individuel $T_i$ .....	9
I-7-6 Taux de distorsion harmonique TDH .....	10
I-8 Harmoniques de courant et de tension .....	10
I-8-1 Courant harmonique .....	10
I-8-1-1 Les principales sources de courants harmoniques .....	10
I-8-2 Tension harmonique .....	11
I-8-2-1 Les principales sources de tensions harmoniques.....	11
I-9 Impédance harmonique et loi d'Ohm sur les réseaux .....	11
I-10 Foisonnement.....	11
I-11 Puissance active et puissance apparente en présence d'harmoniques .....	12
I-12 Les effets néfastes des harmoniques .....	12
I-13 Méthodes et procédés possibles d'atténuation.....	14
I-13-1 Filtrage passif.....	14
I-13-1-1 Inductance anti-harmonique.....	14
I-13-1-2 Filtre résonant.....	15

I-13-1-3 Filtre amorti.....	16
I-13-2 Filtrage actif.....	16
I-13-2-1 Filtre actif parallèle.....	16
I-13-2-2 Filtre actif série.....	17
I-13-3 Filtre hybride (mixte actif-passif).....	17
I-14 Conclusion.....	18

## **Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique**

II-1- Introduction .....	19
II-2- Pertes de puissance dans les machines électriques.....	19
II-2-1 Les pertes dans les transformateurs (machine statique).....	19
II-2-1-1 Les pertes par effet Joule (en charge).....	19
II-2-1-2 Les pertes à vide.....	20
II-2-1-2-1 Les pertes apparentes.....	20
II-2-1-2-2 Les pertes fer.....	20
II-2-1-3 Les pertes auxiliaires.....	25
II-2-2 Les pertes dans les moteurs.....	25
II-2-2-1 Les pertes mécaniques.....	26
II-2-2-2 Les pertes électriques.....	26
II-2-2-3 Les pertes dans les conducteurs.....	26
II-2-2-4 Les pertes électriques dans le fer.....	27
II-2-2-5 Les pertes supplémentaires en charge.....	28
II-3 Pertes dans les câbles.....	28
II-4 Pertes dans les condensateurs.....	29
II-5 Pertes dans les redresseurs.....	31
II-6 Rendement.....	31
II-7 Solutions pour minimiser les pertes de puissance dans une machine électrique.....	32
II-8 Conclusion.....	32

## **Chapitre III : Evaluation des pertes de puissance dues aux harmoniques.**

III -1 Introduction.....	34
III-2 Pertes de puissance dans les machines électriques.....	34
III-2-1 Pertes de puissance dans les transformateurs.....	34
III-2-1-1 Pertes Joule dans les enroulements.....	34
III-2-1-2 Pertes fer dans le circuit magnétique.....	34
III-2-2 Pertes de puissance dans les moteurs.....	38

III-3 Pertes de puissance dans les câbles.....	39
III-4 Pertes de puissance dans les condensateurs.....	40
III-5 Pertes de puissance dans les redresseurs.....	41
III-6 Rendement.....	42
III-7 Comparaison.....	42
III-8 Solutions pour minimiser les pertes dues aux harmoniques.....	42
III-8-1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	43
III-8-2 Confinement des harmoniques.....	43
III-8-2-1 Transformateur.....	43
III-8-2-2 Redresseurs.....	44
III-8-2-3 Inductances (selfs) série.....	44
III-8-3 Les solutions de filtrage.....	45
III-9 Conclusion.....	45

#### **Chapitre IV : Application sous MATLAB.**

IV-1 Introduction.....	46
IV-2-Application.....	47
IV 3-Représentation des données des éléments du réseau.....	50
IV-3-1Les données des transformateurs.....	50
IV-3-2Les données des charges.....	51
IV-3-3 Les données des câbles.....	51
IV-3-4 Les données de la ligne.....	51
IV-3-6-Condensateur .....	52
IV-3-6Les données de la source harmonique.....	52
IV-4 Les impédances.....	53
IV-4-1 Les impédances des charges.....	53
IV-4-2 Les impédances des câbles.....	54
IV-5 Calcule des courants dans les différents éléments.....	55
IV-5-1 Les courants dans les transformateurs.....	55
IV-5-2 Les courants dans les charges.....	56
IV-5-3 Les courants dans les câbles et la ligne.....	57
IV-5-4 Les courants et les tensions dans le condensateur.....	58
IV-6 Les pertes de puissance dans les différents éléments.....	59
IV-6-1 Dans les transformateurs.....	59
IV-6-2 Dans les charges.....	60

IV-6-3 Dans les câbles.....	61
IV-6-4 Dans le condensateur.....	62
IV-7 Représentation graphique des pertes de puissance.....	62
IV-7-1 Pertes de puissance dans les câbles.....	62
IV-7-2 Pertes de puissance dans les transformateurs.....	63
IV-7-3 Pertes de puissance dans les charges.....	63
IV-7-4 Pertes de puissance dans le condensateur.....	64
IV-7-5 Pertes de puissance dans tous les éléments du réseau.....	64
IV-7-6 Pourcentage des pertes dues aux harmoniques dans chaque élément du réseau.....	65
IV-8 Discussion des résultats.....	65
IV-9 Interprétation des résultats.....	66
IV-10 Conclusion .....	66
Conclusion générale.....	67
Bibliographie	

# ***Introduction générale***

## Introduction générale

L'électricité avec toutes ses formes (alternative, continue) représente l'une des sources importantes d'énergie utilisée dans plusieurs et différents usages domestiques, ou industriels comme les usines, les hôpitaux et les éclairages publics ...

Le transport et l'utilisation de l'énergie électrique dans les réseaux industriels, s'accompagnent souvent d'une déformation de la sinusoïde du courant et de la tension, cette déformation est due essentiellement à des perturbations électriques ou harmoniques, ces dernières sont plus fréquentes, du fait de la prolifération des charges non linéaires (convertisseurs, téléviseurs, ordinateurs, lampes à basse consommation, fours à arc...).

Cette distorsion affecte la qualité d'énergie offerte par le fournisseur d'électricité et les performances des équipements raccordés au réseau électrique. Pour ces raisons, une connaissance des harmoniques et leurs effets est nécessaires.

Au cours de ces dernières années, l'abondance des charges non linéaires a engendré des pertes de puissance supplémentaires dans le réseau électrique.

Les pertes de puissance sont inévitables dans un réseau électrique (les pertes par effet Joule dans le circuit traversé par le courant  $I$ , les pertes fer dans le circuit magnétique et les pertes mécaniques par frottement et ventilation), elles augmentent avec la charge non linéaire puisqu'elles dépendent des courants.

Notre travail porte sur l'étude et l'évaluation des pertes de puissance dues aux harmoniques générés par les différents récepteurs d'un réseau industriel.

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les harmoniques, dans lequel on a présenté la définition des harmoniques, leurs origines, les caractéristiques d'un signal déformé et les valeurs caractérisant ce signal, les principales sources de courants et de tensions harmoniques. Par ailleurs, les effets néfastes des harmoniques et les méthodes possibles d'atténuation de ces effets par des solutions de filtrage seront également développées.

Dans le deuxième chapitre on décrit les différentes équations qui nous permettent de calculer les pertes de puissance, dues au fondamental, dans les différents éléments d'un réseau électrique.

Dans le troisième chapitre on décrit les différentes équations qui nous permettent de calculer les pertes de puissance en présence d'harmoniques.

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter le réseau étudié et les résultats obtenus par un programme de calcul réalisé sous MATLAB basé sur les formules théoriques décrites dans le troisième chapitre.

Enfin nous terminerons par une conclusion générale.

# **Chapitre 1**

## **Généralités sur les harmoniques**

## **I-1 Introduction**

Les tensions déformées affectent la qualité de la puissance offerte par le fournisseur d'électricité. Elles affectent aussi la performance de plusieurs appareils électroniques. Pour ces raisons, une connaissance des harmoniques et de leurs effets est devenue essentielle.

La forme des ondes de courant et de tension relevée sur les réseaux électriques s'éloigne assez souvent de la sinusoïdale idéale pure. La déformation de la tension résulte de la circulation des courants harmoniques dans un réseau électrique.

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

## **I-2 Définition des harmoniques [1]**

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiples de la fréquence fondamentale de 50 Hz. Ils sont générés par des charges dites non linéaires.

## **I-3 Les inter-harmoniques [2]**

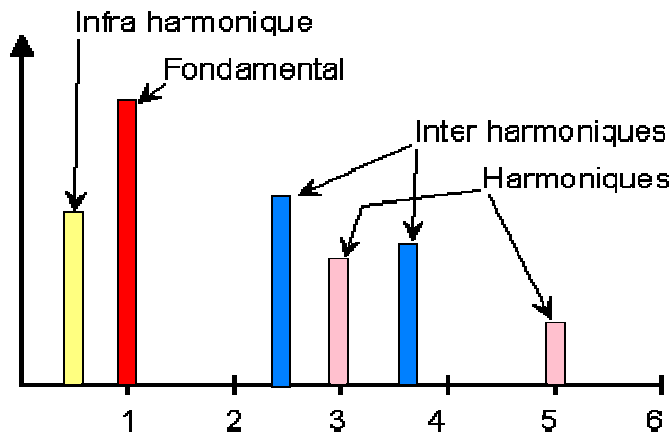
Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples de la fréquence fondamentale ; ils se situent entre les harmoniques. Certains de ces derniers sont émis par les charges non linéaires.

Parmi ces charges on trouve des convertisseurs de fréquence statiques qui génèrent les tensions et les courants inter-harmoniques sur le réseau tels les variateurs de vitesse pour les moteurs asynchrones. Les fours à arcs génèrent aussi des courants inter-harmoniques.

## **I-4 Les infra-harmoniques**

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

Le schéma suivant représente les harmoniques, les inter-harmoniques et les infra-harmoniques.



FigI-1: Représentation des harmoniques, inter-harmoniques et les infra-harmoniques.

## I-5 Origine des harmoniques [8]

### I-5-1 Transformateurs et machines tournantes

Les moteurs asynchrones ou les alternateurs engendrent des tensions périodiques. Ces machines se comportent comme des sources de tensions harmoniques, de rangs impairs, phase par phase, et d'impédances internes relativement faibles, de l'ordre de grandeur de l'inductance de court-circuit. Les tensions harmoniques proviennent du champ inducteur non parfaitement sinusoïdal, et de ses irrégularités dues aux encoches des circuits magnétiques. Pour les machines asynchrones, les fréquences sont liées aux encoches, et décalées légèrement par rapport aux multiples du 50 Hz, à cause du glissement. La conception des machines permet de réduire les tensions harmoniques à des valeurs très faibles.

Les transformateurs peuvent également être assimilés à des sources de tensions harmoniques impaires, phase par phase, d'impédances internes très élevées, de l'ordre de grandeur de l'impédance magnétisante lorsqu'il s'agit des tensions harmoniques des systèmes directs et inverses. La valeur des forces électromotrices des sources de tensions harmoniques est élevée, et approximativement proportionnelle à leurs impédances internes.

Aux bornes des transformateurs, les tensions harmoniques sont, en règle générale, de valeur très faible, étant donné qu'en pratique, les impédances vues aux bornes des sources de tensions harmoniques ont un ordre de grandeur beaucoup plus faible que la valeur de leurs impédances internes.

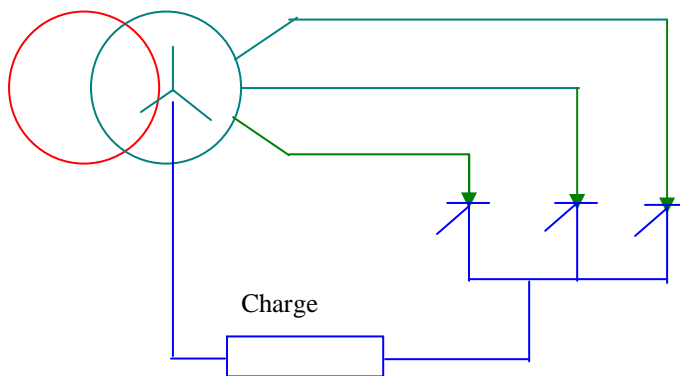
### I-5-2 Charges non linéaires

L'expérience prouve, ce qui est également conforme à la théorie, que les tensions harmoniques des réseaux dues aux machines tournantes et aux transformateurs restent en deçà du pour cent, ou d'une fraction de pour cent de la tension nominale.

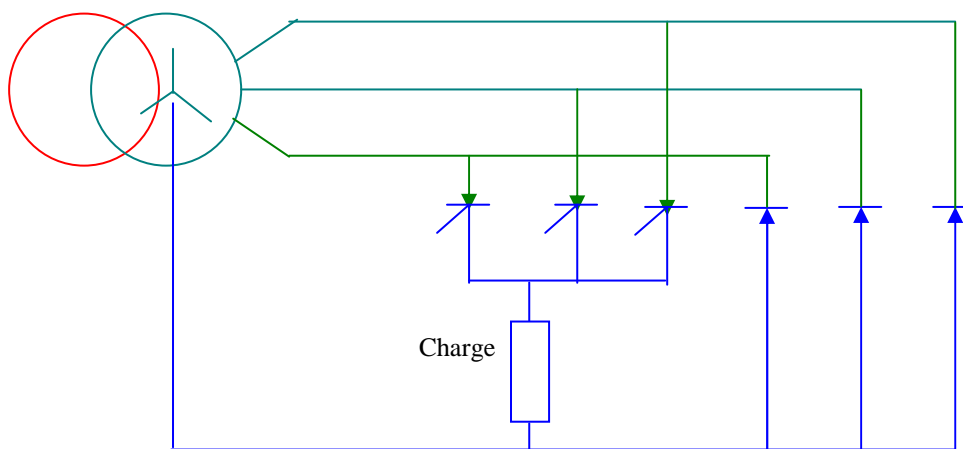
Un phénomène plus gênant est la prolifération d'appareils situés chez les clients, et comportant soit un arc électrique, tels que fours à arc, soudeuses, éclairage fluorescent..., soit des redresseurs, comme il est possible d'en rencontrer plus particulièrement dans la sidérurgie ou l'électrochimie.

Les ponts redresseurs de puissance sont actuellement les plus nocifs de par l'importance croissante de leur puissance et de leur nombre. Vus du réseau, ils apparaissent comme étant des sources de courants harmoniques de systèmes directs ou inverses en règle générale. Le problème global de la limitation des distorsions harmoniques doit donc être centré sur celui des redresseurs de puissance.

Les redresseurs les plus répandus sont les redresseurs triphasés à simple effet, et les redresseurs en pont de Grätz mixtes semi-contrôlés, pour les petites puissances. Ils créent des harmoniques de courant de rang impair, dont le taux de distorsion est inversement proportionnel au rang.



**FigI-2: Redresseur triphasé à simple effet.**



**FigI-3: Pont de Grätz mixte semi-contrôlé.**

Pour les grandes puissances, les redresseurs sont utilisés à minimums des ponts de Grätz symétriques triphasés. Des astuces de montage permettent d'obtenir des ponts symétriques hexaphasés et dodécaphasés. Ceci permet d'éliminer les harmoniques 3, 9, 15, 21, 27, 33, ... pour le pont symétrique triphasé, aux quels il convient d'ajouter 5, 7, 17, 19, 29, 31, ... pour le pont symétrique hexaphasé, et enfin, 11, 13, 35, 37, 59, 61, ... pour le pont symétrique dodécaphasé.

## I-6 Caractéristiques d'un signal déformé

### I-6-1 Rang d'un harmonique [3]

Le rang de l'harmonique est défini comme étant le rapport entre sa fréquence  $f_h$  à celle du fondamental  $f_1$ .

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I-1})$$

Chaque composante est caractérisée par son rang. L'harmonique de rang 2 a une fréquence de  $50 \times 2 = 100\text{Hz}$ . L'harmonique de rang 3 a une fréquence de  $50 \times 3 = 150\text{Hz}$ .

### I-6-2 Analyse de FOURIER [2]

Joseph FOURIER a démontré que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier est le fondamental et les autres sont des harmoniques.

