

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

Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Polycopié de cours UED L2 intitulé

◆
Qualité de l'énergie électrique
◆

Dr. KECHIDA RIDHA

Année universitaire 2019/2020

Ce cours est destiné aux étudiants en première année master machines électriques

Introduction générale

La problématique de la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux, ou intervenants divers qu'elles soient des variations de longue durée, ou de courte durée et d'autres perturbations. Leurs conséquences ont pu s'étendre des défauts techniques aux appareils électriques sensibles, ainsi, en termes économiques, ils présentent des pertes financières dues à l'arrêt de production au niveau de l'industrie.

Le problème de la qualité de l'énergie électrique est classé en deux groupes de perturbations: perturbations au niveau de la fondamentale et perturbations harmoniques. Les perturbations au niveau de fondamental affectent l'amplitude des grandeurs d'intérêt (tension ou courant). Les perturbations dites « harmoniques » sont caractérisées par l'apparition de nouvelles composantes à des fréquences multiples de la fréquence fondamentale. En s'ajoutant à la composante formes d'onde des grandeurs d'intérêt.

1 Introduction

L'énergie électrique principalement distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux équipements et matériels de l'électrotechnique. C'est particulièrement l'aspect sinusoïdal de la tension d'origine qu'il est nécessaire de conserver, afin de lui préserver ses qualités essentielles pour la transmission de la puissance utile aux équipements terminaux. Lorsque la forme de l'onde de tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre alors des perturbations qui génèrent des dysfonctionnements et des échauffements des récepteurs et appareillages raccordés sur un même réseau d'alimentation électrique.

La qualité de l'électricité recouvre trois notions différentes: **la continuité d'alimentation** (coupures d'électricité), **la qualité de l'onde de tension** (phénomènes qui perturbent le fonctionnement des appareils électriques), et **la qualité de service** (relations avec les gestionnaires de réseaux).

2 La qualité de l'électricité

La qualité de l'électricité recouvre les trois notions de continuité d'alimentation, de qualité de l'onde de tension, et de qualité de service :

- **La continuité d'alimentation** recouvre les coupures, ou interruptions, subies par les utilisateurs. Il existe un certain nombre de critères pour classer ces coupures, et il est notamment fait distinction entre coupures programmées et coupures non programmées, et entre coupures longues (supérieures à 3 minutes) et coupures brèves (entre 1 seconde et 3 minutes). Pour les coupures inférieures à une seconde, bien que les notions de coupure très brève ou de microcoupure soient parfois utilisées, on parle généralement de creux de tension (et cela relève alors plus de la qualité de l'onde de tension que de la continuité d'alimentation).
- **La qualité de l'onde de tension** recouvre les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Différents termes peuvent être utilisés en fonction des caractéristiques de la perturbation : creux de tension, surtensions impulsionnelles, tensions hautes ou basses, variations de fréquence, papillotement, taux d'harmoniques et d'inter-harmoniques, déséquilibre entre phases, etc.
- **La qualité de service** caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau, ainsi qu'éventuellement son fournisseur (délai de (re)mise en service, délai d'intervention d'urgence, délai de raccordement, notification de coupure programmée, tenue des horaires de rendez-vous, etc.).

1.1 Croissance des équipements informatiques et de l'électronique de puissance

L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation.

En effet, des récepteurs, tels que les moteurs asynchrones et les transformateurs participent à la distorsion de l'onde sinusoïdale de la tension. Mais ce ne sont pas les uniques et principaux responsables. L'électronique de puissance présente aujourd'hui au sein de nombreux matériels d'électrotechnique, ainsi que l'électronique des équipements informatiques, contribuent essentiellement à la prolifération de ces perturbations électriques.

Ces charges dites déformantes, ou encore appelées récepteurs non linéaires, appellent sur le réseau électrique des courants déformés qui en fonction de l'impédance du réseau, ou lorsqu'ils sont importants en amplitude, vont modifier l'allure de la tension sinusoïdale. Le signal déformé ainsi obtenu est composé d'harmoniques qui se traduisent par des pertes électriques ou encore des dysfonctionnements sur le réseau électrique d'alimentation.

1.2 La notion de charges déformantes

Les charges déformantes, encore appelées charges non linéaires, sont présentes aujourd'hui au travers de nombreux dispositifs de l'électrotechnique: variateurs de vitesse (figure 1.1), redresseurs dans le domaine industriel, alimentations à découpage dans les ordinateurs et les onduleurs de tension (figure 1.1) pour le domaine tertiaire. L'ensemble de ces récepteurs déforment les signaux électriques du réseau, courant et tension, en produisant des courants et tensions harmoniques.

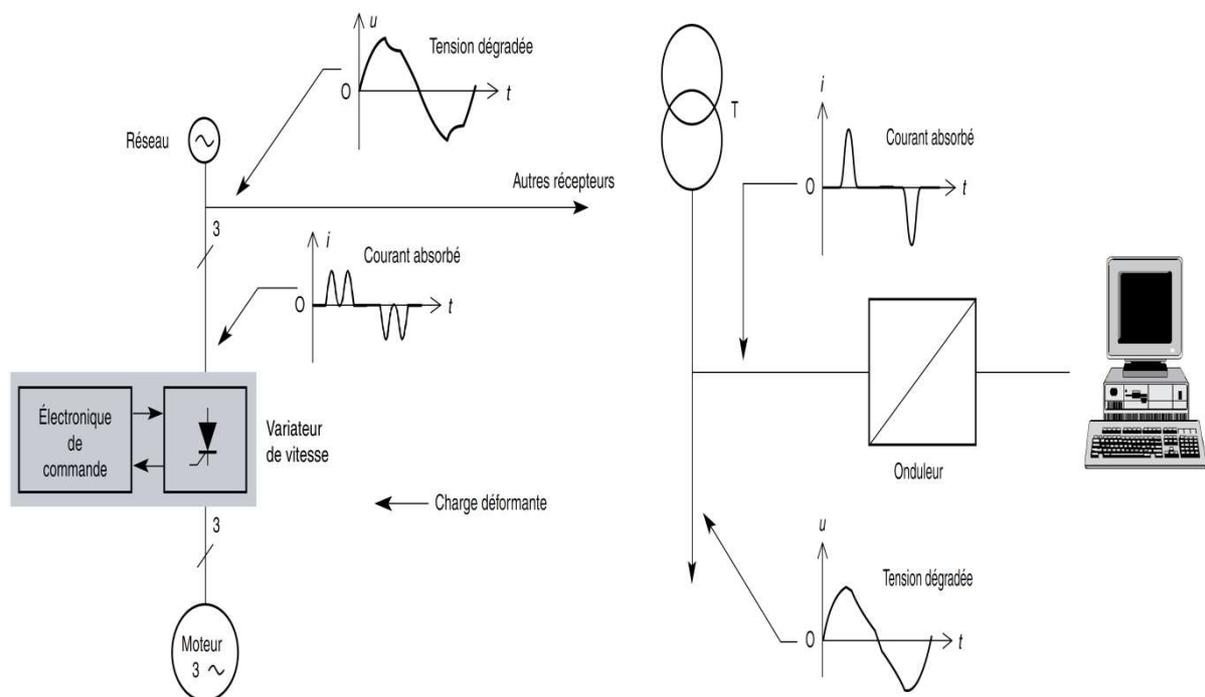


Figure 1.1: Moteur asynchrone équipé de son variateur de vitesse et onduleur de tension pour micro-ordinateur.

1.3 Démystification des harmoniques

Les signaux déformés engendrent une variation du signal d'origine qui se trouve alors composé :

- d'un fondamental,
- d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences et d'amplitudes différentes appelées harmoniques.

La somme de ces signaux sinusoïdaux de fréquences et d'amplitudes différentes constitue ainsi le signal déformé. Les signaux harmoniques sont des multiples de la fréquence fondamentale de 50 Hz de la tension secteur (figures 1.2 A et B).

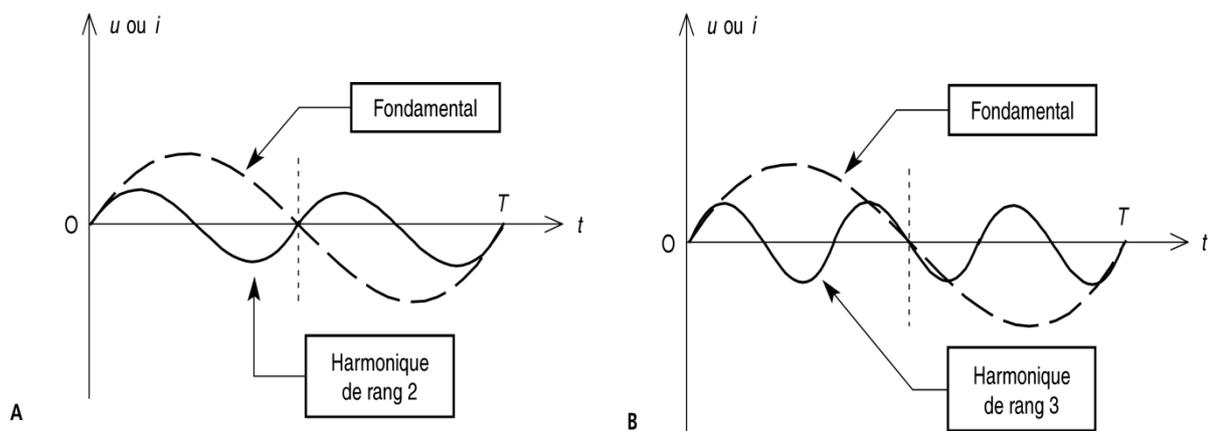


Figure 1.2: A. Signal fondamental et son harmonique de rang 2. L'harmonique de rang 2 a une fréquence de $50\text{Hz} \times 2 = 100\text{Hz}$.

B. Signal fondamental et son harmonique de rang 3. L'harmonique de rang 3 a une fréquence de $50\text{Hz} \times 3 = 150\text{Hz}$.

On définit le rang harmonique comme le rapport entre la fréquence de l'harmonique considéré et la fréquence fondamentale :

$$\text{rang} = \frac{f_{\text{Harmo}}}{f_{\text{Fond}}}$$

Dans la somme harmonique évoquée précédemment, et qui correspond au courant déformé appelé par le récepteur (figure 1.3), on trouve: - une sinusoïde fondamentale à 50 Hz, - des composantes sinusoïdales possédant une fréquence multiple de la composante fondamentale, appelées harmoniques.

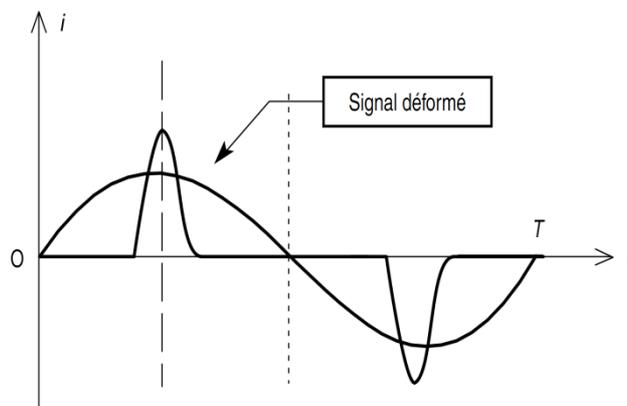


Figure 1.3: L'allure du courant consommé par un ordinateur.

On peut donc considérer, de manière simple, que la somme des harmoniques plus le fondamental constituent ainsi le signal déformé (figure 1.4).

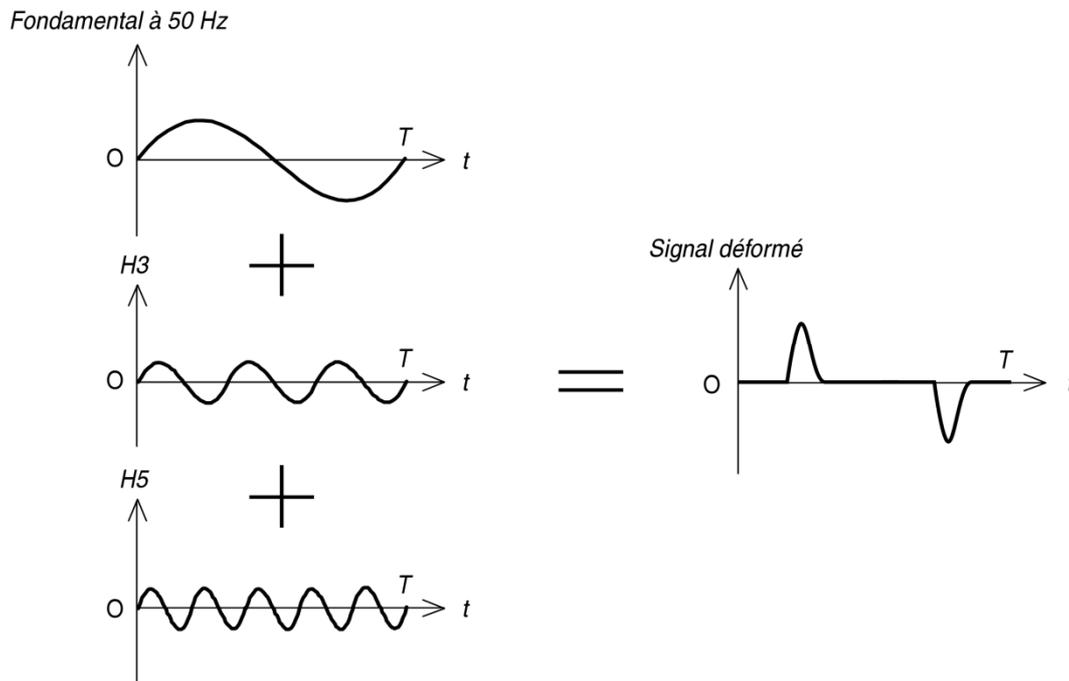


Figure 1.4: Un signal déformé: somme de sinusoïdes de fréquences et d'amplitudes multiples.

1.4 Conséquence de la pollution harmonique

Les courants harmoniques, lorsqu'ils traversent l'impédance interne des générateurs, donnent naissance (loi d'Ohm) à des tensions harmoniques qui viennent s'ajouter, ou se déduire, des tensions fondamentales générées par le réseau d'alimentation du distributeur d'énergie électrique. De ce fait, la tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale et elle a donc un impact sur tous les autres récepteurs du réseau, avec pour conséquences les manifestations suivantes :

- augmentation des pertes par effet Joule et effet de peau ainsi que les pertes supplémentaires pour les fréquences élevées,
- augmentation de la facturation de l'énergie électrique,
- dégradation du facteur de puissance de l'installation,
- vieillissement prématuré des équipements électriques (exemple : câble de neutre),
- dysfonctionnements fréquents,
- destruction de certains matériels (condensateurs par exemple).

2.1 Notion de charges linéaires et non linéaires

Les **charges linéaires** appellent un courant de forme identique à la tension, c'est-à-dire quasi sinusoïdal, (figure 2.1).

Les **charges non linéaires** produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale. Ces courants sont alors composés d'harmoniques, multiples de la fréquence du fondamental de 50 Hz (figure 2.1).

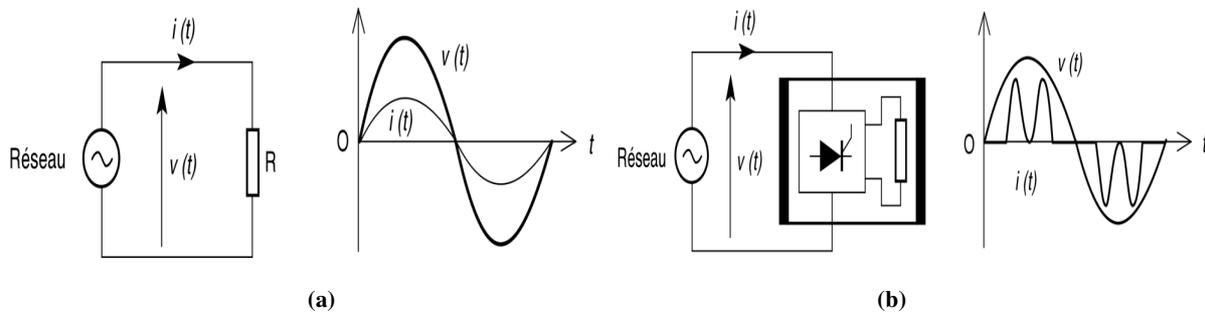


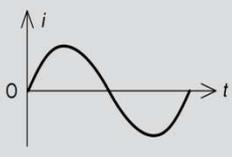
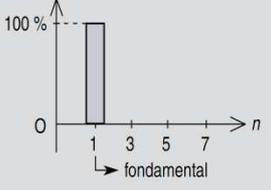
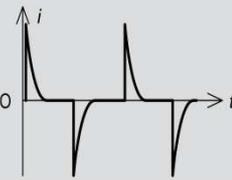
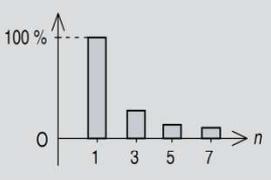
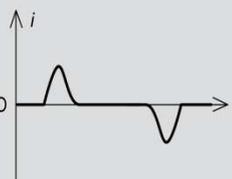
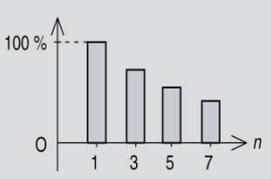
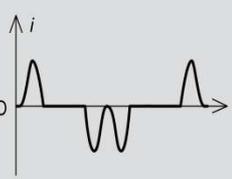
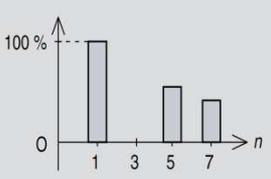
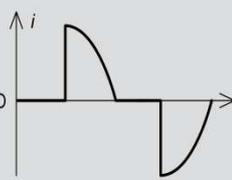
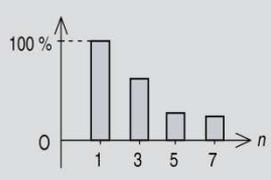
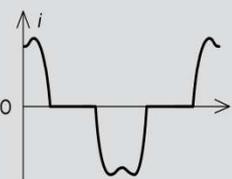
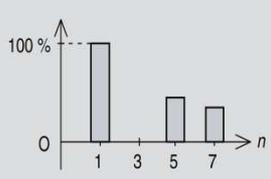
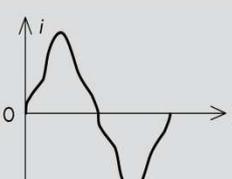
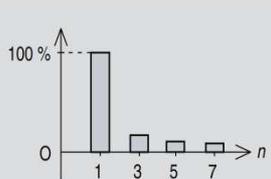
Figure 2.1: Signaux relatifs à une charge linéaire (a) et une charge non linéaire (b).

2.2 Nature et liste des principaux équipements pollueurs

La génération de courants harmoniques, sur les réseaux d'alimentation électrique, est due à de nombreux types d'équipements, dont on peut dresser une liste non exhaustive et que l'on retrouve dans les matériels suivants (tableau 2.1) :

Types d'équipements générant des courants harmoniques	Dans quelles familles de matériels les trouve-t-on ?
Moteurs asynchrones monophasés et triphasés	Matériel électroménager Climatisation Outillage et machines-outils Équipements industriels
Redresseurs monophasés	Micro-ordinateurs Imprimantes et périphériques d'ordinateurs Variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs Ballasts électroniques Téléviseurs
Gradateur à angle de phase	Modulation d'éclairage des lampes Commande de four électrique Régulation de puissance Démarreurs progressifs de moteurs
Redresseurs triphasés à base de semi-conducteurs	Variation de vitesse de moteurs (pompes, convoyeurs, etc.) Fours à induction Électrolyseurs
Appareils d'éclairage	Lampes à fluorescence Lampes à vapeur haute pression Lampes fluo compactes
Appareils à arc électrique	Fours Poste de soudure

Les allures de courant appelées par les charges déformantes sont éloignées de l'allure sinusoïdale et peuvent prendre des formes très diverses. Un résumé des principaux types de charges associées à l'allure des courants (tableau 2.2).

Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spéctre harmonique correspondant
Récepteur résistif.	Fours industriels à résistances réglées par commande à trains d'ondes. Lampe à incandescence, convecteurs, chauffe-eau.		
Éclairage.	Tubes fluorescents. Lampes à vapeur HP.		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage, alimentation à découpage.	Micro-informatique. Télévisions. Lampes à ballast électronique.		
Redresseur triphasé à diodes avec filtrage.	Variation de vitesse des moteurs asynchrones.		
Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spéctre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commande par angle de phase).	Régulation de puissance de fours à résistances. Modulation de puissance des lampes halogènes.		
Redresseur triphasé à thyristors.	Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones. Electrolyseurs.		
Moteur asynchrone	Machines outils. Appareils électroménagers. Ascenseurs.		

2.3 La mesure du courant efficace

Les appareils numériques dits RMS (*Root Mean Square*) réalisent la mesure efficace d'un signal quelle que soit sa forme, sinusoïdal ou bien déformé. De manière générale, la valeur du courant efficace est donnée par la relation suivante:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_{\text{fondamental}}^2 + I_{h_3}^2 + I_{h_5}^2 + I_{h_7}^2 + \dots}$$

où I_h représente le courant harmonique.

Les harmoniques de rang élevé ne présentent qu'une valeur efficace souvent négligeable, devant le courant total, et une approximation réalisée à partir des premiers rangs d'harmoniques suffit largement pour quantifier un signal et ceci dans la majorité des cas.

Exemple: Un signal déformé se décompose en une somme de signaux harmoniques associés au fondamental à 50 Hz. Aussi, la valeur efficace réelle du courant est représentative de l'effet Joule engendré par l'ensemble de ces signaux et prend en compte l'ensemble : fondamental + harmoniques (tableau 2.3).

Rang harmonique	Valeur efficace	Taux de distorsion de l'harmonique ¹
1 (fondamental)	12	100 %
3	9	75 %
5	5	42 %
7	2,5	21 %
autres	0,75	6,25 %

Le calcul de la valeur efficace du courant déformé s'obtient donc en effectuant la somme quadratique des courants. $I = \sqrt{12^2 + 9^2 + 5^2 + 2.5^2 + 0.75^2} = 16 \text{ A}$

2.5 Le taux de distorsion harmonique, individuel et global:

Le taux de distorsion d'un harmonique individuel est le rapport entre la réelle valeur efficace de l'harmonique d'un signal (courant ou tension) par rapport à la valeur efficace du même signal à la fréquence fondamentale:

$$\tau_n = \frac{A_n}{A_1}$$

Où: A_n représente la valeur efficace de l'harmonique et A_1 la valeur efficace du fondamental.

Ce taux de distorsion harmonique global **THD** est égal au rapport de la valeur efficace de l'ensemble des courants harmoniques par rapport à la valeur du courant efficace du fondamental. On parle alors du THD_F :

$$THD_F = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}$$

avec A_1 : valeur efficace du fondamental.

3.1 Les perturbations observées sur les équipements et installations électriques

La pollution harmonique alors présente sur le réseau de distribution est préjudiciable pour le bon fonctionnement de tous les récepteurs raccordés sur ce même réseau. La norme fixe les valeurs de tensions harmoniques à ne pas dépasser pour assurer le fonctionnement correct des récepteurs.

Dans le cadre de la fourniture d'électricité, les taux de tensions harmoniques ne doivent pas dépasser les valeurs précisées dans le tableau suivant. Ces valeurs représentent des taux individuels calculés par rapport au fondamental à 50 Hz, sachant que le taux global d'harmonique en tension ne doit pas dépasser **8 %** dans une installation de distribution basse tension. Les valeurs de taux d'harmonique individuel sont données dans le tableau 3.1 suivant.

Tableau 3.1 – Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles.

Rang de l'harmonique	Taux en %
3	5
5	6
7	5
9	1,5
11	3,5
13	3
15	0,3
17	2
19*	1,5
21**	0,2

Un récapitulatif des effets produits sur certains équipements est proposé dans le tableau 3.2 suivant:

Équipements perturbés	Type de perturbation
Machines tournantes	Échauffements supplémentaires. Couples pulsatoires entraînant une perte de stabilité mécanique des moteurs. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires. Risques de saturation si harmoniques paires.
Câbles	Pertes ohmiques (notamment câble du neutre dans les réseaux triphasés). Vieillessement prématuré de l'isolant (dû à l'effet Joule). Pertes diélectriques supplémentaires. Corrosion des câbles aluminium si composantes paire et continue. Effet de peau.
Micro-ordinateurs	Dysfonctionnement (couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques).
Électronique industrielle	Défauts de fonctionnement liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Dispositifs de communication	Interférences.
Dispositifs de télécommande Relais de protection Fusibles Disjoncteurs thermiques Disjoncteurs à maxima	Fonctionnement et déclenchement intempestifs.
Condensateurs de puissance	Échauffement, vieillissement
Compteurs d'énergie	Erreurs de mesure

3.2 Les origines des harmoniques de tension

À l'origine, ce sont les récepteurs non linéaires qui appellent des courants déformés, sources de courants harmoniques. Les courants harmoniques circulant dans les conducteurs et les appareillages électriques rencontrent donc des impédances propres à ces composants et, suivant la loi d'Ohm, engendrent des tensions harmoniques.

La valeur de chaque tension harmonique, pour les différents rangs harmoniques existants, dépendra :

- de l'amplitude du courant harmonique à l'origine,
- de l'impédance rencontrée pour le rang considéré.

Une tension harmonique U_h est donc régie par la loi d'Ohm telle que le décrivent la relation et la figure suivante (figure 3.1). Avec :

- z : impédance de la source,
- Z : impédance de la charge.

$$U_h = Z \times i_h$$

- U_h : tension harmonique,
- i_h : courant harmonique,

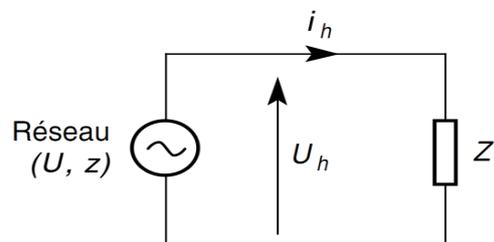


Figure 3.1: La création des tensions harmoniques.

3.3 Principaux phénomènes rencontrés

3.3.1 Les phénomènes de résonance

Les phénomènes de résonance proviennent de la présence d'éléments capacitifs et inductifs sur le réseau d'alimentation électrique (impédance de ligne et de la source), **générant ainsi des amplitudes élevées sur certains rangs harmoniques** (rangs 5 et 7 par exemple).

Lorsque les courants harmoniques ont une fréquence correspondant à la fréquence de résonance des circuits LC existants, il peut en résulter une **augmentation de la tension harmonique** et ceci en raison de l'impédance élevée pour ce rang harmonique. La tension harmonique voit alors sa valeur augmenter suivant la loi d'Ohm, affectant ainsi la tension du réseau d'alimentation électrique.

3.3.2 Les échauffements dans les conducteurs et équipements électriques

Les conducteurs électriques véhiculent les courants harmoniques qui produisent par effet Joule un échauffement des conducteurs au même titre que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuant pas au transfert de la puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation.

Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que **leur impédance décroît proportionnellement au rang élevé** des harmoniques en présence dans le signal déformé (figure 3.2).

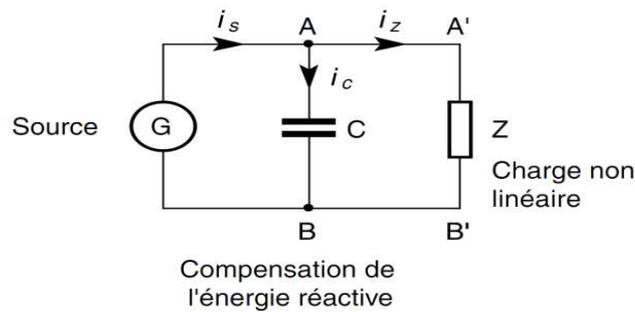


Figure 3.2 : Les condensateurs sont bien souvent victimes des courants harmoniques.

La charge Z crée des courants harmoniques qui circuleront d'autant plus facilement par le condensateur C que leur rang sera élevé (l'impédance du condensateur diminuant avec la fréquence). Le condensateur subit un échauffement excessif qui risque de conduire à sa destruction ou la fusion du fusible de protection généralement placé en série.

3.3.4 Les effets dans le conducteur neutre

En régime sinusoïdal, dans le cas d'un système triphasé équilibré, tant du point de vue de la source que des récepteurs eux-mêmes, la somme vectorielle des courants s'annule au point neutre et conduit ainsi à ne pas retrouver de circulation de courant dans le conducteur neutre.

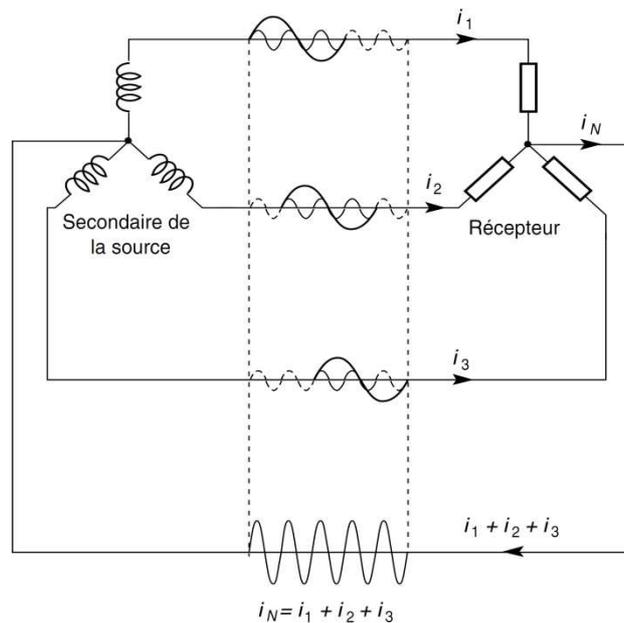


Figure 3.3 : Effets des harmoniques dans le conducteur neutre.