Un signal périodique  $S(t)$  représente un courant ou une tension de période  $T$ , de fréquence  $f = \frac{1}{T}$  et de pulsation  $\omega = 2\pi f$ . Ce signal  $S(t)$  se décompose en série de FOURIER de la façon suivante :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \sin(h\omega t) \quad (\text{I-2})$$

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

Pour  $h \geq 1$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(h\omega t) dt \quad (\text{I-4})$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(h\omega t) dt \quad (\text{I-5})$$

Ou, également:

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (\text{I-6})$$

$$\theta_h = \text{Arc tan} \frac{a_h}{b_h} \quad (\text{I-7})$$

$$C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (\text{I-8})$$

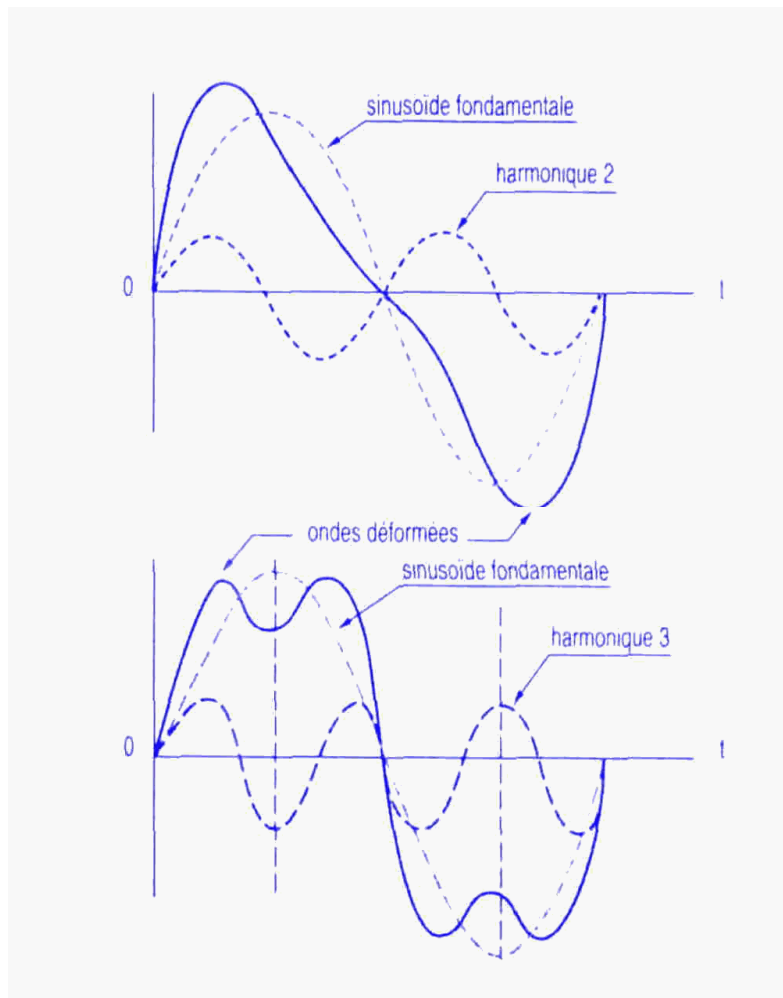
$a_0$  : Composante continue ou valeur moyenne du signal.

$a_h, b_h$  : Valeurs efficaces des composantes harmoniques de rang  $h$ .

$C_h$  : Amplitude de l'harmonique de rang  $h$ .

$\theta_h$  : Phase de l'harmonique de rang  $h$ .

La figure ci-dessous représente une décomposition en série de Fourier.



**Fig.I-4: Décomposition d'ondes déformées.**

### I-6-3 Représentation spectrale

C' est l'histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang.

La figure ci-dessous montre un exemple de spectre.

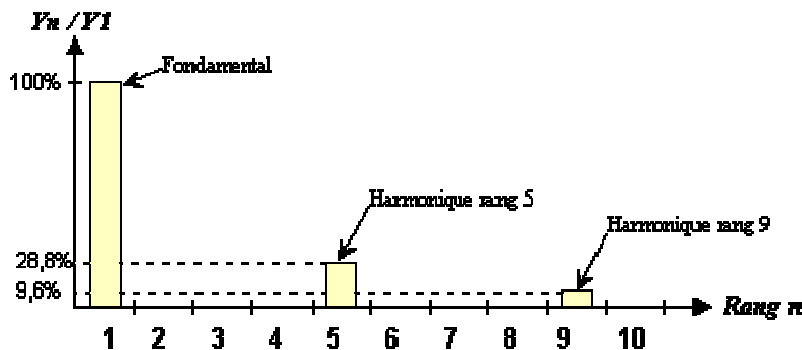


Fig.I-5: Spectre d'harmoniques.

### I-7 Valeurs caractérisant un signal déformé

#### I-7-1 Valeur efficace [2]

La valeur efficace d'un signal déformé  $G(t)$  est donnée par :

$$G_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_h G_h^2} \quad (\text{I-9})$$

$G_h$  : valeur efficace de l'harmonique  $h$ .

$G_{\text{eff}}$  : valeur efficace de l'onde déformée.

#### I-7-2 Facteur de crête [4]

Le facteur de crête de courant ou de tension, par définition, est égal à la valeur crête divisée par la valeur efficace.

Pour le courant : 
$$f_c = \frac{I_c}{I_{\text{eff}}} \quad (\text{I-10})$$

$f_c$  : Facteur de crête du courant.

$I_c$  : Valeur crête du courant.

$I_{\text{eff}}$  : Valeur efficace du courant.

Pour un courant sinusoïdale  $f_c = 1.41 = \sqrt{2}$

Une onde ayant un facteur de crête inférieure à 1.41 ( $f_c < 1.41$ ) sera aplatie. Dans le cas contraire ( $f_c > 1.41$ ) elle sera pointue.

**I-7-3 Facteur de puissance [3]**

C'est le rapport entre la puissance active P du signal et la puissance apparente S aux bornes d'une charge.

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I-11})$$

$$P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi \quad (\text{I-12})$$

P : Puissance active [W].

S: Puissance apparente [VA].

$U_{eff}$  : Tension efficace [V].

$I_{eff}$  : Courant efficace [A].

$\varphi$  : Le déphasage entre la tension et le courant.

En présence d'harmoniques :

$$F_p = \frac{I_1}{I_{eff}} \cos \varphi = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + TDH_g^2}} \quad (\text{I-13})$$

Avec :

$$I_{eff} = I_1 \sqrt{1 + TDH_g^2} \quad (\text{I-14})$$

**I-7-4 Facteur de déphasage [4]**

Il représente le cosinus de l'angle entre les fondamentaux de la tension et celui du courant.

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{I-15})$$

$P_1$  : Puissance active de la composante fondamentale.

$S_1$  : Puissance apparente de la composante fondamentale.

Remarque :

$F_p = \cos \varphi_1$  : Sur une charge linéaire.

$F_p \neq \cos \varphi_1$  : Sur une charge non linéaire.

**I-7-5 Taux individuel  $T_i$  [2]**

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

$$T_i (\%) = 100 \frac{G_h}{G_1} \quad (\text{I-16})$$

**I-7-6 Taux de distorsion harmonique TDH [2][5]**

C'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental.

$$TDH_g = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} G_n^2}}{G_1} \quad (\text{I-17})$$

- Taux de distorsion harmonique en courant  $TDH_i$  :

$$TDH_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2} \quad (\text{I-18})$$

- Taux de distorsion harmonique en tension  $TDH_v$  :

$$TDH_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2} \quad (\text{I-19})$$

**I-8 Harmoniques de courant et de tension****I-8-1 Courant harmonique [2]**

Les courants harmoniques présents sur le réseau électrique proviennent de l'utilisation des charges non linéaires. Ces charges se comportent approximativement comme des sources harmoniques, l'amplitude de ces courants ne dépend que de la charge, elle est plus élevée si la charge est importante.

**I-8-1-1 Les principales sources de courants harmoniques [6]**

- **Les bobines saturées**

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

- **L'éclairage**

L'éclairage public par lampes à décharge ou tubes fluorescents est générateur de courants harmoniques.

- **Les convertisseurs statiques**

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

- **Les appareils à arc électrique [2]**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif et les machines de soudures à arc à courant alternatif ou continu, ils contiennent plus d'inter-harmoniques.

### **I-8-2 Tension harmonique [2]**

L'émission harmonique en tension due aux matériels du réseau n'est pas assez importante, elle est due aux imperfections de construction des bobinages des machines tournantes, des moteurs, des alternateurs et des transformateurs.

#### **I-8-2-1 Les principales sources de tensions harmoniques [6]**

- **Les machines tournantes**

Elles génèrent des harmoniques de rang élevé et d'amplitude très faible. Les petites machines synchrones sont génératrices de tension harmonique de rang 3.

- **Les alternateurs**

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

- **Les transformateurs**

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

### **I-9 Impédance harmonique et loi d'Ohm sur les réseaux [2]**

On définit en tout point d'un réseau une impédance harmonique  $Z_h$  qui dépend du rang harmonique  $h$  considéré, elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point.

Le produit des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires par l'impédance harmonique du réseau en un point du réseau crée des harmoniques de tension selon la loi d'Ohm

$$V_h = Z_h \cdot I_h \quad (\text{I-20})$$

### **I-10 Foisonnement [4]**

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 et plus la résultante pourra devenir négligeable.

### I-11 Puissance active et puissance apparente en présence d'harmoniques [4]

$$P_{moy} = \sum_{n=1}^{\infty} V_{neff} I_{neff} \cos \varphi_n \quad (I-21)$$

$\varphi_n$ : Angle de déphasage entre la tension et le courant harmoniques aux bornes de la charge.

$$P_{moy} = P_{1moy} + P_{2moy} + P_{3moy} + \dots + P_{nmoy} \quad (I-22)$$

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

$$S = V_{eff} I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (I-23)$$

Si  $TDH_G^I$  et  $TDH_G^V$  sont les taux de distorsion en courant et en tension on aura :

$$S = \sqrt{V_1^2 \left( 1 + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2} \right)} \sqrt{I_1^2 \left( 1 + \frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2} \right)} \quad (I-24)$$

$$S = V_1 I_1 \sqrt{(1 + TDH_V^2) * (1 + TDH_I^2)} \quad (I-25)$$

En régime déformé on doit modifier la définition de la puissance apparente pour qu'elle tienne compte du courant harmonique.

Donc : 
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I-26)$$

P : puissance active.

Q : puissance réactive.

D : puissance déformante ou puissance de distorsion.

### I-12 Effets néfastes des harmoniques [4]

La circulation des courants harmoniques contribue à l'augmentation des pertes par effet Joule dans les conducteurs électriques ainsi qu'à la diminution du facteur de puissance de l'installation, ce

qui engendre un surcoût sur la facturation de l'électricité et affecte aussi les équipements raccordés au réseau en diminuant leur durée de vie.

Le tableau suivant est un récapitulatif des effets produits sur certains équipements :

Equipements perturbés	Type de perturbation
Machines tournantes	Echauffements supplémentaires Couples pulsatoires entraînant une perte de stabilité mécanique Augmentation du bruit
Transformateurs	Pertes supplémentaires Risques de saturation (si harmoniques pairs)
câbles	Pertes ohmiques (notamment câble du neutre dans les réseaux triphasés) Vieillessement prématuré de l'isolant Pertes diélectriques supplémentaires Corrosion des câbles en aluminium Effet de peau
Micro-ordinateurs	Dysfonctionnement
Electronique industrielle	Défauts de fonctionnement liés à la forme d'onde
Dispositifs de communication	Interférences
Dispositifs de télécommande Relais de protection Fusibles disjoncteurs	Fonctionnement et déclenchement intempestifs
Condensateurs de puissance	Echauffement, vieillissement
Compteurs d'énergie	Erreurs de mesure

**Tableau( I-1): Effets produits sur certains équipements.**

En effet, on peut classer ces effets dans deux catégories ; effets instantanés et effets à long terme.

- **Les effets instantanés**

Ils sont dus essentiellement au phénomène de résonance et se manifestent dans les déclenchements intempestifs des disjoncteurs et des relais d'automatisme, la destruction du matériel et la perturbation des dispositifs de régulation. Ils provoquent aussi la diminution du facteur de puissance.

- **Les effets à long terme**

Ils génèrent des échauffements dans les condensateurs et les conducteurs et équipements électriques provoquant, ainsi, un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et les transformateurs.

### I-13 Méthodes et procédés possibles d'atténuation [2]

Pour sensibiliser les installations industrielles et le réseau électrique vis-à-vis de la pollution harmonique, deux solutions ont été développées.

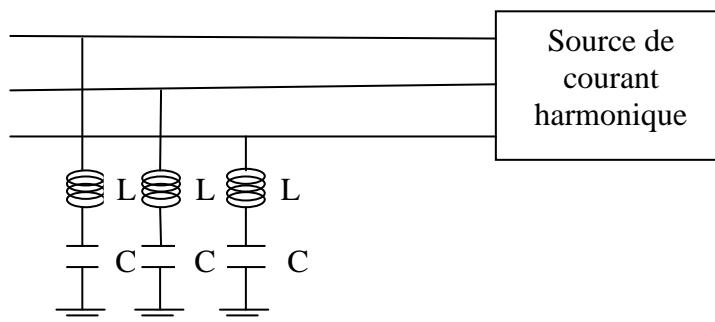
La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques plus ou moins polluants, tandis que la deuxième réalise un filtrage des composantes harmoniques, qui consiste à filtrer les courants ou les tensions harmoniques.

#### I-13-1 Filtrage passif

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

##### I-13-1-1 Inductance anti-harmonique

Cette solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.



**Fig. I-6: Raccordement d'une impédance anti-harmonique.**

Avec :

L : Inductance anti-harmonique.

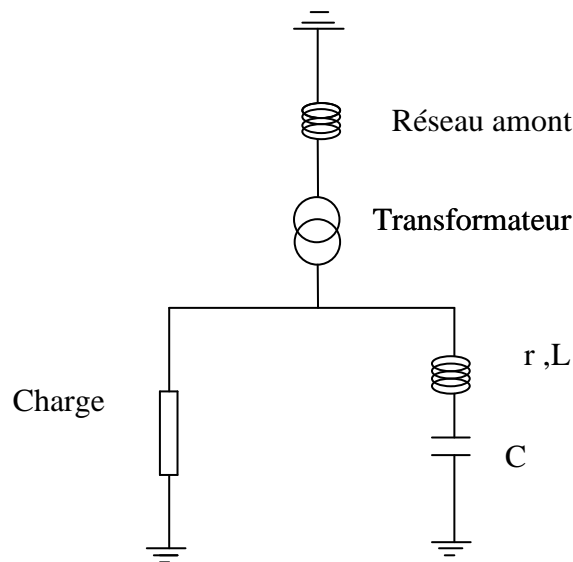
C : Condensateur anti-harmonique.

L'objectif essentiel de ce dispositif est de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Et en plus, il réduit les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet aussi de réduire les valeurs d'impédance du réseau.

### I-13-1-2 Filtre résonant

Le filtre résonant a pour but de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé, il est constitué d'un ensemble de condensateurs et d'inductances anti-harmoniques.

La figure suivante représente le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre résonant en aval d'un transformateur.



**Fig. I-7: Schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre résonant.**

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{I-27})$$

$f_r$  : Fréquence de résonance[Hz].

$L$  : Inductance[H].

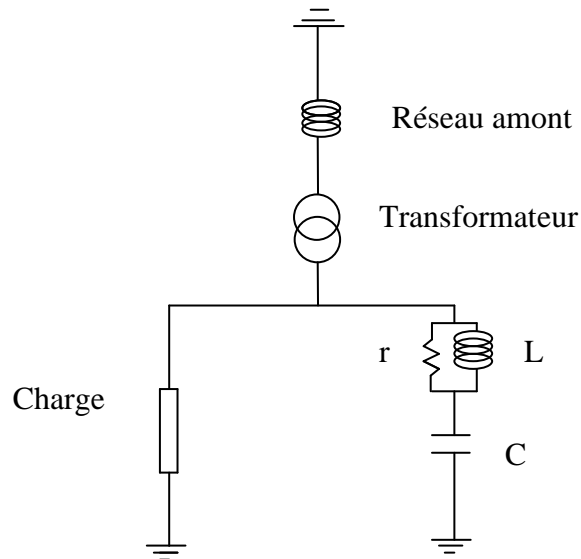
$C$  : Capacité[F].

### I-13-1-3 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.

On l'utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non pas une fréquence particulière.

La figure suivante représente le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre amorti.



**Fig. I-8: Schéma monophasé équivalent de l'installation d'un filtre amorti.**

### I-13-2 Filtrage actif

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

Les avantages de ce filtrage sont :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques.
- Il supprime le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau qui existe avec le filtre passif.

Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle.

#### I-13-2-1 Filtre actif parallèle

Pour un filtre actif parallèle, il existe deux types de fonctionnement: Compensation des courants harmoniques, compensation des tensions harmoniques.

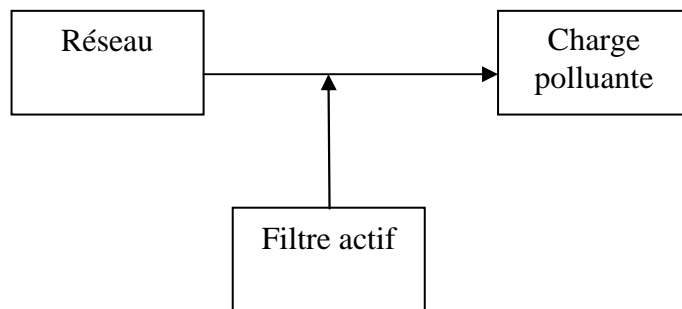
- **Compensateur de courant harmonique**

Il injecte un courant harmonique qui s'oppose au courant harmonique émis par la charge ; le générateur ne fournit plus que le courant fondamental.

- **Compensateur de tension harmonique**

Le filtre compensateur de tension injecte un courant harmonique à travers l'impédance  $Z$  de façon à créer, à ses bornes, une chute de tension harmonique qui permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge.

Le schéma ci-dessous représente le schéma de principe d'un filtre actif parallèle :



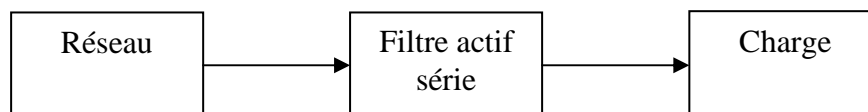
**Fig. I-9: Schéma de principe d'un filtre actif parallèle.**

### I-13-2-2 Filtre actif série

Il fonctionne en compensateur de tension. Le filtre fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire.

On arrive, ainsi, à limiter la tension harmonique aux bornes de la charge.

Son schéma de principe est le suivant:



**Fig. I-10: Schéma de principe d'un filtre actif série.**

### I-13-3 Filtre hybride (mixte actif-passif)

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

**I-14 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons vu que toute onde périodique déformée et de fréquence  $f$  est équivalente à une somme d'ondes sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de  $f$ . La composante de fréquence  $1f$  est la composante fondamentale. Les composantes d'ordres  $2f, 3f, \dots, nf$ , sont les composantes harmoniques d'ordres  $2, 3, \dots, n$ .

On a vu comment calculer la valeur efficace d'une onde contenant des harmoniques. Pour mesurer le degré de distorsion, on peut aussi calculer son facteur de crête et son facteur de distorsion ou TDH.

Les harmoniques générés par les charges non linéaires se propagent sur tout le réseau et ils peuvent même être amplifiés par l'effet de résonance à certaines fréquences. Les tensions et les courants harmoniques aux différents points du réseau peuvent être calculés de façon indépendante. On a vu comment l'utilisation des filtres permet à la fois de réduire les harmoniques et d'améliorer le facteur de puissance.

# **Chapitre II**

## ***Les pertes de puissance dans un réseau électrique***

## **II-1- Introduction**

Le transfert d'énergie d'un point à un autre s'accompagne d'une certaine perte de puissance qui donne lieu à un échauffement des différentes parties du réseau et une diminution du rendement.

L'étude de ces pertes dans chaque élément nous permet et nous conduit à la façon avec laquelle on peut réduire ces pertes.

Dans ce chapitre nous analysons les pertes dans chaque élément constituant un réseau électrique telles les machines électriques, les câbles, les condensateurs ainsi que les redresseurs.

## **II-2- Pertes de puissance dans les machines électriques**

On peut classer les machines électriques en deux groupes. Celles qui ont des parties tournantes (moteurs, génératrices) et les machines statiques (transformateurs).

### **II-2-1 Pertes dans les transformateurs (machine statique) [9]**

Les pertes de puissance dans les transformateurs se manifestent sous forme de chaleur qui donne lieu à une élévation de température et une diminution de rendement.

Ces pertes sont causées par l'effet Joule dans les deux enroulements, par hystérésis et par courants de Foucault dans le fer.

Dans les conditions normales de fonctionnement, le rendement des transformateurs est très élevé, il peut atteindre 99,50% pour les transformateurs de grandes puissances.

#### **II-2-1-1 Pertes par effet Joule (en charge) [10]**

Les pertes par effet Joule c'est la dissipation d'énergie sous forme de chaleur et une chute de tension au niveau du transformateur, provoqués par le passage du courant de charge dans l'enroulement primaire et l'enroulement secondaire.

Ces pertes de puissance sont données par la formule suivante [3]

$$P_{tch} = R.I^2 \quad (II-1)$$

$P_{tch}$  : Pertes en charge dans le transformateur [W].

R : Résistance équivalente des enroulements primaire et secondaire [ $\Omega$ ].

I : Courant de charge [A].

### **II-2-1-2 Pertes à vide**

Elles se composent de deux types de pertes :

#### **II-2-1-2-1 Pertes apparentes [3]**

Les pertes apparentes sont dues au courant traversant l'enroulement primaire causant la chute de tension.

Ces pertes sont données par la formule suivante :

$$P_{app} = R.I^2 \quad (\text{II-2})$$

$P_{app}$  : Pertes apparente [W].

R : Résistance de l'enroulement primaire [ $\Omega$ ].

I : Courant traversant l'enroulement primaire [A].

#### **II-2-1-2-2 Pertes fer [9]**

La quantité de chaleur occasionnée par les pertes dans le fer dépend de la valeur maximale  $\Phi_{max}$  du flux (donc de la variation de l'induction). D'autre part, la puissance dissipée en chaleur dans les enroulements dépend de l'intensité du courant qui les parcourt.

Ces pertes d'énergie sous forme de chaleur sont de deux sortes :

##### **1) Pertes par hystérésis [9]**

###### **• Cycle d'hystérésis**

Les transformateurs et la plupart des moteurs électriques fonctionnent à courant alternatif de sorte que le flux circulant dans leur partie en acier change continuellement de valeur et de sens. Les domaines magnétiques doivent donc s'orienter tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre à un rythme qui est d'autant plus rapide que la fréquence du réseau est élevée. Ainsi, sur un réseau de 60Hz, les domaines décrivent un cycle complet en  $1/60^{\text{eme}}$  de seconde. Passant par des densités maximales  $+ B_{max}$  et  $- B_{max}$  sous l'effet d'un champ magnétique variant de  $+ H_m$  à  $- H_m$ . Si on trace les variations de la densité de flux B (en Teslas) en fonction du champ magnétique H (en A/m), on obtient une courbe fermée portant le nom du cycle d'hystérésis.

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

Le cycle suit la séquence a, b, c, d, e, f, a, à raison de 60 fois par seconde. Sur ce cycle on reconnaît les valeurs de la densité du flux rémanent  $B_r$  et du champ coercitif  $H_c$  comme dans le cas des aimants permanents. L'énergie dissipée par cycle est proportionnelle à la surface a, b, c, d, e, a de la courbe. On peut représenter ce cycle d'hystérésis par la figure ci-dessous.

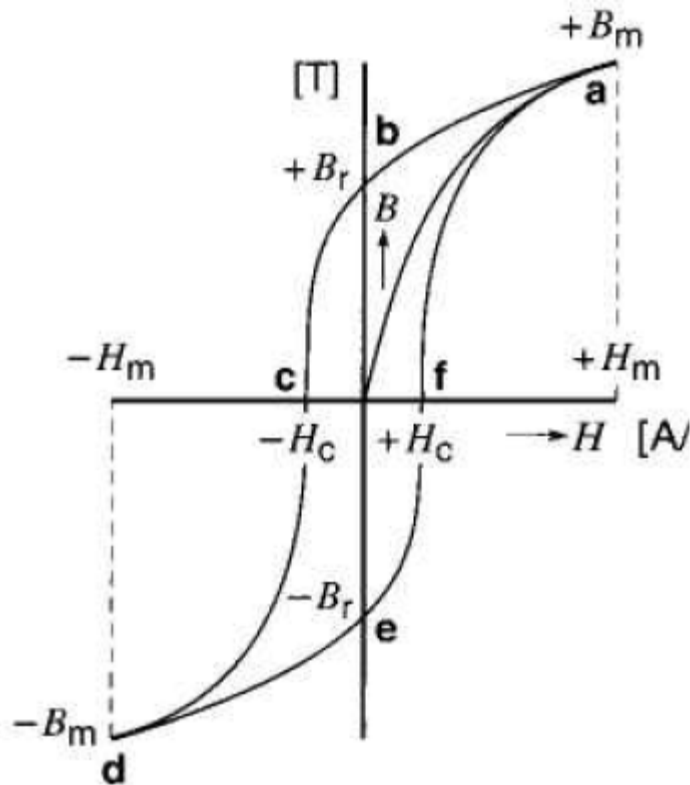


Fig. II-1- Cycle d'hystérésis d'un matériau magnétique.

### • Pertes par hystérésis

Pour chaque cycle d'hystérésis complet, il se produit une perte d'énergie. Ces pertes, dues au travail des forces de freinage, agissent sur les parois de Bloch en mouvement, c'est-à-dire aux frottements des domaines magnétiques lorsqu'ils changent de sens. La quantité d'énergie dissipée par mètre cube est égale à la surface du cycle d'hystérésis. [9]

Ces pertes correspondent au travail nécessaire pour parcourir complètement la boucle d'hystérésis magnétique, elles sont évaluées par la formule suivante :

$$W_h = V \oint H dB \quad (\text{II-3})$$

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

Avec :

$W_h$  : Energie dissipée par unité de volume au cours d'un cycle [Joule.  $m^3$ ].

$V$  : Volume d'un matériau [ $m^3$ ].

$H$  : champ magnétique [A/m].

$B$  : Induction magnétique [T].

Cependant, cette formule est difficilement utilisable, donc on préfère des expressions empiriques donnant la puissance consommée en fonction de l'induction maximale  $B_{max}$ . **[11]**

Selon STEIMETZ, on peut calculer les pertes par hystérésis par la formule suivante :

$$P_h = V.K.f.B_m^n \quad [w] \quad (II-4)$$

$$P_h = \frac{KB_m^n}{m_v} \quad [J / Kg] \quad (II-5)$$

$P_h$  : Pertes par hystérésis [ $J / Kg$ ]

$V$  : Volume du matériau [ $m^3$ ]

$K$  : Coefficient de STEIMETZ compris généralement entre  $5 \cdot 10^{-4} < k < 4 \cdot 10^{-2}$

$f$  : Fréquence [Hz]

$m_v$  : Masse volumique [ $Kg / m^3$ ]

$B_m$  : Induction maximale [T]

Pour les tôles ( $F_e$ - $S_i$ )  $n$  est entre 1,5 et 2,5 dans les transformateurs.

Cette puissance est dissipée sous forme de chaleur dans l'acier, ce qui provoque une augmentation de sa température. Pour réduire ces pertes on a donc intérêt à réduire la surface du cycle d'hystérésis des matériaux destinés à supporter des flux alternatifs. Par exemple, on utilise l'acier à grain orienté pour les noyaux des transformateurs.

### **2) Pertes par courants de Foucault [10]**

Les pertes par courants de Foucault sont provoquées par des courants induits. Ces courants provoquent, par effet Joule, une dissipation d'énergie et un échauffement du circuit magnétique et ils sont d'autant plus importants que la surface traversée par le champ magnétique est grande.

Les pertes par courants de Foucault dépendent du carré de la fréquence et du carré de l'induction.

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

Ces pertes s'expriment par la formule suivante :

$$P_{cF} = k_c e^2 f^2 B^2 \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$P_{cF}$  : Pertes par courants de Foucault  $[\frac{W}{kg}]$ .

$e$  : Epaisseur de la tôle [m].

$k_c$  : Constante qui dépend de la résistance et l'épaisseur du matériau.

$f$  : Fréquence [Hz].

$B$  : Induction magnétique [T].

### 3) Pertes supplémentaires

Les pertes supplémentaires peuvent être considérées comme la somme de deux grandeurs, les pertes résiduelles ou anormales dues à la non sinusoidalité de  $B$ , et les pertes par trainage dues au retard de  $B/H$  à l'aimantation.

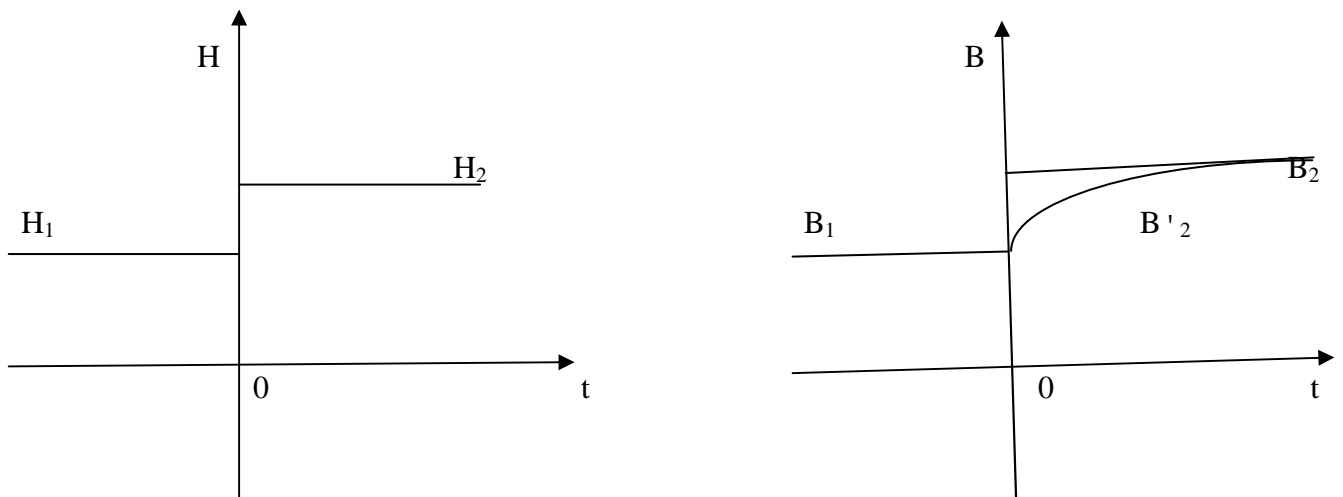


Fig : II-2 Variation de (B, H) en fonction de t.

Quand  $H$  passe instantanément de  $H_1$  à  $H_2$ , l'induction  $B$  passe de  $B_1$  à  $B'_2$ , avant de tendre asymptotiquement vers  $B_2$ .

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

Le déplacement des parois de Bloch peut être assimilé à des courants qui se forment autour de celles-ci et qui contribuent aux pertes supplémentaires auxquelles il faut ajouter la contribution de la non sinusoidalité de l'induction.

### **-L'induction est sinusoidale**

$$P_{dyn} = \eta \cdot P_{CF} \quad (II-7)$$

$\eta$  : Coefficient d'anomalie des pertes.

### **-L'induction n'est pas sinusoidale**

$$P_{dyn} = \eta \left( \frac{F}{F_s} \right)^2 P_{CF} \quad (II-8)$$

Avec :

$F$  : Facteur de forme de l'induction non sinusoidale.

$F_s$  : Facteur de forme de l'induction sinusoidale.

Ceci conduit à des pertes supplémentaires : Selon Bertotti pour une induction sinusoidale :

$$P_{sup} = K_{sup} (B_m f)^{\frac{3}{2}} \quad (II-9)$$

Avec :

$K_{sup}$  : Constante supplémentaire.

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

### **II-2-1-3 Pertes auxiliaires [3]**

Ces pertes sont dues au refroidissement du transformateur, le refroidissement se fait par ventilation si la tension atteint 133% de la tension nominale et avec les pompes si la tension atteint 167% de la tension nominale.

La puissance consommée est d'un cheval vapeur (736 watts) pour les ventilateurs.

### **II-2-2 Pertes dans les moteurs [12]**

Lors du fonctionnement en moteur, la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique n'est pas totale, en effet, une fraction de cette énergie se dissipe sous diverses formes :

#### **Les pertes mécaniques, comprenant**

- Les pertes par frottements aux paliers et les frottements aux balais sur les bagues.
- Les pertes par ventilation et frottement sur l'air.

#### **Les pertes électriques :**

- Les pertes dans les conducteurs.
- Les pertes dans le fer, comprenant
  - ❖ Les pertes par hystérésis dues aux flux principaux.
  - ❖ Les pertes par courants de Foucault dues également aux flux principaux.
- Les pertes fer supplémentaires en charge.

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

### **II-2-2-1 Les pertes mécaniques**

Les pertes mécaniques proviennent du frottement dans les paliers, du frottement des balais sur les collecteurs ou sur les bagues et du frottement de l'air sur l'induit et sur le ventilateur destiné au refroidissement de la machine.

Les pertes proviennent du frottement sur des organes fixes (paliers, balais) contribuant à l'échauffement de la machine. Plus la machine tourne vite plus les pertes mécaniques deviennent importantes.

Ces pertes dépendent de nombreux facteurs et il est très difficile de prédire leurs valeurs. Pour les déterminer avec exactitude, il faut faire des essais sur la machine.

### **II-2-2-2 Les pertes électriques**

Les pertes électriques sont divisées en deux catégories, les pertes dans les conducteurs et les pertes dans le fer.

### **II-2-2-3 Les pertes dans les conducteurs**

Des pertes de puissance sont dissipées sous forme de chaleur, par effet Joule, dans les conducteurs. Les courants circulant dans les conducteurs provoquent aussi une chute de tension entre la source et la charge.

Ces pertes, qui se dégagent sous forme de chaleur, peuvent être exprimées par la formule suivante :

$$P = RI^2 \quad (\text{II-10})$$

R : Résistance de l'enroulement [ $\Omega$ ].

I : Courant qui parcourt l'enroulement [A].

On constate que les pertes sont proportionnelles au carré du courant. Dans les conducteurs en cuivre, on utilise des densités variant de 150A/Cm<sup>2</sup> à 600A/Cm<sup>2</sup>.

Les pertes correspondantes varient d'environ 5 W/Kg jusqu'à 80 W/Kg. Les densités élevées requièrent un bon refroidissement pour éviter les températures excessives.

La faible résistance des balais produit des pertes Joule négligeables comparativement aux pertes électriques occasionnées par la chute de tension entre le balai et le collecteur.