Le signal déformé issu d'une charge non linéaire comprend plusieurs composantes harmoniques de fréquences multiples. Si l'on s'intéresse à la somme des harmoniques de rang **multiple de trois** pour les trois phases: rang 3, rang 9, etc. on s'aperçoit que cette somme ne donne pas lieu à une annulation d'un courant dans le conducteur neutre.

Les courants harmoniques de rang 3 à partir des trois phases vont s'additionner et donner naissance dans le conducteur neutre à la circulation d'un courant. La valeur efficace de l'intensité de ce courant de neutre est tout simplement égale à la somme arithmétique des trois courants harmoniques de rang 3 pour chacune des phases (figure 3.3). Ceci est valable toujours dans le cas d'un système équilibré.

4.1 Qualité de l'énergie électrique:

Pour l'heure, il est indispensable de préciser quels sont les critères définissant la qualité de l'énergie des réseaux électriques, ces réseaux pouvant être le siège de perturbations de natures diverses (creux de tension, flicker, harmoniques...).

Le concept de compatibilité électromagnétique (CEM) classe ces perturbations selon deux groupes: **basses fréquences** (< 9 kHz) et **hautes fréquences** (> 9 kHz). De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à **la basse fréquence** dont la transmission est conduite.

Les phénomènes observés, et pouvant affecter le bon fonctionnement des réseaux électriques, sont nombreux: creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter-harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs.

Ils peuvent être regroupés en **quatre catégories** selon qu'ils affectent :

- l'amplitude,
- la forme d'onde,
- la fréquence,
- la symétrie du système triphasé.

4.1.1 Les perturbations du réseau de distribution basse tension

Les problèmes liés à la qualité de l'énergie électrique impliquent l'ensemble des partenaires du distributeur d'énergie à l'utilisateur. Ils concernent les imperfections de la tension électrique ayant pour origine les perturbations électriques.

Ces perturbations électriques font l'objet d'une norme européenne EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique) et traitant des caractéristiques du produit électricité en basse et moyenne tension.

La plage de variation nominale de la tension réseau est généralement fixée par le distributeur d'énergie à **+/- 10 %** de la tension composée. Toute variation de la tension au-delà du seuil haut ou bas de la plage nominale de la tension, génère une perturbation de la qualité de l'électricité distribuée.

▪ Origines des perturbations de la qualité de l'énergie électrique

Les perturbations de la qualité de l'énergie électrique distribuée sont principalement provoquées par les phénomènes suivants:

1. Creux de tension et coupures,
2. Surtensions,
3. Variations rapides de la tension – Flicker,
4. Déséquilibre du système triphasé de tensions,
5. Harmoniques et inter-harmoniques.

1. Creux de tension et coupures

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension en dessous du seuil inférieur de la plage nominale comme l'illustre la figure 4.1. Ils sont provoqués par l'apparition de défauts sur le réseau électrique. La coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Une coupure est dite brève si elle n'excède pas trois minutes, sa profondeur est supérieure à 90 %. Au-delà de trois minutes, la coupure est dite longue.

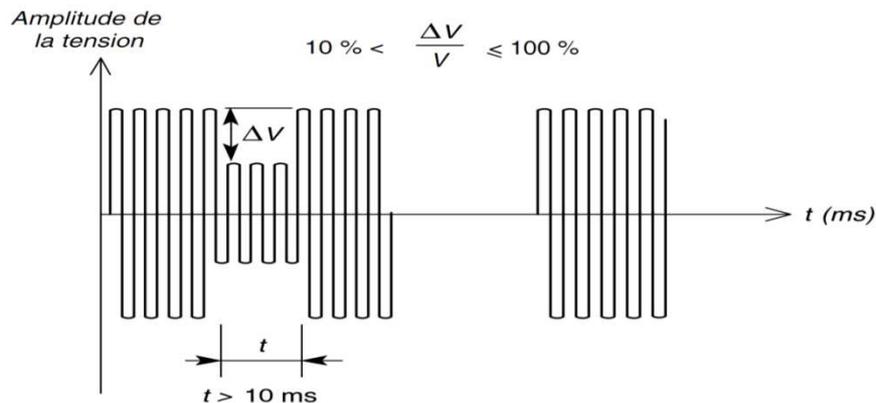


Figure 4.1 – Creux de tensions.

Lorsque la variation de tension apparaît en tant que défaut sur le réseau électrique, il est difficile de mesurer exactement la durée et l'amplitude de celle-ci. Particulièrement quand celle-ci intervient sur les trois phases avec des durées et des amplitudes différentes.

2. Surtensions temporaires ou transitoires

Les surtensions de durée inférieure à 10 ms sont appelées surtensions transitoires. Les analyseurs de réseaux triphasés, de part leur technologie numérique permettront ici aussi de mesurer les surtensions transitoires en offrant une fréquence d'échantillonnage élevée. Les surtensions sont mesurées en amplitude et en durée lorsque le seuil supérieur de la plage nominale est dépassé comme illustré par la figure 4.2.

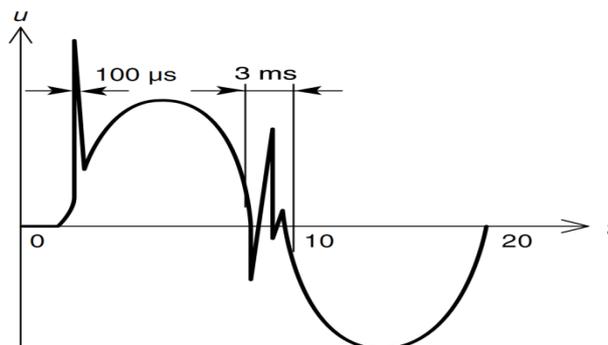


Figure 4.2: Surtensions.

Les surtensions sont de trois natures :

- **Surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz):** les surtensions à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur.

- **Surtensions de manœuvre:** les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau : mise en service de gradins de condensateur, d'une ligne à vide.
- **Surtensions atmosphériques:** les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

3. Variations rapides de la tension – Flicker

Les variations d'intensité lumineuse de l'éclairage à incandescence provoquent un papillonnement qui est ressenti comme une gêne par le système visuel humain dès que la tension varie de 1 %.

De telles variations de la tension sont en général causées par la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide: fours à arcs, machine à souder, moteurs à démarrages fréquents, imprimantes laser, micro-ondes, système d'air conditionné, etc. La figure 4.3 illustre une représentation de variation rapide de tension.

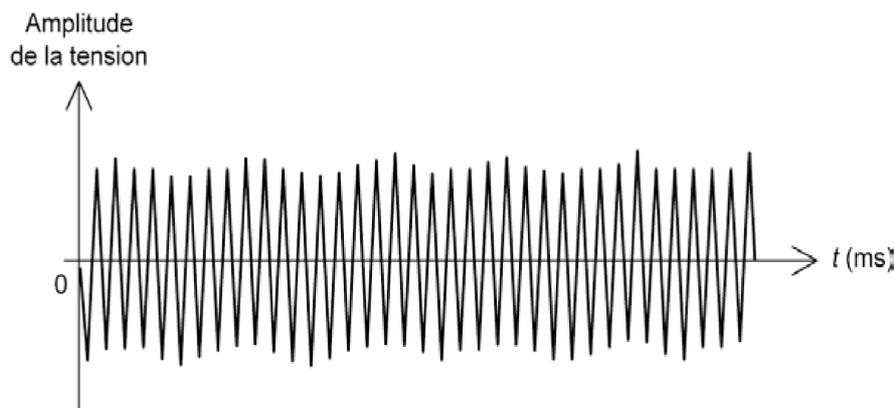


Figure 4.3: Variation rapide de tension.

4. Déséquilibre de système triphasé de tensions

Le déséquilibre de récepteurs électriques (triphases ou monophasés) alimentés par un réseau triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou lorsqu'elles sont déphasées de 120° les unes par rapport aux autres, comme illustré par la figure 4.4.

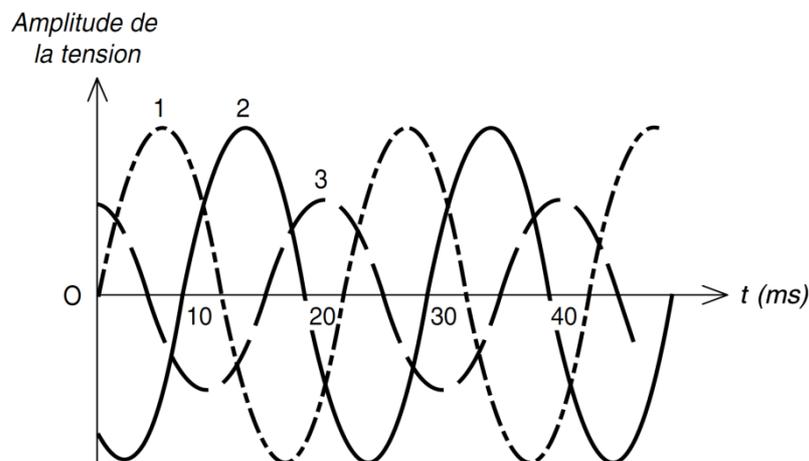


Figure 4.4: Déséquilibre de systèmes triphasés.

Ces déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courant non équilibré par les impédances de réseau et des échauffements qui conduisent à une dégradation prématurée des équipements.

5. Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations introduites dans le réseau par des charges non linéaires provenant d'équipements intégrant des redresseurs et des électroniques de découpage. Ces configurations de réseau et la concentration de tels équipements pollueurs déforment les courants et créent des variations de tension sur le réseau de distribution, comme illustré en figure 4.5.