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

### II-2-2-4 Les pertes électriques dans le fer

Il ne se produit aucune perte dans une pièce de fer traversée par un flux qui ne change ni d'intensité, ni de direction. Ainsi lorsqu'un électro-aimant est excité par un courant continu, il se produit des pertes dans le cuivre de la bobine. Seulement, il n'y en a aucune dans le fer du noyau.

Par contre, les pertes importantes se produisent dans les parties en fer où le flux varie en grandeur ou en direction. C'est le cas du circuit magnétique des machines à courant alternatif dans lesquelles le flux est alternatif. C'est aussi le cas de l'induit des machines à courant continu où le flux, bien que constant en intensité, change de sens périodiquement et rapidement.

Les pertes de puissance dans le fer sont de deux types :

#### 1) Pertes par hystérésis

Les pertes par hystérésis sont proportionnelles au nombre de fois que l'aimantation change de sens par seconde, donc, à la vitesse de rotation des parties tournantes.

Ces pertes sont données par l'expression suivante:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_m^2 \quad (\text{II-11})$$

Tel que :

$P_h$  : Pertes par hystérésis [W/Kg].

$K_h$  : Coefficient de pertes par hystérésis.

$B_m$  : Induction magnétique maximale [T].

$f$  : Fréquence [Hz].

#### 2) Pertes par courants de Foucault [3]

Elles résultent des variations temporelles du flux qu'induit une f.e.m dans la masse du fer. Cette f.e.m donne naissance à des courants qui se referment dans cette masse et provoquent des échauffements décrits par la formule suivante:

$$P_{cf} = K_f (e \cdot f \cdot B_m)^2 \quad (\text{II-12})$$

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

Avec :

$P_{cf}$  : Pertes par courant de Foucault [W/Kg].

$e$  : Epaisseur des tôles (mm).

$f$  : Fréquence [Hz].

$B_m$  : Induction magnétique maximale [T].

$K_f$  : Coefficient de pertes par courants de Foucault.

### II-4-2-3 Les pertes supplémentaires en charge [3]

La détermination expérimentale des pertes supplémentaires en charge est l'un des problèmes aigus dans la caractérisation des pertes dans le moteur, mais on peut dire que la définition la plus objective des pertes supplémentaires, peut être exprimée sous forme mathématique en fonction des autres pertes, comme suit :

$$P_{\text{sup}} = P_T - P_{Fv} - P_{fer} - P_{cur} - P_{cus} \quad (\text{II-13})$$

Avec :

$P_{\text{sup}}$  : Pertes supplémentaires [W].

$P_T$  : Pertes totales en charge [W].

$P_{Fv}$  : Pertes par frottements et ventilation [W].

$P_{fer}$  : Pertes dans le fer [W].

$P_{cur}$  : Pertes dans le cuivre du rotor [W].

$P_{cus}$  : Pertes dans le cuivre du stator [W].

### II-3 Pertes dans les câbles [12]

Les pertes dans les câbles sont des pertes par effet Joule qui se dégagent sous forme de chaleur.

On peut les exprimer par :

$$P_{ca} = 3.L.R.I^2 \quad (\text{II-14})$$

Avec :

$P_{ca}$  : Pertes de puissance dans les câbles [W].

$L$  : Longueur du câble [m].

$R$  : Résistance linéique du câble [ $\Omega/m$ ].

$I$  : Courant traversant le câble [A].

## II-4 Les pertes dans les condensateurs

Aucun isolant n'est parfait, le diélectrique d'un condensateur présente des pertes qui dépendent de :

- La nature de l'isolant.
- La fréquence d'utilisation.
- La température.
- La tension appliquée au condensateur.
- Le volume du diélectrique.

Actuellement on accorde une attention importante à l'évolution des pertes diélectriques, ainsi qu'aux différents facteurs qui influent sur elles.

Les pertes dans les condensateurs sont des pertes diélectriques qui se manifestent dans les isolants soumis à des champs électriques alternatifs sinusoïdaux, qui sont des pertes d'énergie active sous forme thermique.

Ces pertes se caractérisent par le facteur des pertes diélectriques ( $\tan(\delta)$ ).

Elles sont données par :

$$P_N = C.w.\tan(\delta)U_N^2 \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$w = 2\pi f$  : Pulsation [rd/s].

$f$  : Fréquence [Hz].

$P_N$  : Pertes de puissance dans le diélectrique [W].

$U_N$  : Tension nominale [V].

$C$  : Capacité du diélectrique [F].

$\tan(\delta)$  : Tangente de l'angle de dissipation.

Ces pertes peuvent être dues à la conduction mais surtout à l'hystérésis diélectrique.

### 1) Pertes par conduction

Elles sont dues au courant de fuite qui traverse le diélectrique, comme si celui-ci était une résistance, cette résistance de fuite ou d'isolement est déterminée par la résistivité de l'isolant utilisé et par les dimensions du condensateur.

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

Les pertes par conduction peuvent être calculées par la formule :

$$P_c = R_i I^2 \quad (\text{II-16})$$

Avec :

$P_c$  : Pertes par conduction [W].

$R_i$  : Résistance d'isolement [ $\Omega$ ].

$I$  : Courant de fuite qui traverse le diélectrique [A].

### **2) Pertes par hystérésis diélectrique**

L'énergie dissipée dans le diélectrique du condensateur en une seconde, correspond à une puissance, comme pour les pertes par conduction. Le diélectrique peut être assimilé à une résistance fictive  $R_{es}$  (résistance équivalente série) qui dissiperait la même puissance dans des conditions identiques.

Du point de vue de pertes par hystérésis, le condensateur peut être représenté par un condensateur idéal  $C$  en série avec la résistance  $R_s$ . Les tensions  $U_p$  et  $U_c$  sont déphasées de  $90^\circ$ , l'angle  $\delta$  est appelé angle de pertes.

On utilise la tangente de cet angle de pertes pour exprimer la qualité du diélectrique. En remplaçant  $U_p$  et  $U_c$  par leurs valeurs en fonction de  $R_s$  et  $X_c$  (capacité de  $C$ ) on obtient la formule suivante :

$$\tan(\delta) = 2\pi.f.C.R_s \quad (\text{II-17})$$

Avec :

$\tan(\delta)$  : Tangente de l'angle de dissipation.

$f$  : Fréquence [Hz].

$C$  : Capacité [F].

$R_s$  : Résistance [ $\Omega$ ].

Les pertes sont gênantes car elles peuvent provoquer un échauffement du condensateur et la modification de ses caractéristiques (permittivité du diélectrique, résistance d'isolement, augmentation de l'angle de pertes...).

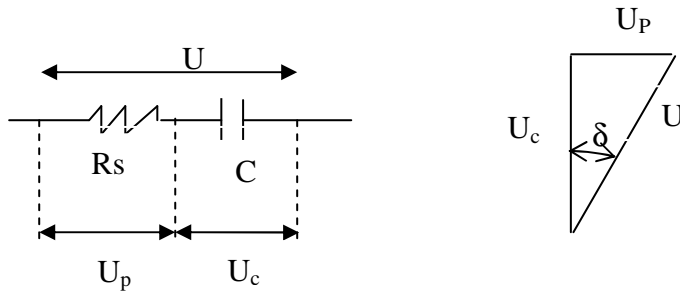


Fig. II-3 : Représentation de condensateur du point de vue des pertes par hystérésis diélectrique.

## II-5 Les pertes dans les redresseurs [3]

Les redresseurs fournissent, à partir d'une source de tension alternative, une tension continue.

Les pertes de commutation s'ajoutent aux pertes statiques des états passants et bloqués. Sur la base d'un fonctionnement cyclique de fréquence  $f$ , on peut écrire, en termes de puissance moyenne dissipée,  $P_{tot}$ .

$$P_{tot} = f \cdot E_{on,off} + d(U_0 I + R I^2) + (1-d) V I_R \quad (\text{II-18})$$

Avec :

$P_{tot}$  : Pertes de puissance moyenne dissipée [W].

$f$  : Fréquence [Hz].

$E_{on,off}$  : Pertes statiques des états passants et bloqués [W].

$d$  : Rapport du temps de conduction à la période du cycle de commutation (rapport cyclique).

$U_0$  : Tension de seuil de conduction [V].

$I$  : Courant qui traverse le redresseur [A].

$I_R$  : Courant de fuite de l'état bloqué [A].

$R \cdot I^2$  : Chute de tension dans la résistance apparente de la base du dispositif.

## II-6 Rendement [9]

Le rendement d'une machine est le rapport entre la puissance utile et la puissance fournie à la machine, la puissance fournie est égale à la somme de la puissance utile et les pertes.

On a alors :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P} \quad (\text{II-19})$$

Avec :

$\eta$  : Rendement de la machine.

$P_2$  : Puissance utile.

$P_1$  : Puissance fournie.

$P$  : Pertes de puissance.

Le rendement varie avec la puissance utile et les pertes. Il est bon de retenir que le rendement d'un moteur est faible aux faibles charges. On aura donc intérêt à choisir la capacité d'un moteur destiné à entraîner une charge de valeur déterminée, de façon que la puissance nominale de ce moteur soit à peu près égale à la puissance exigée par la charge.

## **II-7 Solutions pour minimiser les pertes de puissance dans une machine électrique**

### **1) Pertes par hystérésis [13]**

Dans une machine électrique, l'énergie transformée en chaleur par hystérésis est une énergie perdue, on parle de pertes par hystérésis. Pour les rendre aussi faible que possible, une solution proposée est d'utiliser des matériaux dont la valeur donnée de l'induction maximale  $B_m$  est celle du cycle de surface relativement faible, c.-à-d. les matériaux doux.

### **2) Pertes par courants de Foucault [9]**

Pour minimiser les pertes par courants de Foucault, on est conduit à feuilletter le noyau de l'induit. Le noyau est alors formé d'un empilage de tôles minces, isolées les unes des autres afin d'empêcher le passage du courant d'une tôle à une autre. Les tôles sont disposées parallèlement au sens des lignes de force.

Les pertes sont atténuées davantage en augmentant la résistivité de la tôle par addition de 3 à 4% de silicium. Avec des tôles au silicium de 0.35 mm d'épaisseur, on peut limiter ces pertes à une petite fraction de la puissance.

## **II-8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit les pertes de puissance dans les éléments constituant un réseau électrique (dans les machines électriques, câbles, condensateurs et dans les redresseurs).

Les machines électriques peuvent être classées en deux groupes : celles qui comprennent des parties tournantes (moteurs, générateurs) et celles qui n'en ont pas (transformateurs). Des pertes

## Chapitre II : Les pertes de puissance dans un réseau électrique.

électriques et mécaniques sont produites dans les machines tournantes. Dans les machines fixes, seules les pertes électriques sont produites.

Les câbles, les redresseurs et les condensateurs ayant aussi des pertes.

Dans le réseau électrique, le transfert d'énergie d'un point à un autre donne lieu à un échauffement de différentes parties du réseau électrique qui se traduit par les pertes de puissance qui provoquent une diminution du rendement dans les machines électriques.

# **Chapitre III**

*Evaluation des pertes de puissance à la présence d'harmonique*

### **III -1 Introduction**

L'augmentation du taux de distorsion harmonique en tension, en courant ou les deux ensembles, influe sur les pertes de puissance dans les éléments du réseau électrique (câbles, transformateurs, condensateurs, redresseurs et moteurs).

Les harmoniques génèrent des échauffements dans les condensateurs et provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et dans les transformateurs.

Certains matériels sont sensibles à la fréquence harmonique, principalement, sous forme d'échauffements supplémentaires dus aux distorsions harmoniques du courant (pertes Joule dans les lignes et dans les enroulements des machines ...) et aux distorsions harmoniques de tension (pertes dans les circuits magnétiques et dans les diélectriques...).

### **III-2 Pertes de puissance dans les machines électriques**

On a vu dans le deuxième chapitre que les machines électriques sont divisées en deux groupes, machines tournantes (moteurs, génératrices...) et les machines statiques (transformateurs...).

#### **III-2-1 Pertes de puissance dans les transformateurs [12]**

Les harmoniques ont deux impacts négatifs sur les transformateurs. D'une part, ils augmentent les pertes en charge, d'autre part, ils augmentent la température des spires et de la structure métallique, réduisant la durée de vie du transformateur.

En présence des courants harmoniques, les transformateurs subissent des pertes supplémentaires :

-Dans les enroulements, liés à la circulation des courants harmoniques dus à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence).

-Dans le circuit magnétique : Des pertes fer qui sont caractérisées par l'augmentation de l'hystérésis et les courants de Foucault.

##### **III-2-1-1 Pertes Joule dans les enroulements [3]**

Les pertes Joule sont proportionnelles au carré de l'intensité efficace du courant, donc intégrant les harmoniques.

Ces pertes sont données par la formule suivante :

$$P_{jh} = P_1 + R_h \cdot I_{eff}^2 \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$$I_{eff}^2 = \sum_{h=1}^n I_h^2 = I_1^2 + \sum_{h=2}^n I_h^2$$

$$I_{eff}^2 = I_1^2 \left( 1 + \sum_{h=2}^n \frac{I_h^2}{I_1^2} \right) \quad (\text{III-2})$$

$P_{jh}$  : Pertes Joule en présence d'harmoniques [w].

$P_1$  : Pertes de puissance dues au fondamental [W].

$R_h$  : Résistance au rang harmonique h [ $\Omega$ ].

$I_{eff}$  : Courant efficace [A].

$I_h$  : Courant au rang harmonique h [A].

$I_1$  : Courant à la fréquence du fondamental [A].

### III-2-1-2 Pertes fer dans le circuit magnétique

Elles sont liées à la présence des tensions harmoniques ou des courants harmoniques, elles prennent leur importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques.

Dans le circuit magnétique on distingue deux types de pertes :

- Pertes par hystérésis.
- Pertes par courants de Foucault.

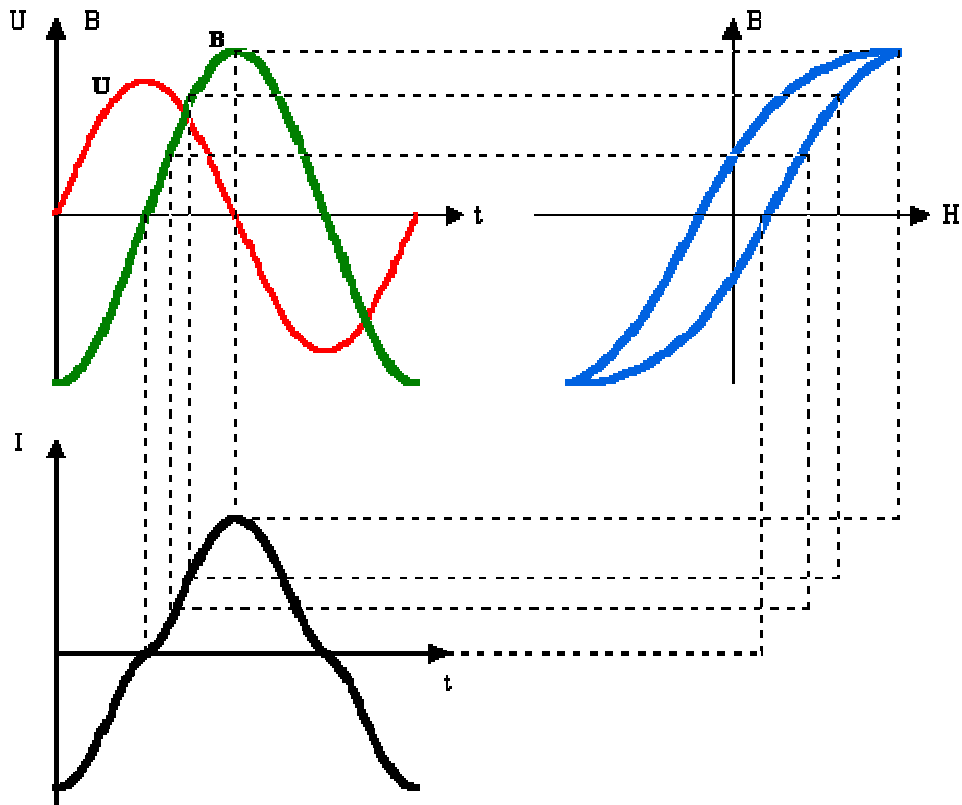
#### 1) Les pertes par hystérésis [12]

Une inductance à noyau de fer est génératrice d'harmoniques pour deux raisons :

- La non linéarité de l'induction B et du champ H (production d'harmoniques de rangs pairs).
- La présence d'un cycle d'hystérésis (production d'harmoniques de rangs impairs).

Nous nous proposons de représenter point par point la courbe  $i(t)$  du courant d'excitation d'une bobine à noyau de fer alimentée sous une tension sinusoïdale U.

On dispose, d'une part, du cycle d'hystérésis de la bobine, cycle que l'on peut, par un changement d'échelle, mettre sous la forme  $B(t)$ , d'autre part, du graphe  $B(t)$  qui est, comme le flux, est une sinusoïdale décalée de  $90^\circ$  en arrière par rapport à la tension d'alimentation.



**Fig. III-1 Influence du cycle d'hystérésis sur la forme du courant  $i(t)$  absorbé par une inductance.**

Le schéma ci-dessus montre l'influence du cycle d'hystérésis sur la forme du courant  $i(t)$  absorbé par une inductance. Ce courant, en retard d'un quart de période sur la tension, n'est pas une fonction sinusoïdale, mais une fonction périodique qui pourra être décomposée en série de Fourier.