Les harmoniques consistent donc en une superposition sur l'onde fondamentale de 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de la fréquence fondamentale. Lorsque la fréquence superposée **n'est pas multiple de la fréquence** fondamentale, on parle **d'inter-harmonique**.

Les conséquences des harmoniques peuvent être instantanées ou à long terme. **Les effets instantanés** se manifestent par des troubles fonctionnels de synchronisation ou de commutation, des disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie, voir même la destruction d'équipements (condensateurs, disjoncteur). **Les effets à long terme** se manifestent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

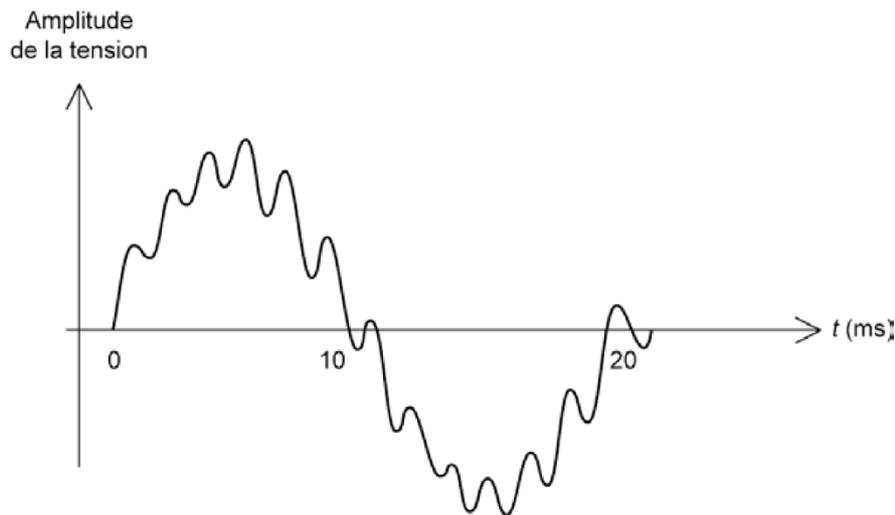


Figure 4.5 : Effets d'une pollution harmonique.

5. Introduction

Ce chapitre traite des solutions à mettre en œuvre pour pallier aux problèmes de pollution harmonique. Il est important de préciser que la majorité des cas de pollution harmonique, à l'échelle industrielle, sont liés à la résonance due à la présence de condensateurs sur le réseau électrique.

Les condensateurs sont souvent présents pour effectuer le relèvement du facteur de puissance d'une installation (compensation de l'énergie réactive). Pour certaines valeurs de fréquences harmoniques, ces charges capacitatives peuvent entrer en résonance avec des charges inductives, et engendrer des surtensions et des surintensités destructives pour le matériel. Elles contribuent, dans ce cas, à la dégradation de la qualité de la tension du réseau électrique.

5.1 Phénomènes de résonance

5.1.1 Notion d'impédance

Un réseau de distribution industrielle présente en général, pour le domaine harmonique, un comportement inductif :

$$Z = \sqrt{r + X}$$

L'impédance Z d'un circuit est proportionnelle à la fréquence et se présente différemment suivant le rang harmonique (figure 5.1).

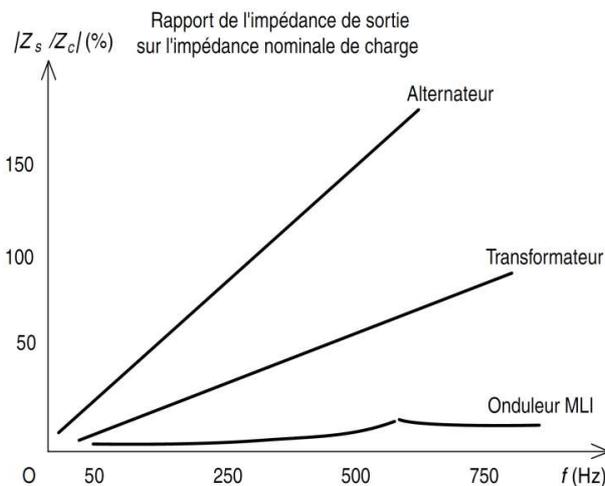


Figure 5.1: Évolution de l'impédance en fonction de la fréquence.

On peut considérer, en première approche, que l'impédance se limite principalement à la réactance X du réseau, les résistances r étant négligeables :

$$X = L.\omega = L.2\pi f$$

La pollution harmonique générée est ainsi plus ou moins importante suivant la puissance de la charge polluante (I_h) et est aussi fonction des caractéristiques du réseau (X_h) au nœud considéré de l'installation électrique :

$$V_h = X_h \cdot I_h$$

5.1.2 Intérêt du relèvement du facteur de puissance

L'énergie réactive appelée par un utilisateur en tarif vert sur le réseau de distribution électrique impose pour le fournisseur de l'énergie des moyens de production et de transport plus conséquent et donc plus coûteux pour celui-ci. De ce fait, les consommateurs industriels voient leur énergie réactive facturée par le distributeur d'énergie électrique et ceci dans le but de réduire cette consommation d'énergie réactive en privilégiant la solution de compensation par l'abonné.

La compensation d'énergie réactive, apporte, indépendamment de l'allègement de la facturation pour l'abonné, une augmentation de la puissance disponible sur l'installation, une diminution des pertes ainsi qu'une réduction de la chute de tension en ligne.

L'exemple suivant met en évidence l'intérêt d'une batterie de condensateurs couplée sur une installation électrique en vue d'un relèvement du facteur de puissance.

L'installation en exemple est alimentée par un transformateur 20 kV/400V d'une puissance apparente de 630 kVA.

- La puissance consommée par les équipements industriels est de 490 kW avec un facteur de puissance médiocre de **0,72**.
- La puissance apparente absorbée est de :

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{490}{0.72} = 680 \text{ kVA}$$

Le transformateur est en surcharge et ne bénéficie plus de puissance disponible.

Le courant en ligne est relativement important :

$$I = \frac{P}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{490}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.72} = 982 \text{ A}$$

La compensation du facteur de puissance est envisagée à 0,9.

Dans ce cas, la puissance apparente obtenue sera de :

$$S' = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{490}{0.92} = 544 \text{ kVA}$$

Le courant appelé en ligne est alors réduit à la valeur suivante :

$$I = \frac{P}{U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi} = \frac{490}{400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0.9} = 786 \text{ A}$$

Soit l'énergie réactive fournie par la batterie de condensateurs :

$$S_c = S - S' = 680 - 544 = 136 \text{ kVA}$$

Le courant en ligne est réduit dans ce cas de 20 % autorisant ainsi une diminution des pertes par effet Joule en ligne et assure, au transformateur, un fonctionnement dans des conditions normales.

5.1.3 Risque de résonance en présence de condensateurs

Une installation électrique est constituée d'éléments impédances tels que la source, les câbles ainsi que les diverses charges. Une représentation schématisée est donnée à la figure 5.2.

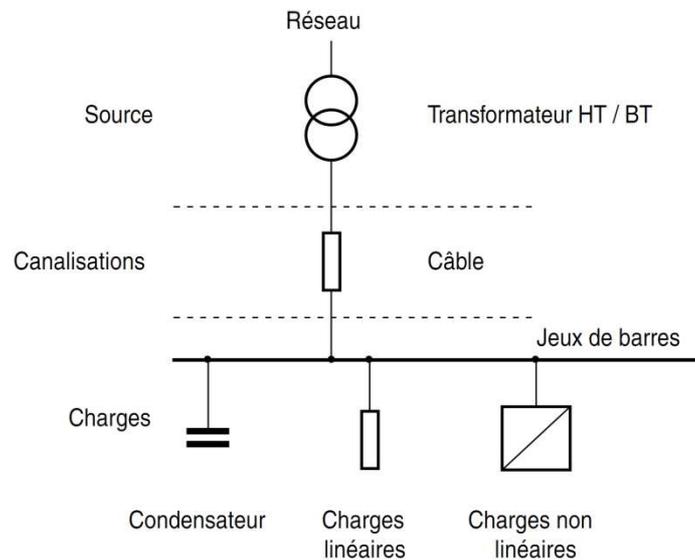


Figure 5.2: Représentation schématisée d'une installation électrique.

Les éléments impédances d'une installation électrique traditionnelle comportent alors des composants résistifs, inductifs et capacitifs. D'autre part, nous savons que l'impédance d'une inductance L est d'autant plus grande que la fréquence est élevée :

$$Z_L = L \times \omega = L \times 2.\pi.f$$

et que l'impédance d'un condensateur C est d'autant plus petite que la fréquence est élevée :

$$Z_C = \frac{1}{C \times \omega} = \frac{1}{C \times 2.\pi.f}$$

Aussi, dans un circuit intégrant notamment des éléments inductifs et capacitifs, sachant que l'impédance d'une inductance augmente avec la fréquence et que ceci est l'inverse pour une capacité, il y aura pour une fréquence donnée (f_r) égalité de la valeur absolue de ces deux fréquences :

$$f_r = \frac{1}{2.\pi \times \sqrt{L \times C}}$$

On parle ainsi de fréquence de résonance f_r .

Le phénomène de résonance, traduisant l'expression suivante: $L \times C \times \omega^2 = 1$, implique que les impédances capacitives et inductives ont ainsi des effets qui, en se combinant, donnent alors naissance à des valeurs extrêmes. Ces valeurs, selon la nature du schéma (résonance parallèle ou résonance série), peuvent être très fortes ou très faibles avec les répercussions correspondantes sur les courants et tensions. Les surintensités et les surtensions qui en résultent peuvent occasionner de graves dommages sur l'installation (destruction de condensateurs par exemple).

Le phénomène de résonance se réalise avec un ou des éléments inductifs en parallèle avec un condensateur (figure 5.2) mais aussi dans le cas d'un schéma de type série (figure 5.3) entre le condensateur et l'inductance constituée par la ligne et la source (sur le schéma: transformateur).