Dans ces conditions, la puissance instantanée à une valeur moyenne qui n'est pas nulle.

L'hystérésis entraîne une consommation d'énergie qui est, comme les courants de Foucault, sous forme de chaleur au sein du circuit magnétique.

Pour chaque cycle décrit, l'énergie perdue par unité de volume est proportionnelle à l'aire du cycle.

En conséquence, ces pertes augmentent avec la fréquence et avec l'induction maximale.

Pour les réduire, on doit utiliser des tôles de qualité (tôles au silicium) qui ont des cycles d'hystérésis très étroits.

En l'absence de la saturation, la déformation du courant pourra être considérée négligeable, ces pertes sont déterminées par la formule suivante :

$$P_{hys} = V.S.f.h \quad (\text{III-3})$$

Avec :

$P_{hys}$  : Pertes par hystérésis en présence d'harmoniques [W].

$V$  : Volume du circuit magnétique [ $\text{m}^3$ ].

$S$  : Surface du cycle d'hystérésis [TA/m].

$f$  : Fréquence [Hz].

$h$  : Rang harmonique.

## 2) Pertes par courants de Foucault [12]

D'après la formule suivante, ces pertes sont proportionnelles au carré de la fréquence et au carré de l'induction efficace.

$$P_{cf} = \frac{\pi^2 d^2}{6\rho} B_{eff}^2 f^2 \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$P_{cf}$  : Pertes par courants de Foucault [W].

$d$  : Épaisseur des tôles magnétiques [mm].

$B_{eff}$  : Induction efficace [T].

$f$  : Fréquence du rang h [Hz].

$\rho$  : Résistivité du matériau [ $\Omega / \text{mm}^2$ ].

Les pertes de puissance totales en présence d'harmoniques dans les transformateurs sont données par la formule suivante :

$$P_{ht} = P_1 + \frac{P_N}{(1+K_w)} \sum_h \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2 \left[ 1 + \frac{K_w \sum_h (hI_h)^2}{\sum_h (I_h)^2} K_{h1} \right] \quad (\text{III-5})$$

Avec :

$P_{ht}$  : Pertes de puissance totales dans un transformateur [W].

$P_1$  : Pertes de puissance du fondamental [W].

$P_N$  : Pertes de puissance dans le transformateur [W].

$I_h$  : Courant harmonique de rang h [A].

$K_w = 0,04$  : Coefficient des pertes fer.

$$K_{h1} = -0,78 + (3,853.h^{1/2}) - (2,263.h) + (0,1058.h^{1,5}) + (0,2337.h^2) - (0,06478.h^{2,5}) + (0,0052535.h^3) \dots$$

### III-2-2 Pertes de puissance dans les moteurs [12] [16]

La présence des courants harmoniques provoque des vibrations dues aux couples mécaniques pulsatoires engendrés par les champs tournants harmoniques, entraînant une perte de stabilité mécanique.

La présence des tensions harmoniques se traduit par la circulation des courants harmoniques dans les enroulements du moteur et crée, donc, des échauffements supplémentaires dus aux pertes supplémentaires (augmentation des pertes cuivre et des pertes fer au stator et surtout au rotor dues à la différence importante de vitesse entre les champs tournants harmoniques et le rotor).

Les pertes de puissance dans les moteurs en présence d'harmoniques s'expriment par la formule suivante :

$$P_{hM} = P_1 + 35P_N \left( \frac{V_1}{V_N} \right)^2 \sum_{h=2} \frac{1}{h} \left( \frac{V_h}{V_1} \right)^2 \quad (\text{III-6})$$

Avec :

$$P_N = 0,746HP \left( \frac{100-\eta}{\eta} \right) \quad (\text{III-7})$$

Où :

$P_{hM}$  : Pertes de puissance dans le moteur en présence d'harmoniques [W].

$P_1$  : Pertes de puissance du fondamental [W].

$P_N$  : Pertes de puissance dans le moteur [W].

$V_1$  : Tension du fondamental [V].

$V_N$  : Tension nominale [V].

$h$  : Rang harmonique.

$V_h$  : Tension au rang harmonique h [V].

$HP = 736$  [W].

$\eta$  : Rendement [%].

### II-3 Pertes de puissance dans les câbles [12] [8]

Un courant harmonique circulant dans un conducteur provoque des pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre ou circulent les courants harmoniques de rang harmonique 3 homopolaires, entraînant une augmentation des pertes diélectriques dans l'isolant. Si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable, elles peuvent entraîner des détériorations.

Le taux de distorsion global ne doit pas dépasser 10%, il doit rester inférieur à 7% sur chaque harmonique.

Les pertes de puissance dans les câbles en présence d'harmoniques s'expriment par la formule qui suit :

$$P_c = P_1 + 3L \sum_{h=2}^n R_h I_h^2 \quad (\text{III-8})$$

Avec :

$$P_1 = 3LR_1 I_1^2 \quad (\text{III-9})$$

$P_c$  : Pertes de puissance dans les câbles en présence d'harmoniques [W].

$P_1$  : Pertes de puissance du fondamental [W].

$L$  : Longueur du câble [m].

$R_h$  : Résistance linéique au rang harmonique h [ $\Omega$ /m].

$I_h$  : Courant de rang harmonique h [A].

$R_1$  : Résistance linéique au fondamental [ $\Omega$  /m].

$I_1$  : Courant du fondamental [A].

La puissance dissipée est limitée pour éviter les points chauds. Les câbles sont dimensionnés pour supporter un courant efficace. La présence des composantes harmoniques se traduit donc par une nécessité de déclassement à 50Hz, du courant admissible.

### III-4 Pertes de puissance dans les condensateurs [12]

Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang élevé des harmoniques.

Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à la tension fondamentale trop élevée ou à la présence des tensions harmoniques.

Lorsqu'un condensateur est parcouru par un courant distorsionné, la tension à ses bornes n'a pas la même forme d'onde que celle du courant. Ceci est dû au fait que le condensateur ne présente pas la même réactance à la fréquence fondamentale et aux harmoniques. Les pertes dans les condensateurs sont aussi affectées par la présence des harmoniques. Ces pertes ont leur origine dans le diélectrique qui sépare les plaques métalliques. Ces pertes aboutissent au vieillissement des condensateurs.

Ces pertes sont définies par l'angle de pertes ( $\delta$ ) du condensateur. On peut exprimer ces pertes par la formule suivante :

$$P_{hcond} = P_1 + P_1 \sum_{h=2} h \left( \frac{V_h}{V_1} \right)^2 \quad (\text{III-10})$$

Avec :

$$P_1 = 2\pi f C (\tan(\delta)) V_N^2 \quad (\text{III-11})$$

Où :

$P_{hcond}$  : Pertes de puissance dans le condensateur en présence d'harmoniques [W].

$P_1$  : Pertes de puissances dans le condensateur dû à la fréquence du fondamental [W].

$h$  : Rang harmonique.

$V_h$  : Tension au rang harmonique h [V].

$V_1$  : Tension de l'onde fondamentale [V].

$f$  : Fréquence [Hz].

$C$  : Capacité [F].

$\tan(\delta)$  : Tangente de l'angle de dissipation.

$V_N$  : Tension nominale [V].

La relation (III-10) est valable si on suppose que :

$$\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \dots = \delta_h \quad \text{Et} \quad V_1 = V_N$$

### III-5 Pertes de puissance dans les redresseurs [3]

L'électronique de puissance a donné naissance à de nombreuses applications offrant au client un confort, une flexibilité et une efficacité. Cependant, au cours de la dernière décennie, certains problèmes ont surgi tels que les pertes de puissance dues aux harmoniques générées par des charges non linéaires.

Les pertes de puissance dans les redresseurs en présence d'harmoniques sont exprimées par la formule suivante :

$$P_{hred} = 3R_{hred}I_h^2 \quad (\text{III-12})$$

Avec :

$$I_h = \frac{I_1}{\left(h - \frac{5}{h}\right)^{1,2}} \quad (\text{III-13})$$

$$R_{hred} = \frac{1}{\pi^2 \sigma \delta_a} K \left( \frac{r}{a} \right) \left( 1 - \exp\left(-\frac{2b}{\delta}\right) \right) \quad (\text{III-14})$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma f h \mu_0}} \quad (\text{III-15})$$

Où :

$P_{hred}$  : Pertes de puissance dans les redresseurs en présence d'harmoniques [W].

$I_h$  : Courant harmonique [A].

$I_1$  : Courant fondamental [A].

$R_{hred}$  : Résistance au rang harmonique h [ $\Omega$ ].

$\mu_0$  : Perméabilité du vide [ $4\pi 10^{-7}$ ].

$r$  : Facteur de correction.

$f$  : Fréquence [Hz].

$\sigma = 5,88 * 400 * 10^7$ .

$K$  : Facteur de déclassement.

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{n=2}^{n=\infty} h^2 n^{1,6}}} \quad (\text{III-16})$$

$h$  : Taux individuel d'harmoniques

### III-6 Rendement

Le rendement d'une machine électrique est le rapport entre la puissance utile et la puissance fournie à la machine, la puissance fournie est égale à la somme de la puissance utile et les pertes

$$P (P = P_1 + P_h)$$

On peut exprimer le rendement par la formule suivante :

$$\eta = \frac{P_2}{P_0} = \frac{P_2}{P_2 + (P_1 + P_h)} \quad (\text{III-17})$$

Avec :

$\eta$  : Rendement de la machine [%].

$P_2$  : Puissance utile [W].

$P_0$  : Puissance fournie [W].

$P_1$  : Pertes de puissance de l'onde du fondamental [W].

$P_h$  : Pertes de puissance dues aux harmoniques [W].

On conclut, alors, que la pollution harmonique diminue le rendement du fait de l'apparition des pertes de puissance dues aux harmoniques dans l'expression du rendement dans le dénominateur.

### III-7 Comparaison

La pollution harmonique influe sur les pertes de puissance et cela se traduit par l'augmentation de ces pertes avec l'apparition des pertes dues aux harmoniques.

Dans le cas où on ne tient pas compte de la présence d'harmoniques, les pertes de puissance sont égales à celles du fondamental.

Dans le cas où on tient compte de la présence d'harmoniques, les pertes de puissance sont égales à celles du fondamental plus les pertes de puissance dues aux harmoniques.

### **III-8 Solutions pour minimiser les pertes dues aux harmoniques**

La réduction des pertes de puissance dues aux harmoniques revient à la réduction de la production des harmoniques (confinement des harmoniques) et à la minimisation d'harmoniques par filtrage.

#### **III-8-1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique [15]**

On n'élimine pas les courants harmoniques, on ne fait qu'éviter leurs effets néfastes pendant une période limitée. Pour les installations nouvelles, on surdimensionne tous les éléments. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques. La conséquence est l'impossibilité de tirer profit du potentiel réel de l'installation. On surdimensionne les transformateurs, les câbles et les condensateurs...

#### **III-8-2 Confinement des harmoniques**

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation.

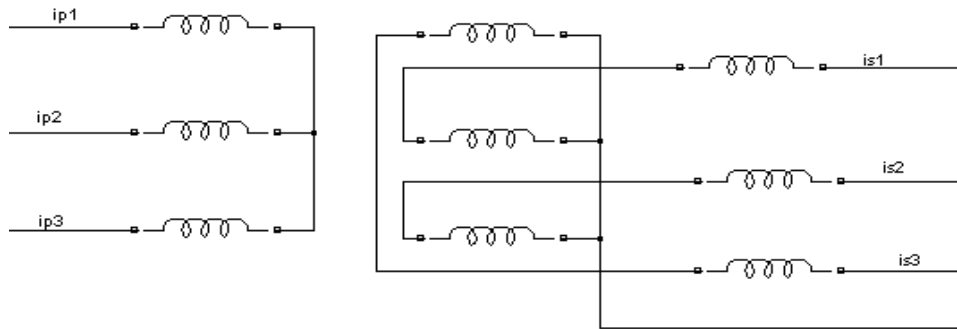
Les matériels susceptibles de produire des tensions et des courants harmoniques doivent être conçus pour minimiser ces effets.

##### **III-8-2-1 Transformateur**

Les harmoniques produits par les transformateurs sont liés à la saturation du circuit magnétique de cet appareil. Pour réduire leur niveau, on intervient dans la construction du noyau. En général, on l'exécute en tôles en grains orientés.

- **Les harmoniques de rang 3 et multiples de 3**

L'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag, permet d'éliminer, au primaire, les courants de pulsation  $3k$ .



**Fig. III-2 Schéma d'un transformateur  $YZ_n$ .**

### III-8-2-2 Redresseurs

Le rang des fréquences harmoniques étant  $h = k_n \pm 1$  (où  $n$  est l'indice de pulsation de la tension redressée et  $k$  un entier naturel) et l'amplitude des courants harmoniques étant inversement proportionnels à leurs rangs, pour annuler les harmoniques les plus gênants (de rangs faibles), on augmente l'indice de pulsation en utilisant des groupements de ponts redresseurs alimentés, chacun, par un enroulement séparé, par exemple :

Un pont hexaphase a un indice de pulsation  $n=6$  (rang 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25 etc.) pont dodécaphase  $n=12$  (rang 11, 13, 17, 19, 23, 25 etc.).

L'augmentation de l'indice de pulsation peut se traduire par une augmentation du coût du matériel.

### III-8-2-3 Inductances (selfs) série [15]

Cette solution, utilisée pour les variateurs de vitesse et les redresseurs triphasés, consiste à insérer une inductance série à l'entrée d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est sensiblement divisée par deux.

### III-8-3 Les solutions de filtrage

Les solutions de filtrage sont conçues pour filtrer les harmoniques. On les a vus dans le premier chapitre. Parmi ces filtres, on distingue :

- ✓ Filtre passif
- ✓ Filtre actif
- ✓ Filtre hybride

### III-9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit les pertes de puissance en présence d'harmoniques dans un réseau électrique (dans les machines électriques, câbles, condensateurs et redresseurs).

On constate qu'en présence d'harmoniques, les pertes de puissance augmentent (pertes du fondamental plus les pertes dues aux harmoniques), ce qui conduit à la diminution du rendement dans les machines.

A la fin du chapitre on a proposé quelques solutions pour réduire les harmoniques (réduction des harmoniques et les solutions de filtrage) dans le but de minimiser les pertes de puissance dues à ces harmoniques.

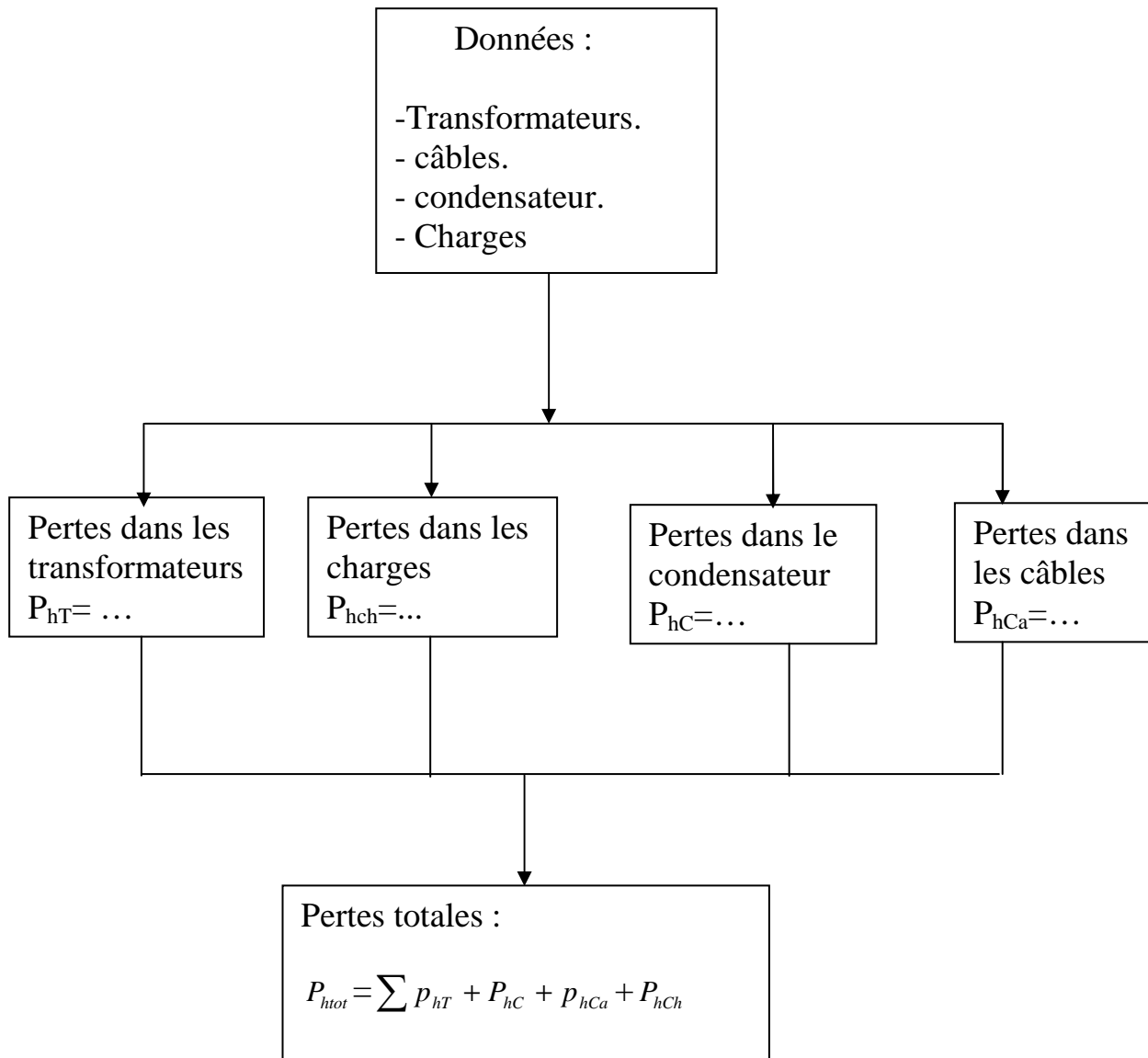
# **Chapitre IV**

## **Application sous MATLAB**

### IV-1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons un exemple d'application pour lequel nous avons évalué les pertes de puissance dues aux harmoniques dans chaque élément du réseau industriel.

L'évaluation des pertes de puissance se fera à l'aide d'un programme de calcul réalisé sous MATLAB, il est représenté sous la forme d'organigramme ci-dessous.

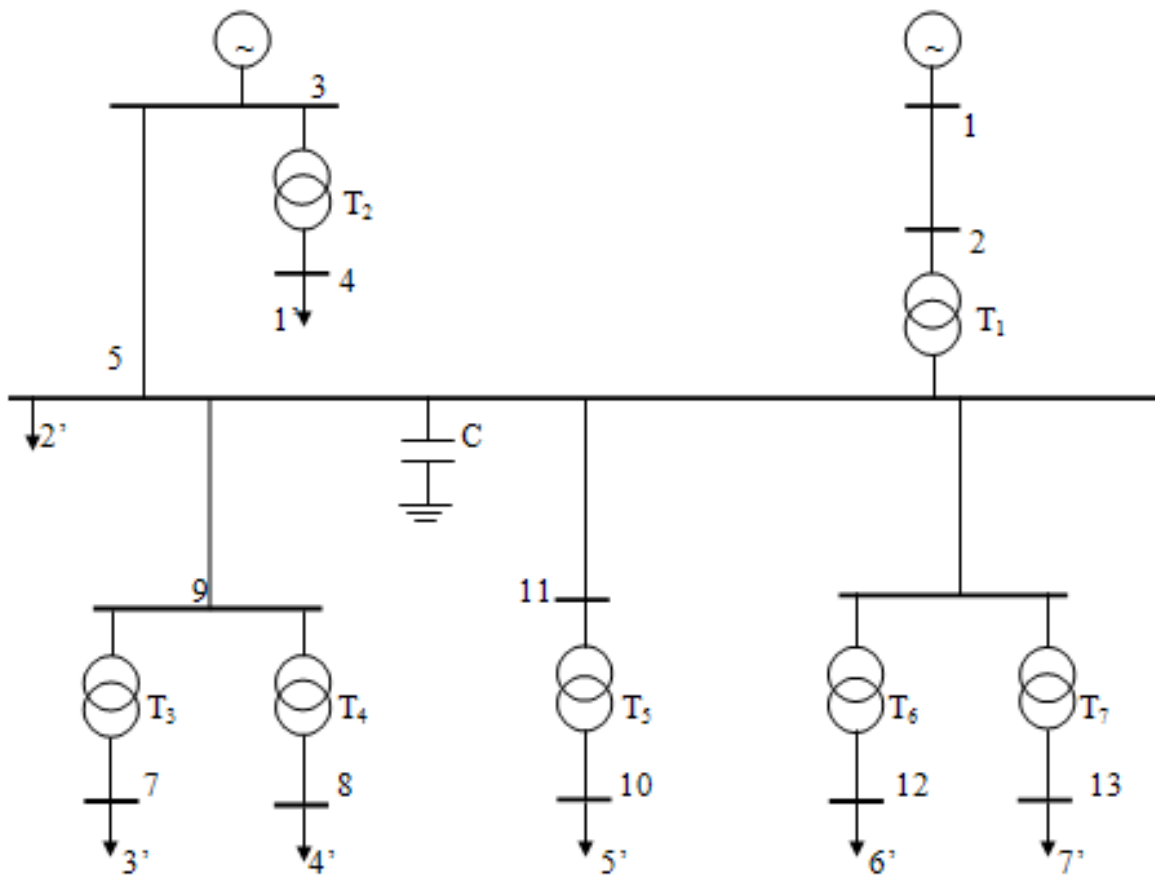


**Fig. IV-1 : Organigramme de calcul.**

### IV-2-Application

L'application se fera sur un réseau de distribution industriel équilibré constitué de deux générateurs, un générateur d'approvisionnement de service ( $G_1$ ), un générateur local ( $G_2$ ), treize jeux de barre, sept transformateurs, un condensateur, une charge polluante raccordée au jeu de barre (7) et cinq charges saines. Ce réseau est extrait à partir d'un système commun qui est utilisé dans de nombreux calculs et des exemples de la série IEEE color book séries.[ ]

L'installation est alimentée par une tension de service de 69KV et le réseau de distribution local fonctionne à 13,8 KV. Le système est représenté par la figure IV.2



**Fig .IV-2 : Réseau industriel équilibré.**

La modélisation du schéma de la figure IV.2 est représenté par la figure IV .3 et IV .4

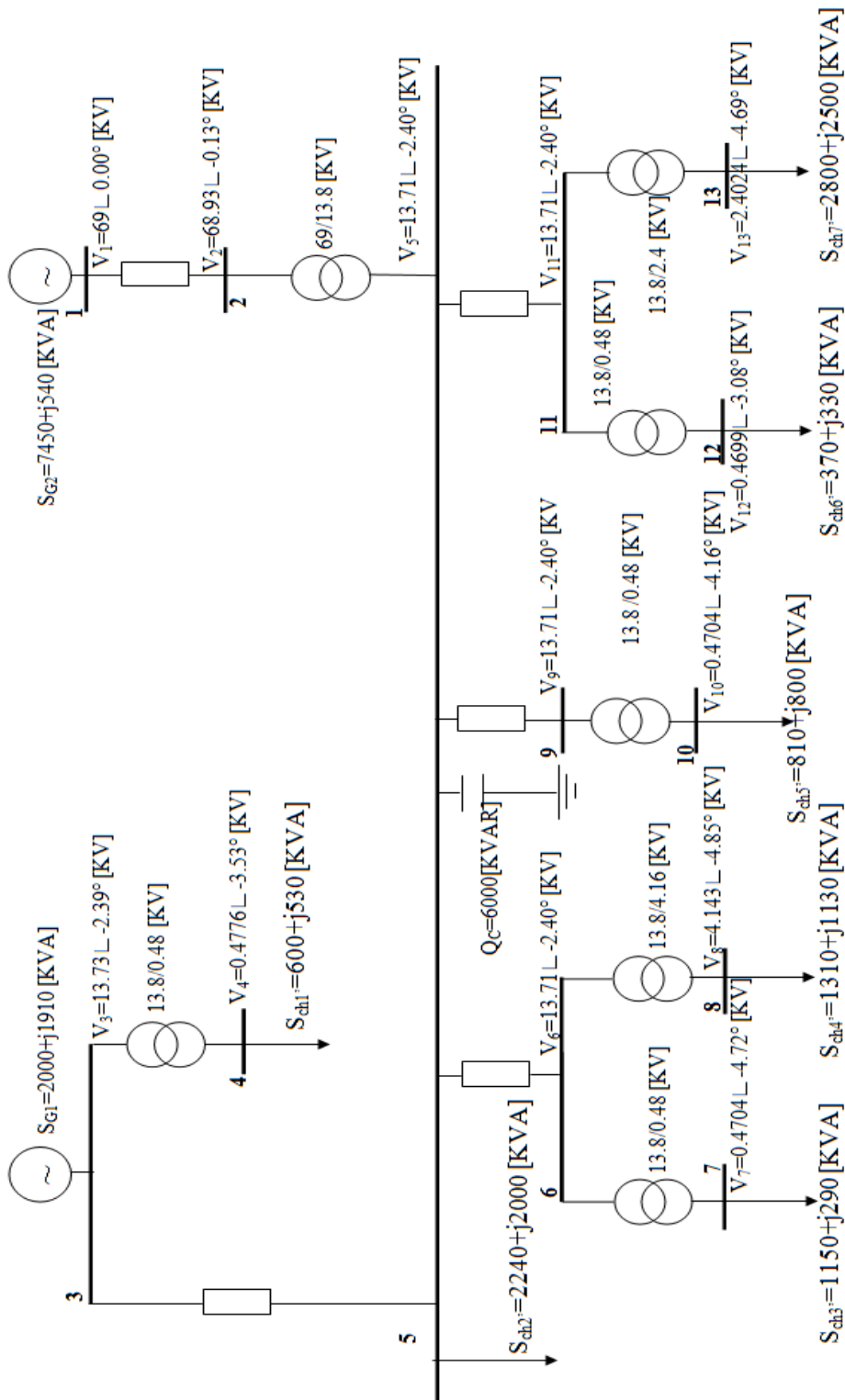


Fig. IV-2 : Modélisation du réseau de la figure IV-1.

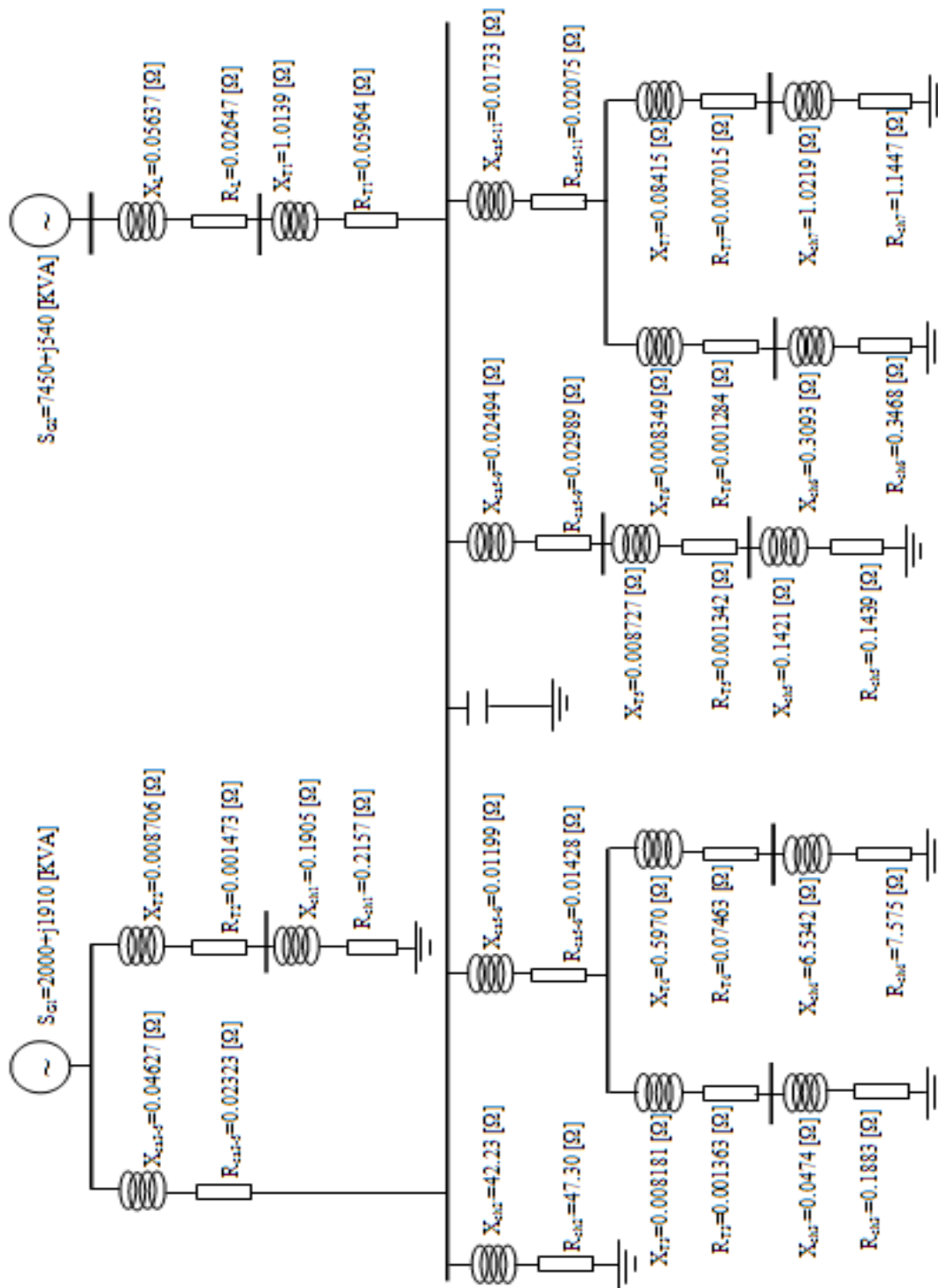


Fig. IV-3 : Modélisation du réseau de la figure IV-1.

### IV-3 Représentation des données des éléments du réseau

#### IV-3-1 Les données des transformateurs

Les données des transformateurs sont représentées dans le tableau suivant :

	$S_{\text{banc}}$ [KVA]	$S_{\text{banc}}$ [KVA]	$R_{\text{Tanc}}$ [Pu]	$X_{\text{Tanc}}$ [Pu]	$R_{\text{Tnou}}$ [Pu]	$X_{\text{Tnou}}$ [Pu]	$U_{\text{nsecd}}$ [KV]	$Z_b$ [Ω]	$R_T$ [Ω]	$X_T$ [Ω]
Transfo $T_1$	15000	10000	0.004698	0.079862	0.003132	0.05324	13.8	19.044	0.05964	1.0139
Transfo $T_2$	1500	10000	0.009593	0.056694	0.06395	0.3779	0.48	0.02304	0.001473	0.008706
Transfo $T_3$	1250	10000	0.007398	0.044388	0.05918	0.3551	0.48	0.02304	0.001363	0.008181
Transfo $T_4$	1725	10000	0.007442	0.059537	0.04314	0.3451	4.16	1.730	0.07463	0.5970
Transfo $T_5$	1500	10000	0.008743	0.056831	0.05828	0.3788	0.48	0.02304	0.001342	0.008727
Transfo $T_6$	1500	10000	0.008363	0.05436	0.05575	0.3624	0.48	0.02304	0.001284	0.008349
Transfo $T_7$	3750	10000	0.004568	0.05481	0.01218	0.1461	2.4	0.576	0.007015	0.08415

**Tableau IV-1 Données des transformateurs.**

**IV-3-2 Les données des charges**

Les données des charges sont représentées dans le tableau suivant :

	P [KW]	Q [KVAR]	$U_n$ [KV]	Tg ( $\Phi$ )	$R_{ch}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ch}$ [ $\Omega$ ]	$Z_b$ [ $\Omega$ ]	$R_{ch}$ [pu]	$X_{ch}$ [pu]
Charge 1'	600	530	0.48	0.8833	0.2157	0.1905	0.02304	9.362	8.2682
Charge 2'	2240	2000	13.8	0.8928	47.30	42.23	19.044	2.484	2.217
Charge 3'	1150	290	0.48	0.2521	0.1883	0.0474	0.02304	8.1727	2.0572
Charge 4'	1310	1130	4.16	0.8626	7.5751	6.5342	1.7305	4.3768	3.775
Charge 5'	810	800	0.48	0.9876	0.1439	0.1421	0.02304	6.249	6.1671
Charge 6'	370	330	0.48	0.8918	0.3468	0.3093	0.02304	15.05	13.42
Charge 7'	2800	2500	2.4	0.8928	1.1447	1.0219	0.576	1.986	1.774

**Tableau IV-2 Données des charges.**

**IV-3-3 Les données des câbles**

Les données des câbles sont représentées dans le tableau suivant :

	$R_{ca}$ [pu]	$X_{ca}$ [pu]	$Z_b$ [ $\Omega$ ]	$R_{ca}$ [ $\Omega$ ]	$X_{ca}$ [ $\Omega$ ]
Câble (3-5)	0.00122	0.0243	19.044	0.02323	0.04627
Câble (5-6)	0.00075	0.00063	19.044	0.01428	0.01199
Câble (5-9)	0.00157	0.00131	19.044	0.02989	0.02494
Câble (5-11)	0.00109	0.00091	19.044	0.002075	0.01733

**Tableau IV-3 Données des câbles.**

**IV-3-4 Les données de la ligne**

$$R_L=0.00139 \text{ Pu} =0.02647 \Omega.$$

$$X_L=0.00296 \text{ Pu}=0.05637 \Omega.$$

**IV-3-5 Condensateur**

$$Q_c=6000\text{KVAR}$$

$$X_C=31,74\Omega$$

$$C=8,36*10^{-5}\text{ F}$$

**IV-3-6 Les données de la source harmonique**

Les données de la source harmonique sont données dans le tableau suivant :