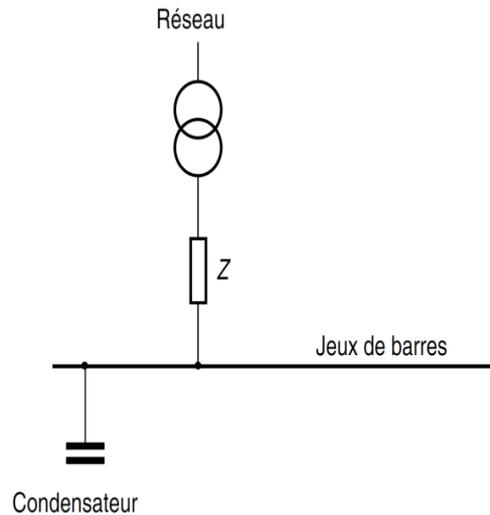


Figure 5.3: Schéma série d'une installation.

Nous allons donc nous intéresser à ces deux types de schémas, parallèle et série, pouvant donner lieu au phénomène de résonance.

▪ La résonance parallèle

L'analyse harmonique dans le cas de la résonance parallèle peut être réalisée à partir du schéma présenté à la figure 5.2. Considérons l'impédance harmonique Z de ce circuit au niveau du jeu de barres. L'expression simplifiée de l'impédance globale, obtenue à partir des éléments L et C en parallèle, s'exprime par la relation suivante:

$$Z = \frac{L \times \omega_r}{1 - L \times C \omega_r^2}$$

À la résonance, $L \times C \times \omega^2 = 1$ ce qui équivaut à l'expression:

$$f_r = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \times C}}$$

Le dénominateur $L \times C \times \omega^2 = 1$ est égal à zéro, l'impédance Z tend alors vers une valeur infinie; en pratique vers une valeur maximale de l'impédance et ceci à une fréquence f_r (figure 5.4). Le résultat conduit à des surtensions harmoniques importantes:

$$V_h = Z_h \cdot I_h$$

Ces tensions présentes au niveau du jeu de barres contribuent à la déformation de l'onde de tension sinusoïdale (augmentation du taux de distorsion harmonique en tension) et peuvent nuire au fonctionnement des équipements raccordés sur ce même réseau électrique.

▪ La résonance série

L'analyse harmonique dans le cas de la résonance série doit être considérée en amont du transformateur, soit du côté HTA (figure 5.3). Considérons ainsi l'impédance harmonique Z de ce circuit au niveau du primaire du transformateur. La capacité C se trouve alors en série avec l'impédance Z (figure 5.3). L'expression simplifiée de l'impédance globale, obtenue à partir des éléments L et C en série, s'exprime par la relation suivante :

$$Z = \frac{1 - L \times C \times \omega^2}{C \times \omega}$$

À la résonance, le numérateur $1 - L \times C \times \omega^2$ est égal à zéro, l'impédance Z tend vers une valeur minimale (figure 5.5). Aussi, pour cette fréquence particulière, le courant est uniquement limité par la faible résistance du circuit, celle-ci étant généralement faible, la valeur du courant sera donc élevée.

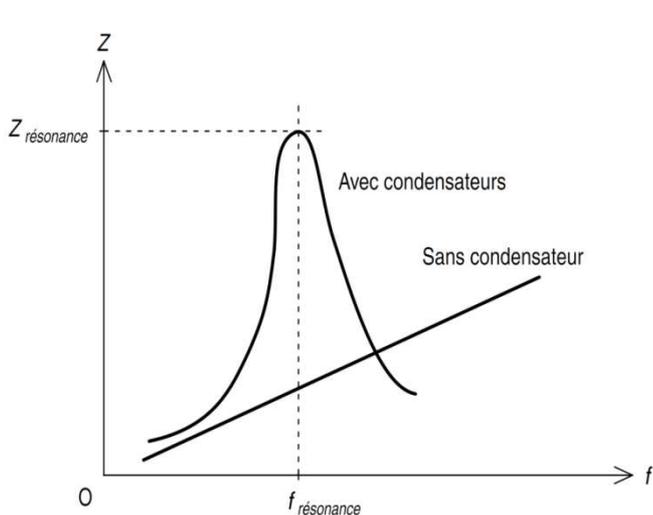


Figure 5.4: Impédance harmonique-résonance parallèle.

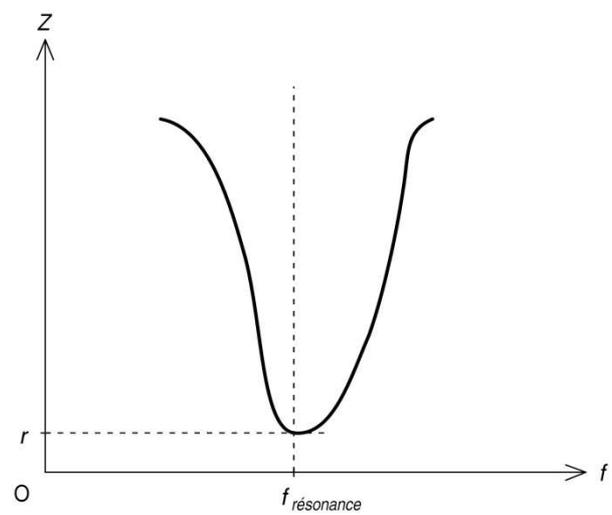


Figure 5.5 – Impédance harmonique – résonance série.

▪ Éviter la résonance

Le risque de résonance pouvant se produire, en présence de l'association de condensateurs et d'inductances, il est impératif de choisir la valeur de la capacité de relèvement du facteur de puissance de telle sorte que la fréquence de résonance soit éloignée des rangs harmoniques caractéristiques (rangs 3, 5, 7, etc.).

La fréquence de résonance peut ainsi être connue à l'avance afin de vérifier qu'elle ne coïncide pas avec une fréquence harmonique caractéristique (150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, etc.).

La démarche est la suivante:

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

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V \times V}{V \times I} = \frac{V^2}{S_{cc}} = L \times \omega \quad \text{avec} \quad S_{cc} = \frac{S_{\text{transformateur}}}{U_{cc}}$$

Soit l'inductance :

$$L = \frac{V^2}{S_{cc} \times \omega}$$

– La puissance réactive du ou des condensateurs est :

$$Q = C \times V^2 \times \omega$$

On en déduit la capacité :

$$C = \frac{Q}{V^2 \times \omega}$$

– L'expression de la fréquence de résonance étant connue :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L \times C}}$$

On remplace, au sein de cette dernière relation, les expressions précédentes de L et de C :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L \times C}} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{V^2}{S_{cc} \times \omega} \times \frac{Q}{V^2 \times \omega}}} = \frac{\omega}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

et $\omega = 2\pi \cdot f$ ou encore : $f = \frac{\omega}{2\pi}$

La fréquence de résonance s'écrit à présent :

$$f_r = f \times \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

Le risque de résonance est écarté lorsque cette fréquence est très élevée.

Reprenons en exemple, l'installation évoquée précédemment et présentant les caractéristiques suivantes :

- puissance active absorbée par les récepteurs: 490 kW,
- puissance réactive déterminée pour la batterie de condensateurs: 136 kvars,
- puissance de court-circuit au niveau du jeu de barres: 10 MVA,
- réseau 400 V – 50 Hz.
- la fréquence de résonance prédéterminée est ainsi de :

$$f_r = f \times \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} = 50 \times \sqrt{\frac{10000}{136}} = 429 \text{ Hz}$$

Cette fréquence de 429 Hz, proche du rang 9 (450 Hz), devra faire l'objet d'une étude particulière afin de vérifier si le rang harmonique 9 est présent sur le réseau du fait des charges non linéaires raccordées sur l'installation en question.

Avant d'effectuer un choix technologique de la batterie de condensateurs, il faut donc vérifier que la fréquence de résonance calculée soit éloignée des fréquences harmoniques présentes sur le réseau. Dans le cas échéant, le réajustement de la puissance réactive de cette batterie devra être réalisé de façon à s'écarter de ces fréquences harmoniques.

5.2 Les solutions de filtrage

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

Le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible (transformateur le plus puissant par exemple). Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques. Aussi, les charges polluantes doivent être raccordées le plus amont possible de la source afin de bénéficier du niveau le plus élevé de puissance de court-circuit.

La position du branchement des charges déformantes au sein d'une installation revêt ainsi un double intérêt: assurer la séparation des charges et bénéficier de la puissance de court-circuit la plus élevée (figure 5.6).

La séparation des sources est aussi une solution employée bien que coûteuse. Elle consiste à attribuer un transformateur indépendant pour l'alimentation unique de la charge non linéaire.

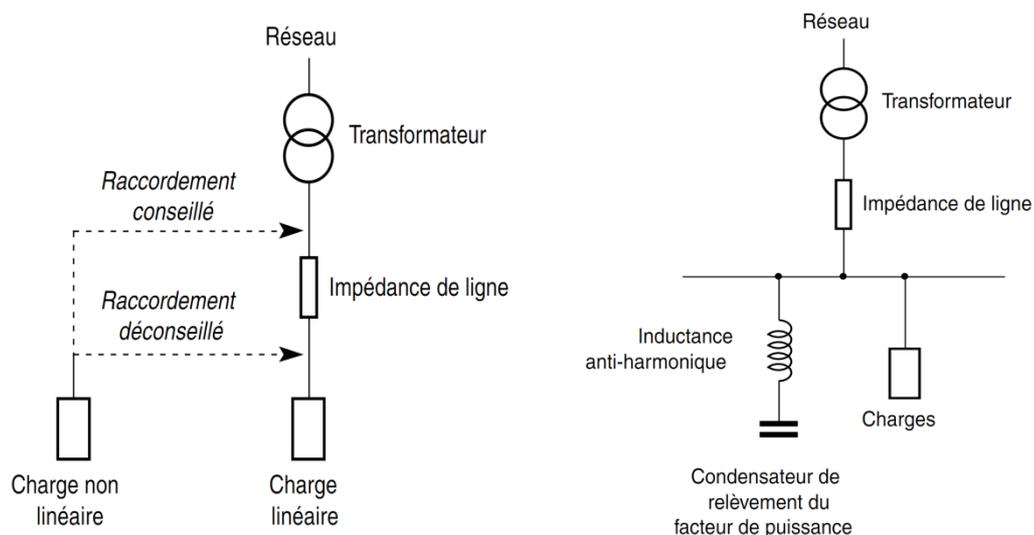


Figure 5.6: Préconisation de raccordement des charges déformantes. **Figure 5.7:** Montage de l'inductance anti-harmonique

Une autre solution, utilisée pour la protection des condensateurs de relèvement du facteur de puissance, consiste à placer en série avec le condensateur une inductance appelée inductance anti-harmonique (figure 5.7).