Harmoniques	Pourcentage [%]	Angle relative [°]
1	100.00	0.00
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 IV-4 Données de la source harmonique.**

## IV-4 Les impédances

### IV-4-1 Les impédances des charges

Les impédances des charges en pu de l'onde fondamentale jusqu'à la 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	Charge1	Charge2	Charge3	Charge4	Charge5	Charge6	Charge7
1	12.49	3.366	8.427	5.779	8.779	20.16	2.662
5	42.38	11.35	13.13	19.37	31.47	68.76	9.089
7	56.64	15.70	16.55	26.78	43.61	95.13	12.56
11	91.43	24.50	24.05	41.75	68.11	148.38	19.64
13	107.88	28.92	27.97	49.26	80.41	175.10	23.14
17	140.86	37.77	35.91	64.31	105.02	228.63	30.22
19	157.36	42.19	39.92	71.85	117.33	255.42	33.75
23	190.39	51.05	48.01	86.93	141.97	309.02	40.84
25	206.91	55.47	52.07	94.47	154.29	335.83	44.39
29	239.96	64.33	60.20	109.55	178.94	389.47	51.47
31	256.48	68.76	64.29	117.10	191.28	416.29	55.02
35	289.53	77.62	72.46	132.19	215.93	469.94	62.12
37	306.06	82.05	76.54	139.73	228.26	496.76	65.66

**Tableau IV-5 : Les impédances des charges.**

**IV-4-2 Les impédances des câbles**

Les impédances des câbles en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	Câble (3-5)	Câble (5-6)	Câble (5-9)	Câble (5-11)	Ligne (1-2)
1	0.0243	0.00097	0.002	0.0014	0.0032
5	0.1215	0.00318	0.0066	0.0046	0.0148
7	0.1701	0.0044	0.0092	0.0063	0.0207
11	0.2673	0.0069	0.0144	0.010	0.0326
13	0.3155	0.0081	0.0170	0.0118	0.0384
17	0.4131	0.0107	0.0222	0.0155	0.0521
19	0.4617	0.0119	0.0248	0.0172	0.0579
23	0.5589	0.0145	0.0301	0.0209	0.0694
25	0.6075	0.0157	0.0327	0.0227	0.0752
29	0.7047	0.0182	0.0379	0.0263	0.0869
31	0.7533	0.0195	0.0406	0.0282	0.0927
35	0.8505	0.0220	0.0458	0.0318	0.1045
37	0.8991	0.0233	0.0484	0.0336	0.1103

**Tableau IV-6 : Les impédances des câbles et de la ligne.**

## IV-5 Calcul des courants dans les différents éléments

### IV-5-1 Les courants dans les transformateurs

Les courants dans les transformateurs en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>
1	0.4312	0.0460	0.0698	0.1000	0.0670	0.0290	0.2165
5	0.0787	0.0084	0.0127	0.0182	0.0122	0.0053	0.0395
7	0.0513	0.0055	0.0083	0.0119	0.0080	0.0035	0.0258
11	0.0247	0.0026	0.0040	0.0057	0.0038	0.0017	0.0124
13	0.0173	0.0018	0.0028	0.0040	0.0027	0.0012	0.0087
17	0.0083	0.00088	0.0013	0.0019	0.0013	0.00055	0.0042
19	0.0060	0.00063	0.00097	0.0014	0.00093	0.00040	0.0030
23	0.0041	0.00043	0.00065	0.00094	0.00062	0.00027	0.0020
25	0.0037	0.00039	0.00060	0.00086	0.00057	0.00024	0.0019
29	0.0031	0.00032	0.00049	0.00071	0.00047	0.00020	0.0015
31	0.0027	0.00028	0.00043	0.00062	0.00041	0.00017	0.0013
35	0.0019	0.00020	0.00030	0.00044	0.00029	0.00012	0.00095
37	0.0016	0.00017	0.00026	0.00038	0.00025	0.00011	0.00082

**Tableau IV-7 : Les courants dans les transformateurs.**

**IV-5-2 Les courants dans les charges**

Les courants dans les charges en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	Charge1	Charge2	Charge3	Charge4	Charge5	Charge6	Charge7
1	0.0460	0.1744	0.0698	0.1000	0.0670	0.0290	0.2165
5	0.0084	0.0318	0.0127	0.0182	0.0122	0.0053	0.0395
7	0.0055	0.0208	0.0083	0.0119	0.0080	0.0035	0.0258
11	0.0026	0.0100	0.0040	0.0057	0.0038	0.0017	0.0124
13	0.0018	0.0070	0.0028	0.0040	0.0027	0.0012	0.0087
17	0.00088	0.0034	0.0013	0.0019	0.0013	0.00055	0.0042
19	0.00063	0.0024	0.00097	0.0014	0.00093	0.00040	0.0030
23	0.00043	0.0016	0.00065	0.00094	0.00062	0.00027	0.0020
25	0.00039	0.0015	0.00060	0.00086	0.00057	0.00024	0.0019
29	0.00032	0.0012	0.00049	0.00071	0.00047	0.00020	0.0015
31	0.00028	0.0011	0.00043	0.00062	0.00041	0.00017	0.0013
35	0.00020	0.00076	0.00030	0.00044	0.00029	0.00012	0.00095
37	0.00017	0.00066	0.00026	0.00038	0.00025	0.00011	0.00082

**Tableau IV-8 : Les courants dans les charges.**

**IV-5-3 Les courants dans les câbles et la ligne**

Les courants dans les câbles et la ligne en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	Câble (3-5)	Câble (5-6)	Câble (5-9)	Câble (5-11)	Ligne (1-2)
1	0.1135	0.1653	0.0670	0.2447	0.4312
5	0.0207	0.0302	0.0122	0.0446	0.0787
7	0.0135	0.0197	0.0080	0.0291	0.0513
11	0.0065	0.0095	0.0038	0.0140	0.0247
13	0.0046	0.0066	0.0027	0.0098	0.0173
17	0.0022	0.0032	0.0013	0.0047	0.0083
19	0.0016	0.0023	0.00093	0.0034	0.0060
23	0.0011	0.0016	0.00062	0.0023	0.0041
25	0.00097	0.0014	0.00057	0.0021	0.0037
29	0.00080	0.0012	0.00047	0.0017	0.0031
31	0.00070	0.0010	0.00041	0.0015	0.0027
35	0.00049	0.00072	0.00029	0.0011	0.0019
37	0.00043	0.00062	0.00025	0.00092	0.0016

**Tableau IV-9 : Les courants dans les câbles et la ligne.**

**IV-5-4 Les courants et les tensions dans le condensateur**

Les courants et les tensions dans le condensateur en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	$X_c$ [Pu]	$I_c$ [Pu]	$V_c$ [Pu]
1	1.6666	0.4385	0.5808
5	0.3333	0.0636	0.02119
7	0.2380	0.0415	0.0098
11	0.1515	0.0200	0.00303
13	0.1282	0.0140	0.00179
17	0.0980	0.0067	0.00065
19	0.0877	0.0048	0.00042
23	0.0724	0.0033	0.00023
25	0.0666	0.0030	0.000199
29	0.0574	0.0025	0.000143
31	0.0537	0.0022	0.000118
35	0.0476	0.0015	0.0000714
37	0.0450	0.0013	0.000058

**Tableau IV-10 : Les courants et les tensions dans le condensateur.**

## IV-6 Les pertes de puissance dans les différents éléments

### IV-6-1 Dans les transformateurs

Les pertes de puissance dans les transformateurs en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>em</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>
1	0.0099	8.0277*10 <sup>-4</sup>	0.0017	0.0034	0.0017	3.0104*10 <sup>-4</sup>	0.0068
5	5.0144*10 <sup>-4</sup>	4.0562*10 <sup>-5</sup>	8.5572*10 <sup>-5</sup>	1.7124*10 <sup>-4</sup>	8.5705*10 <sup>-5</sup>	1.5236*10 <sup>-5</sup>	3.4417*10 <sup>-4</sup>
7	2.3709*10 <sup>-4</sup>	1.9351*10 <sup>-5</sup>	4.0671*10 <sup>-5</sup>	8.1464*10 <sup>-5</sup>	4.1008*10 <sup>-5</sup>	7.3936*10 <sup>-6</sup>	1.6339*10 <sup>-4</sup>
11	6.7364*10 <sup>-5</sup>	5.3000*10 <sup>-6</sup>	1.1577*10 <sup>-5</sup>	2.2908*10 <sup>-5</sup>	1.1340*10 <sup>-5</sup>	2.1379*10 <sup>-6</sup>	4.6259*10 <sup>-5</sup>
13	3.7756*10 <sup>-5</sup>	2.9023*10 <sup>-6</sup>	6.4815*10 <sup>-6</sup>	1.2889*10 <sup>-5</sup>	6.5410*10 <sup>-6</sup>	1.2170*10 <sup>-6</sup>	2.6017*10 <sup>-5</sup>
17	1.2109*10 <sup>-5</sup>	9.8199*10 <sup>-7</sup>	1.9467*10 <sup>-6</sup>	4.0520*10 <sup>-6</sup>	2.1129*10 <sup>-6</sup>	3.5623*10 <sup>-7</sup>	8.4484*10 <sup>-6</sup>
19	8.3416*10 <sup>-6</sup>	6.7181*10 <sup>-7</sup>	1.4287*10 <sup>-6</sup>	2.9000*10 <sup>-6</sup>	1.4254*10 <sup>-6</sup>	2.4838*10 <sup>-7</sup>	5.6820*10 <sup>-6</sup>
23	1.0323*10 <sup>-5</sup>	8.1380*10 <sup>-7</sup>	1.7004*10 <sup>-6</sup>	3.4650*10 <sup>-6</sup>	1.6790*10 <sup>-6</sup>	2.9993*10 <sup>-7</sup>	6.6931*10 <sup>-6</sup>
25	1.5524*10 <sup>-5</sup>	1.2563*10 <sup>-6</sup>	2.6752*10 <sup>-6</sup>	5.3553*10 <sup>-6</sup>	2.6203*10 <sup>-6</sup>	4.3758*10 <sup>-7</sup>	1.1153*10 <sup>-5</sup>
29	3.6084*10 <sup>-5</sup>	2.8439*10 <sup>-6</sup>	5.9080*10 <sup>-6</sup>	1.2087*10 <sup>-6</sup>	5.8994*10 <sup>-6</sup>	1.0062*10 <sup>-6</sup>	2.3019*10 <sup>-5</sup>
31	4.7147*10 <sup>-5</sup>	3.7300*10 <sup>-6</sup>	7.8365*10 <sup>-6</sup>	1.5875*10 <sup>-5</sup>	7.9221*10 <sup>-6</sup>	1.3883*10 <sup>-6</sup>	2.9780*10 <sup>-5</sup>
35	6.1493*10 <sup>-5</sup>	4.9354*10 <sup>-6</sup>	1.0047*10 <sup>-5</sup>	2.1058*10 <sup>-5</sup>	1.0189*10 <sup>-5</sup>	1.8407*10 <sup>-6</sup>	4.1887*10 <sup>-5</sup>
37	6.7134*10 <sup>-5</sup>	5.6376*10 <sup>-6</sup>	1.1617*10 <sup>-5</sup>	2.4181*10 <sup>-5</sup>	1.1657*10 <sup>-5</sup>	2.1259*10 <sup>-6</sup>	4.8045*10 <sup>-5</sup>
P <sub>T</sub>	0.0110	8.9175*10 <sup>-4</sup>	0.0019	0.0038	0.0019	3.3473*10 <sup>-4</sup>	0.0076

**Tableau IV-11 : Les pertes de puissance dans les transformateurs.**

**IV-6-2 Dans les charges**

Les pertes de puissance dans les charges en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>em</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	Charge1	Charge2	Charge3	Charge4	Charge5	Charge6	Charge7
1	0.0793	0.3071	0.1232	0.1734	0.1182	0.0509	0.3743
5	0.0090	0.0344	0.0064	0.0192	0.0141	0.0058	0.0425
7	0.0051	0.0204	0.0034	0.0114	0.0084	0.0035	0.0251
11	0.0019	0.0074	0.0012	0.0041	0.0030	0.0013	0.0091
13	0.0010	0.0043	6.5785*10 <sup>-4</sup>	0.0024	0.0018	7.5643*10 <sup>-4</sup>	0.0053
17	3.2725*10 <sup>-4</sup>	0.0013	1.8206*10 <sup>-4</sup>	6.9648*10 <sup>-4</sup>	5.3245*10 <sup>-4</sup>	2.0748*10 <sup>-4</sup>	0.0016
19	1.8737*10 <sup>-4</sup>	7.2904*10 <sup>-4</sup>	1.1268*10 <sup>-4</sup>	4.2248*10 <sup>-4</sup>	3.0444*10 <sup>-4</sup>	1.2260*10 <sup>-4</sup>	9.1125*10 <sup>-4</sup>
23	1.0561*10 <sup>-4</sup>	3.9206*10 <sup>-4</sup>	6.0853*10 <sup>-5</sup>	2.3043*10 <sup>-4</sup>	1.6372*10 <sup>-4</sup>	6.7583*10 <sup>-5</sup>	4.9008*10 <sup>-4</sup>
25	9.4413*10 <sup>-5</sup>	3.7442*10 <sup>-4</sup>	5.6236*10 <sup>-5</sup>	2.0961*10 <sup>-4</sup>	1.5039*10 <sup>-4</sup>	5.8031*10 <sup>-5</sup>	4.8074*10 <sup>-4</sup>
29	7.6506*10 <sup>-5</sup>	2.7791*10 <sup>-4</sup>	4.3362*10 <sup>-5</sup>	1.6567*10 <sup>-4</sup>	1.1858*10 <sup>-4</sup>	4.6736*10 <sup>-5</sup>	3.4742*10 <sup>-4</sup>
31	6.2498*10 <sup>-5</sup>	2.4960*10 <sup>-4</sup>	3.5662*10 <sup>-5</sup>	1.3504*10 <sup>-4</sup>	9.6463*10 <sup>-5</sup>	3.6092*10 <sup>-5</sup>	2.7895*10 <sup>-4</sup>
35	3.5442*10 <sup>-5</sup>	1.3450*10 <sup>-4</sup>	1.9564*10 <sup>-5</sup>	7.6776*10 <sup>-5</sup>	5.4479*10 <sup>-5</sup>	2.0301*10 <sup>-5</sup>	1.6819*10 <sup>-4</sup>
37	2.7799*10 <sup>-5</sup>	1.0722*10 <sup>-4</sup>	1.5522*10 <sup>-5</sup>	6.0531*10 <sup>-5</sup>	4.2799*10 <sup>-5</sup>	1.8032*10 <sup>-5</sup>	1.3245*10 <sup>-4</sup>
P <sub>Tch</sub>	0.0972	0.3771	0.1353	0.2124	0.1468	0.0628	0.4607

**Tableau IV-12 : Les pertes de puissance dans les charges.**

**IV-6-3 Dans les câbles**

Les pertes de puissance dans les câbles et la ligne en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>em</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	Câble (3-5)	Câble (5-6)	Câble (5-9)	Câble (5-11)	Ligne (1-2)
1	$9.3912 \cdot 10^{-4}$	$7.9513 \cdot 10^{-5}$	$2.6934 \cdot 10^{-5}$	$2.5149 \cdot 10^{-4}$	0.0018
5	$1.5618 \cdot 10^{-4}$	$8.7009 \cdot 10^{-6}$	$2.9470 \cdot 10^{-6}$	$2.7450 \cdot 10^{-5}$	$2.7500 \cdot 10^{-4}$
7	$9.3002 \cdot 10^{-5}$	$5.1228 \cdot 10^{-6}$	$1.7664 \cdot 10^{-6}$	$1.6005 \cdot 10^{-5}$	$1.6343 \cdot 10^{-4}$
11	$3.3880 \cdot 10^{-5}$	$1.8682 \cdot 10^{-6}$	$6.2381 \cdot 10^{-7}$	$5.8800 \cdot 10^{-6}$	$5.9667 \cdot 10^{-5}$
13	$2.0028 \cdot 10^{-5}$	$1.0585 \cdot 10^{-6}$	$3.7179 \cdot 10^{-7}$	$3.3998 \cdot 10^{-6}$	$3.4478 \cdot 10^{-5}$
17	$5.9982 \cdot 10^{-6}$	$3.2870 \cdot 10^{-7}$	$1.1255 \cdot 10^{-7}$	$1.0272 \cdot 10^{-6}$	$1.0768 \cdot 10^{-5}$
19	$3.5459 \cdot 10^{-6}$	$1.8885 \cdot 10^{-7}$	$6.4487 \cdot 10^{-8}$	$5.9650 \cdot 10^{-7}$	$6.2532 \cdot 10^{-6}$
23	$2.0288 \cdot 10^{-6}$	$1.1136 \cdot 10^{-7}$	$3.5726 \cdot 10^{-8}$	$3.3168 \cdot 10^{-7}$	$3.4998 \cdot 10^{-6}$
25	$1.7364 \cdot 10^{-6}$	$9.2316 \cdot 10^{-8}$	$3.2547 \cdot 10^{-8}$	$3.0032 \cdot 10^{-7}$	$3.0885 \cdot 10^{-6}$
29	$1.3727 \cdot 10^{-6}$	$7.8624 \cdot 10^{-8}$	$2.5654 \cdot 10^{-8}$	$2.2802 \cdot 10^{-7}$	$2.5053 \cdot 10^{-6}$
31	$1.1191 \cdot 10^{-6}$	$5.8500 \cdot 10^{-8}$	$2.0977 \cdot 10^{-8}$	$1.9035 \cdot 10^{-7}$	$2.0273 \cdot 10^{-6}$
35	$6.3635 \cdot 10^{-7}$	$3.4214 \cdot 10^{-8}$	$1.1876 \cdot 10^{-8}$	$1.1543 \cdot 10^{-7}$	$1.1317 \cdot 10^{-6}$
37	$5.0175 \cdot 10^{-7}$	$2.6870 \cdot 10^{-8}$	$9.3677 \cdot 10^{-9}$	$8.6995 \cdot 10^{-8}$	$8.4710 \cdot 10^{-7}$
$P_{Tca}$	0.0013	$2.0198 \cdot 10^{-4}$	$3.2956 \cdot 10^{-5}$	$3.0710 \cdot 10^{-4}$	0.0023