La valeur de la fréquence de résonance de l'ensemble du montage doit être placée en dessous des valeurs de fréquences harmoniques présentes, protégeant ainsi le ou les condensateurs de compensation d'énergie réactive contre les surcharges harmoniques comme le décrit la figure 5.8.

L'emploi d'une inductance anti-harmonique présente alors un double intérêt :

- elle supprime les risques de claquage de condensateur dus aux forts courants harmoniques (rappelons que l'impédance d'un condensateur diminue avec l'augmentation de la fréquence),
- elle réduit les taux de distorsion harmonique en tension sur le réseau considéré.

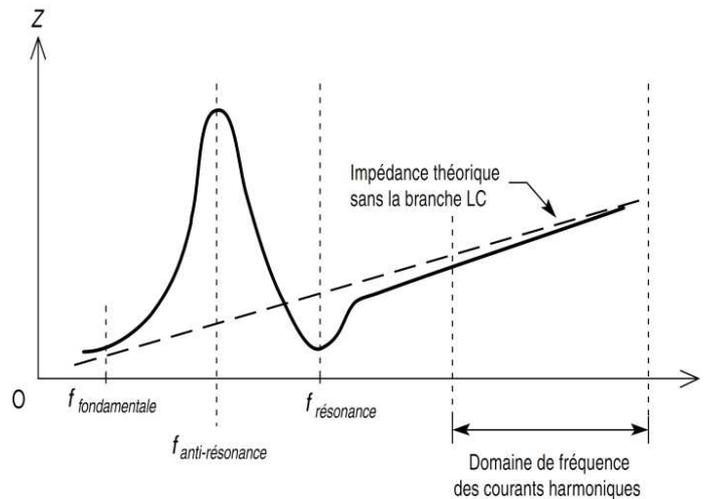


Figure 5.8: Courbe de fréquence – inductance anti-harmonique.

5.2.1 Filtrage passif

Le filtre passif associe un condensateur et une inductance placés en série, dans le but d’obtenir la fréquence de résonance sur un harmonique donné. Le filtre passif est donc défini au cas par cas afin d’être accordé sur un harmonique précis à filtrer. Le filtre, une fois ajusté sur l’harmonique à éliminer, présente une impédance très faible privilégiant alors le passage de ce courant harmonique à évacuer. Ce courant harmonique s’oriente ainsi vers le filtre et non pas vers le reste du réseau.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques:

- le filtre résonant (ou filtre de type shunt),
- le filtre amorti.

▪ Le filtre résonant

Le filtre résonant (ou filtre shunt) est composé d’une inductance L en série avec un condensateur C . Les valeurs d’inductance et de capacité sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l’harmonique à éliminer. Lorsque l’on souhaite réaliser le filtrage d’un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est alors nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d’entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer (figure 5.9).

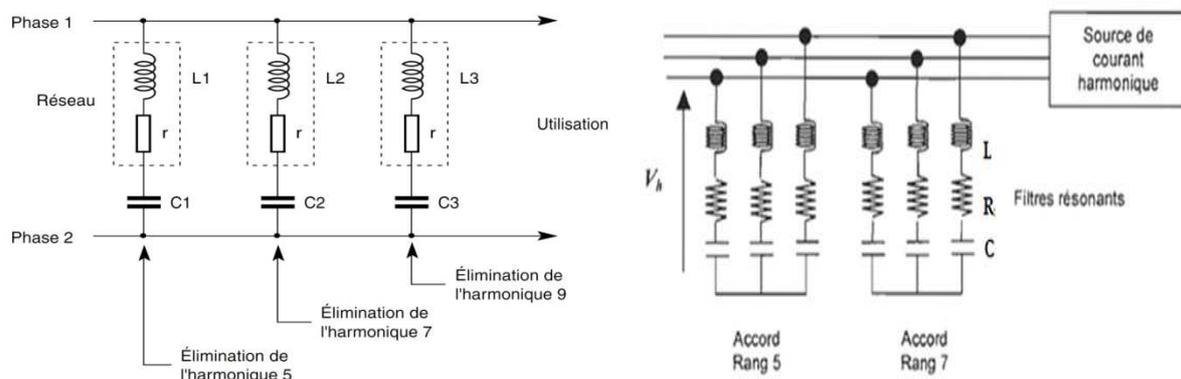


Figure 5.9 – Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

L'association de plusieurs filtres passifs, branchés entre phases, présente une impédance minimale (à la résonance, l'impédance Z est uniquement égale à la valeur de la résistance r du filtre) pour chaque rang d'harmonique à filtrer (figure 5.10). Cet ensemble de filtres est accordé sur les différentes fréquences correspondant aux rangs harmoniques à supprimer. Aussi, les tensions harmoniques résultantes sont limitées, pour chacune d'entre elles, au produit de la faible résistance r par le courant harmonique au rang considéré.

La mise en œuvre d'un filtre passif nécessite une étude précise de l'installation concernée par cette modification structurelle.

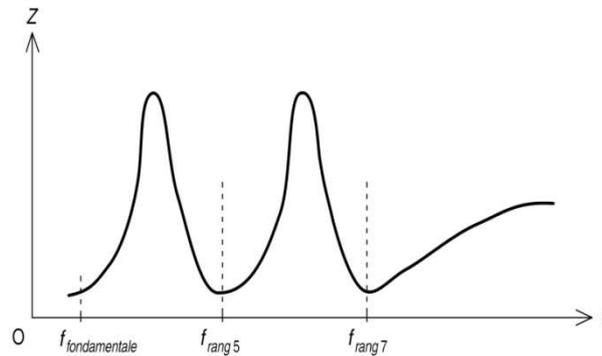


Figure 5.10 –courbe d'impédance pour deux filtres résonants (h5 et h7).

▪ Le filtre amorti

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance (figure 5.11). Utilisé pour des applications susceptibles de générer des courants harmoniques proches de l'antirésonance, ce filtre:

- amortit les antirésonances (l'impédance à la fréquence d'antirésonance est plus faible),
- réduit les tensions harmoniques de fréquences égales ou supérieures à son accord.

Le filtre amorti assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonant mais sans éliminer concrètement ces perturbations. Il ne réalise donc pas la suppression de ces harmoniques mais contribue à améliorer sensiblement le taux de distorsion harmonique globale d'une installation polluée.

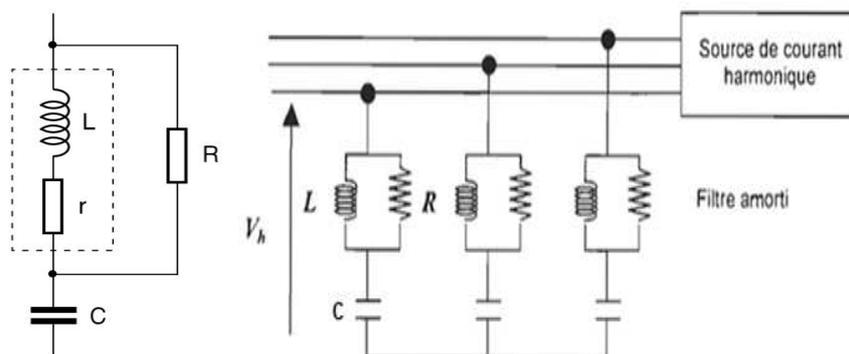


Figure 5.11 – Structure du filtre amorti.

5.2.2 Filtrage actif

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs, encore appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique. **Le filtre actif est d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs d'harmoniques à la fois.**

Le principe du filtre actif de type shunt (filtre actif le plus répandu) réalise l'injection d'un courant dit compensateur en opposition avec le courant déformé absorbé par la charge non linéaire. Le courant résultant en amont de la charge est un courant reconstitué proche de la sinusoïde classique, transformant alors, vis-à-vis du réseau, la charge non linéaire en une charge linéaire. Les effets néfastes des harmoniques sont ainsi annulés. La figure 5.12 donne une représentation schématique de ce type de filtre.