**Tableau IV-13 : Les pertes de puissance dans les câbles et la ligne.**

**IV-6-4 Dans le condensateur**

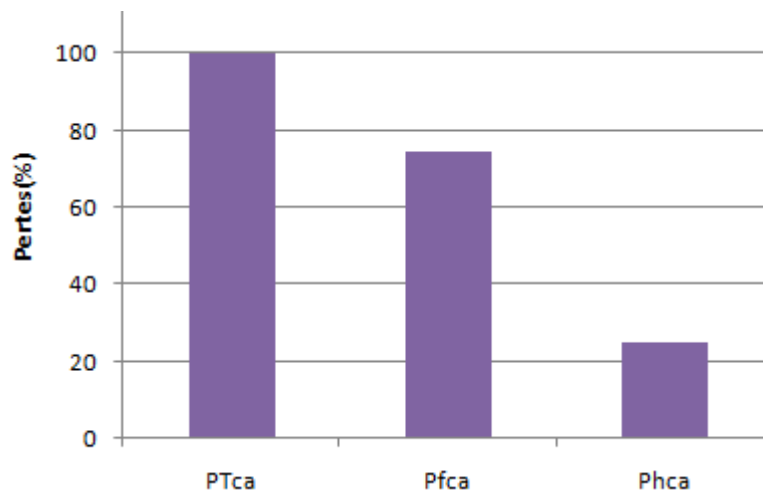
Les pertes de puissance dans le condensateur en, pu, de l'onde fondamentale jusqu'à le 37<sup>ème</sup> harmonique sont représentées dans le tableau suivant :

	$P_{hC}$
1	0.0238
5	$1.5840 \cdot 10^{-4}$
7	$4.7432 \cdot 10^{-5}$
11	$7.1253 \cdot 10^{-6}$
13	$2.9388 \cdot 10^{-6}$
17	$5.0676 \cdot 10^{-7}$
19	$2.3647 \cdot 10^{-7}$
23	$8.5843 \cdot 10^{-8}$
25	$6.9851 \cdot 10^{-8}$
29	$4.1840 \cdot 10^{-8}$
31	$3.0454 \cdot 10^{-8}$
35	$1.2589 \cdot 10^{-8}$
37	$8.7818 \cdot 10^{-9}$
$P_{Tc}$	0.0240

**Tableau IV-14 : Les pertes de puissance dans le condensateur.**

**IV-7 Représentation graphique des pertes de puissance****IV-7-1 Pertes de puissance dans les câbles**

	Ptca	Pfca	Phca
Pertes [Pu]	0,004142	0,003097	0,001045
Pertes(%)	100	74,77	25,22



**Fig. IV-4 Pertes de puissance dans les câbles.**

### IV-7-2 Pertes de puissance dans les transformateurs

	PTT	PfT	PhT
Pertes [Pu]	0,0274	0,0246	0,0028
Pertes(%)	100	89,78	10,21

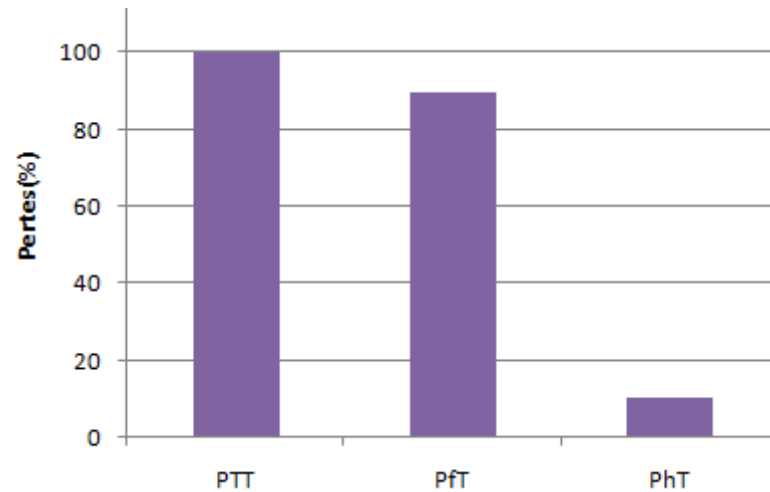


Fig. IV-5 Pertes de puissance dans les transformateurs.

### IV-7-3 Pertes de puissance dans les charges

	PTch	Pfch	Phch
Pertes [Pu]	1,4923	1,2264	0,2659
Pertes(%)	100	82,18	17,81

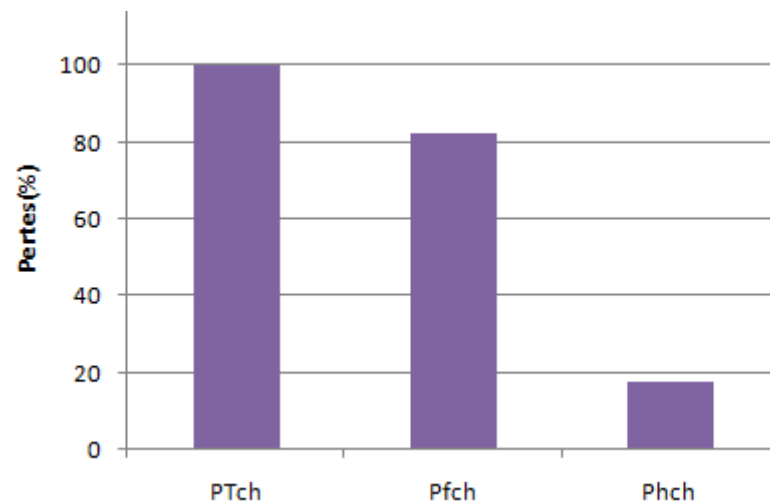


Fig. IV-6 Pertes de puissance dans les charges.

#### IV-7-4 Pertes de puissance dans le condensateur

	PTc	Pfc	Phc
Pertes [Pu]	0,024	0,0238	0,0002
Pertes(%)	100	99,16	0,83

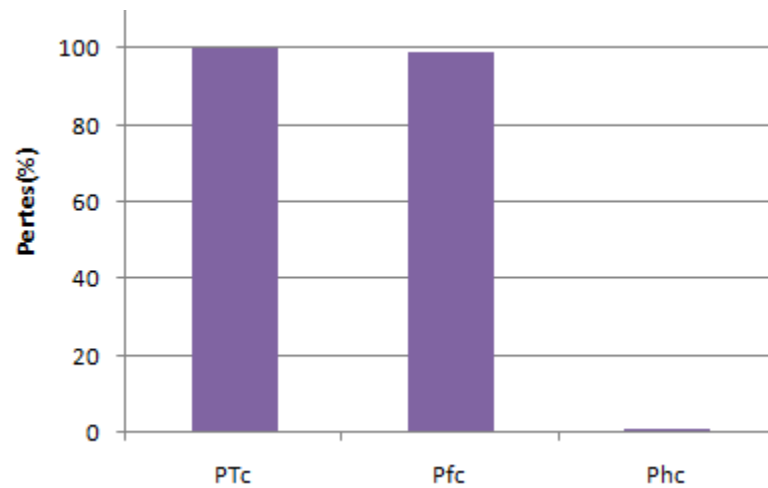


Fig. IV-7 Pertes de puissance dans le condensateur.

#### IV-7-5 Pertes de puissance dans tous les éléments du réseau

	PT	Pf	Ph
Pertes [Pu]	1,5478	1,2778	0,2699
Pertes(%)	100	82,55	17,43



Fig. IV-8 Pertes de puissance dans tous les éléments du réseau.

#### IV-7-6 Pourcentage des pertes dues aux harmoniques dans chaque élément du réseau

	PhT	Phca	PhT	Phch	Phc
Pertes(Pu)	0,2699	0,001045	0,0028	0,2659	0,0002
Pertes(%)	100	0,389	1,037	98,51	0,074

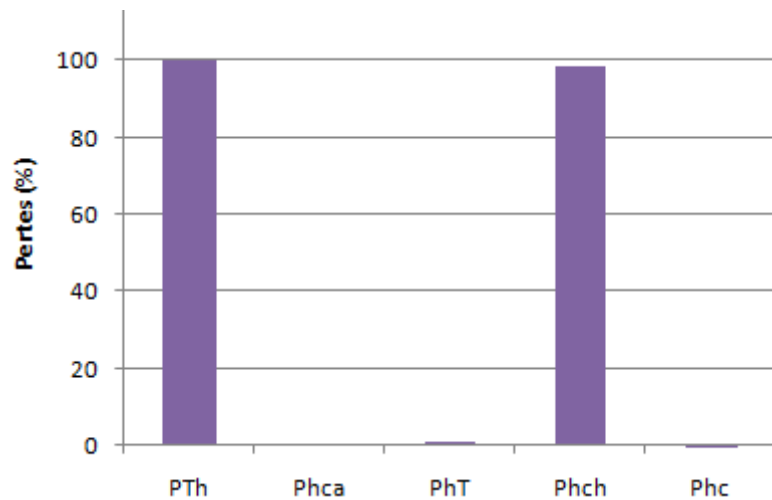


Fig. IV-9 Pourcentage des pertes dues aux harmoniques dans chaque élément du réseau.

#### IV-8 Discussion des résultats

Les pertes de puissance dues au fondamental dans les câbles, les transformateurs, les charges et le condensateur sont égales respectivement à  $P_{fca}=0.003097pu$ ,  $P_{fT}=0.0246pu$ ,  $P_{fch}=1.2264pu$ ,  $P_{fc}=0.0238pu$ , elles représentent respectivement 74.77%, 89.78%, 82.18%, 99.16% des pertes totales dans chaque élément du réseau. (Fig. IV-4 à IV-7)

Les pertes de puissance dues aux harmoniques dans les câbles, les transformateurs, les charges et le condensateur sont égales respectivement à  $P_{hca}=0.001045pu$ ,  $P_{hT}=0.0028pu$ ,  $P_{hch}=0.2659pu$ ,  $P_{hc}=0.0002pu$ , elles représentent respectivement 25.22%, 10.21%, 17.81%, 0.83% des pertes totales dans chaque élément. (Fig. IV-4 à Fig. IV-7)

Les pertes de puissance totales dues au fondamental dans tous les éléments sont égales à  $P_f=1.2778pu$ , elles représentent 82.55% des pertes totales dans le réseau. (Fig. IV-8)

Les pertes de puissance totales dues aux harmoniques dans tous les éléments sont égales à  $P_h=0.2699pu$ , elles représentent 17.43% des pertes totales dans le réseau. (Fig. IV-8)

Les pertes de puissance dues aux harmoniques dans les câbles, les transformateurs, les charges et le condensateur sont égales à  $P_{hca}=0.001045pu$ ,  $P_{hT}=0.0028pu$ ,  $P_{hch}=0.2659pu$ ,  $P_{hc}=0.0002pu$ , elles représentent respectivement 0.389%, 1.037%, 98.51%, 0.074% des pertes totales dues aux harmoniques. (Fig. IV-9)

### **IV-9 Interprétation des résultats**

La connexion de la charge non linéaire provoque une circulation des courants harmoniques dans tous les éléments du réseau (câbles, transformateurs, charges et le condensateur).

Les pertes de puissance dues aux harmoniques dans les charges sont considérables par rapport aux autres éléments car elles possèdent des impédances importantes.

Les pertes de puissance dues aux harmoniques sont considérables (17.43% des pertes totales dans le réseau) car les courants harmoniques circulent dans tous les éléments.

### **IV-10 Conclusion**

La circulation des courants sinusoïdaux purs dans les éléments du réseau provoque des pertes de puissance (dues au fondamental) et dans le cas des courants déformés, on aura des pertes supplémentaires (dues aux harmoniques).

Dans notre réseau d'application, les pertes harmoniques sont considérables (17.43% des pertes totales du réseau). Par conséquent on peut dire que le réseau considéré est très pollué.

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale :**

Dans ce travail, on a vu que les harmoniques générés par les charges non linéaires sont injectés dans le réseau électrique. Ils produisent une distorsion de tension qui affecte la qualité de service pour tous les clients branchés sur le même réseau.

Ce travail nous a permis de nous familiariser avec les grandeurs harmoniques en électrotechnique, de connaître les effets néfastes des courants et des tensions harmoniques, les précautions à prendre lors de la conception d'un réseau, et ce, pour prévenir les effets des harmoniques et les solutions à envisager pour les éliminer.

Les harmoniques causent des pertes de puissance dans les différents éléments constituant un réseau électrique, ces pertes provoquent :

- Une saturation du circuit magnétique, un échauffement dans les machines (les moteurs, les transformateurs) ce qui provoque une diminution du rendement.
- Un échauffement au niveau des composants des circuits électroniques constituant le redresseur.
- La détérioration du diélectrique des batteries de condensateurs.
- Echauffement au niveau des câbles.

Pour évaluer ces pertes, un programme de calcul à été réalisé sous MATLAB et a donné les résultats suivants :

17,43% de la totalité des pertes sont dues aux harmoniques.

82,55% de la totalité des pertes sont dues au fondamental.

D'après ces résultats obtenus, on voit que les pertes dues aux harmoniques sont considérables.

Pour cette raison, on doit penser à éliminer ces pertes ou au moins les minimiser par la réduction de quelques harmoniques par les solutions de filtrage (passif ou actif) qui permet, à la fois, de réduire les harmoniques et d'améliorer le facteur de puissance.

# ***Bibliographie***

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Eric Félice << Perturbations harmoniques, effets, origine, mesures, diagnostic, remèdes>> DUNOD, Paris, 2000.
- [2] : Thierry Deflandre, Philippe Mauras << Les harmoniques sur les réseaux électriques>> Direction des études et recherches électrique de France 5<sup>e</sup>, éditions Eyrolles, 1998.
- [3] : N. Haned, M.Hadji << Evaluation des pertes de puissance dues aux harmoniques dans un réseau électrique>>, Mémoire d'ingénieur U.M.M. Tizi-Ouzou, 2006.
- [4]: Messouter. S, Leharani.Dj <<Analyse du courant du neutre dans un système triphasé en présence de charge non linéaire>> Mémoire d'ingénieur U.M.M. Tizi-Ouzou, 2009.
- [5] : K. Gherram, A.Rezzik <<Compensation des harmoniques de courant absorbé par un redresseur triphasé en pont des diodes>>Mémoire d'ingénieur U.M.M.T, 2004.
- [6] : S.Chalal, N.Yassa <<Analyse de la propagation harmonique dans un réseau électrique>> Mémoire d'ingénieur U.M.M.T, 2005.
- [7] : <<La pollution harmonique possédant des sources de courants et tensions harmoniques >> (1991 journaux des électriciens N°690, pp29-32).
- [8] : Protection et surveillance des réseaux de transport d'énergie (Volume 1- 9<sup>eme</sup> partie) guide de SONALGAZ.
- [9]: TEODORE WILLDI<<Electrotechnique >> 3<sup>eme</sup> edition1999.
- [10] : Cahier Technique 13, Sehneider Electrique.
- [11] : Aziri.M,Tagzirt.S<< Etude des pertes fer et analyse harmonique du champ et de l'induction magnétique dans les tôles Fe; Si>>, Mémoire d'ingénieur U.M.M. Tizi-Ouzou, 2006.
- [12] :H.Ghemras,H.Dahmani, K.Boukherchoufa << Etude et calcul des pertes de puissance dues aux harmoniques dans un réseau électrique industriel >> Mémoire d'ingénieur U.M.M. Tizi-Ouzou, 2008.
- [13]: Kacimi.H, Kebdi.S << Etude des pertes magnétiques à l'aide d'un cadre d'Epstein >> Mémoire d'ingénieur U.M.M. Tizi-Ouzou, 2002.
- [14]: M.G.Say << Alliages magnétiques et ferrites>> DUNOD.
- [15]: Qualité et continuité de l'alimentation électrique BT alternative et continue. Edition 1998(6<sup>eme</sup> volume) guide de SONALGAZ.