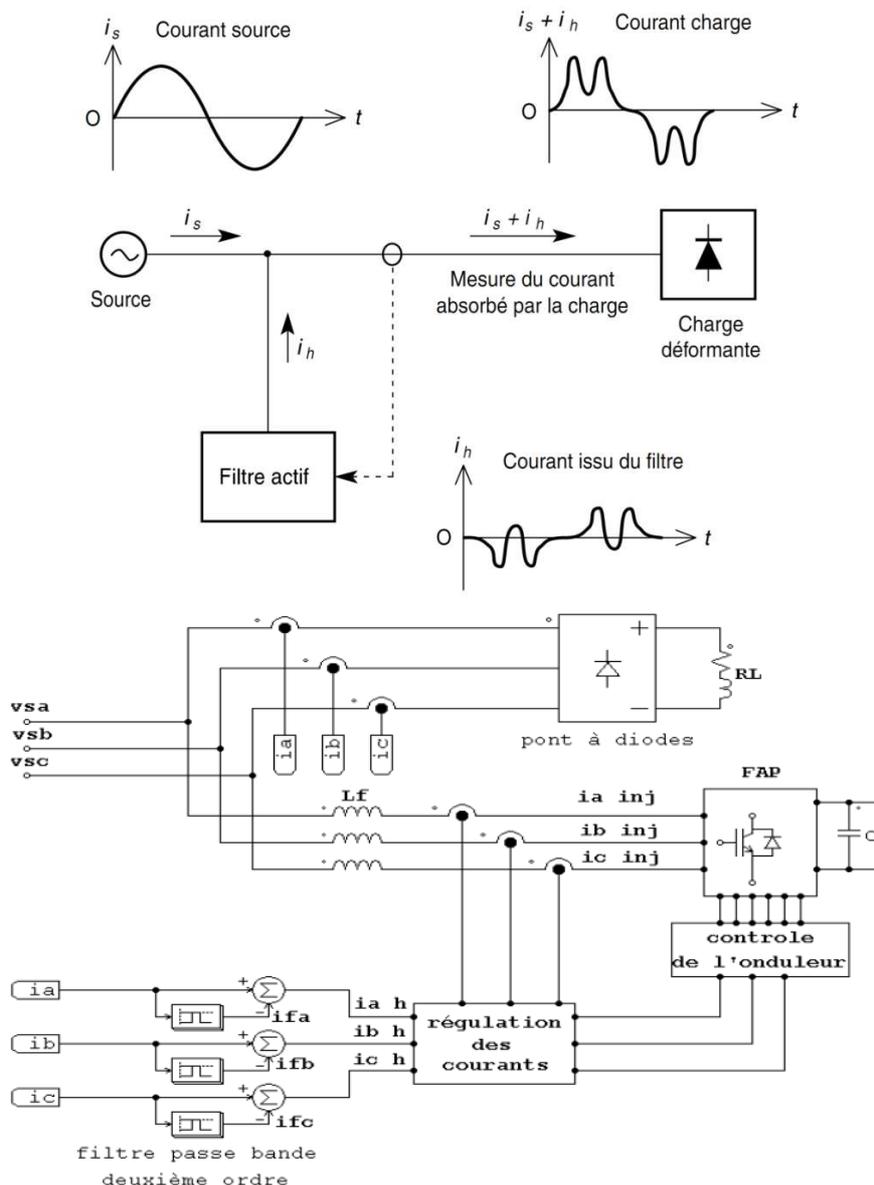


Figure 5.12: Principe du filtrage actif.

5.2.3 Avantages et inconvénients des différents types de filtres

Types de filtre	Description
Filtres passifs	<p>Les filtres passifs sont définis au cas par cas pour être accordés sur un harmonique précis à filtrer.</p> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> – Économique : faible coût du composant mis en œuvre. – Pas de surveillance à assurer en cours de fonctionnement. <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> – La dépollution harmonique n'est efficace que pour l'installation présente (Ajout ou suppression de charges peut rendre la solution inopérante).
Filtres actifs	<p>Les filtres actifs annulent les harmoniques en injectant au point où ils prennent naissance des courants exactement égaux. Les filtres actifs réagissent en temps réel (de façon active) aux harmoniques présents pour les éliminer. Plus efficaces et souples d'emploi que les filtres passifs ils évitent leurs inconvénients et constituent une solution :</p> <ul style="list-style-type: none"> – plus performante (élimination totale possible des harmoniques jusqu'au rang 50) ;
Filtres homopolaires	<p>Les filtres homopolaires réalisent le filtrage des harmoniques homopolaires (de rangs multiples impairs de 3) qui s'additionnent dans le conducteur neutre.</p> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> – Solution aux problèmes de courant dans le neutre, de plus en plus fréquents dans les installations de distribution de bureaux. – Élimination de tous les harmoniques de rang 3 k. – Rééquilibrage des phases. – Simplicité de mise en œuvre.

5.3 Étude de cas d'un filtrage passif sur un convertisseur de traitement de surface

L'étude expérimentale menée contre la pollution harmonique est réalisée ici à partir d'un ensemble de traitement de surface (zingage électrolytique) utilisant un générateur de courant intégrant un redresseur à thyristors.

5.3.2 Schéma de principe du redresseur

Le schéma de principe du redresseur assurant la génération du courant pour l'électrolyse est fourni à la figure 5.14.

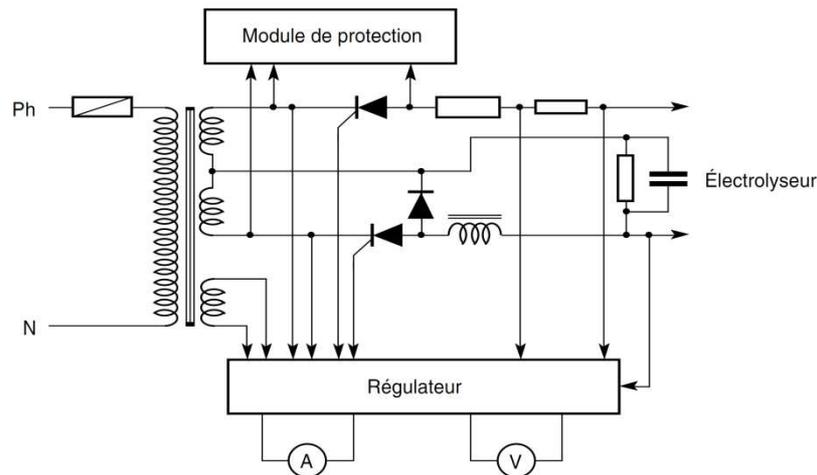


Figure 5.14: Principe du redresseur assurant la génération du courant pour l'électrolyse

Le système de traitement de surface TS 3000 est installé dans un atelier comportant plusieurs équipements électriques de puissance. Le système TS 3000 est alimenté par un transformateur de 5,7 kVA sous un réseau triphasé de 400 volts. Les mesures obtenues sont reportées dans le tableau 5.1 suivant.

Tableau 5.1 – Mesures réalisées en amont du générateur de courant.

Courant (en ampères)	THD (en %)	DF (en %)	Fc
1,44	30,9	29,5	1,53
Tension (en volts)	THD (en %)	DF (en %)	Fc
215,8	4,9	4,8	1,46

Tableau 5.2 – Résultats issus de l'analyse harmonique.

Rang de l'harmonique	F	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
Taux d'harmoniques individuels en tension (en %)	100	0,9	3,2	0,3	3	0,4	1,4	0,2	0,8	0,2	0,3	0,3
Taux d'harmoniques individuels en courant (en %)	100	1,2	21	0,8	11	0,6	7	0,6	5,6	0,5	4,3	3,9

▪ **Analyse et interprétation des résultats**

Les mesures obtenues ont été effectuées lorsque le générateur de courant débite 20 A sous 10 V dans le bain de dégraissage électrolytique. La décomposition des signaux tension et courant est issue du logiciel de traitement des données dont les résultats sont communiqués dans le tableau 5.2. Le courant n'a donc plus une allure sinusoïdale et est représenté à la figure 5.16, la tension résultante est représentée à la figure 5.17.

L'analyse harmonique (tableau 5.2) met en évidence la présence des rangs harmoniques suivants : 3, 5, 7, 9, 11 et 13. L'harmonique 3 représente 21 % du fondamental et l'harmonique 5 est de l'ordre de 11 % du fondamental.

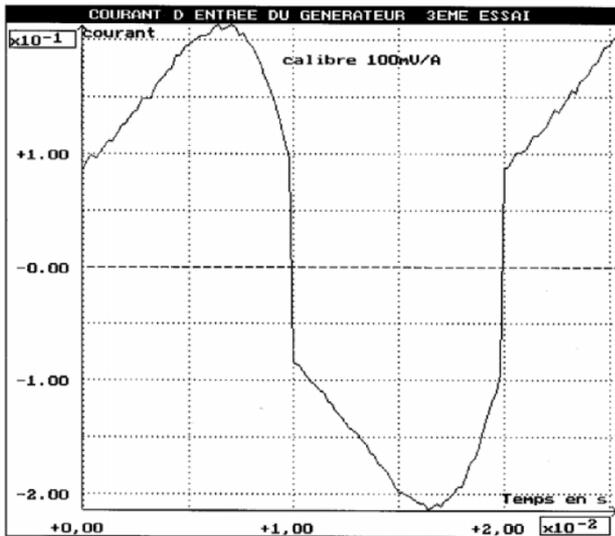


Figure 5.16: Courant absorbé par le générateur de courant

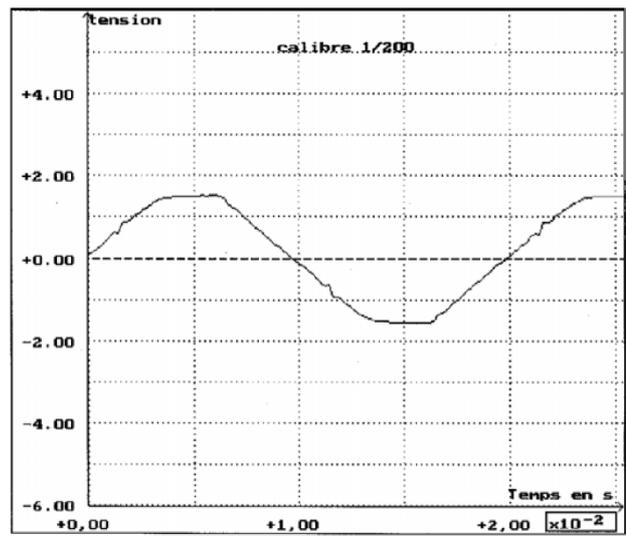


Figure 5.17: Tension à l'entrée du générateur de courant.

▪ **Filtrage proposé**

La limitation des courants harmoniques sur ce réseau peut être envisagée grâce à l'emploi de filtres passifs de type shunt résonant. Pour cette étude, c'est le principe du shunt résonant qui a été employé pour réduire la pollution harmonique. Ce filtre est constitué d'une branche L-C série dont la fréquence d'accord est donnée par l'expression suivante :

$$f_r = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L \times C}}$$

Cette fréquence d'accord doit être placée sur la fréquence de l'harmonique à éliminer. Le shunt résonant présente alors à la fréquence f_r , une impédance minimale réduite à la résistance r .

1. Les caractéristiques du filtre retenu

L'impédance caractéristique : $Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Le facteur de qualité : $Q = \frac{Z_c}{r}$, avec r : résistance de l'inductance.

Ordres de grandeur de Q :

- 75 pour les inductances dans l'air,
- supérieur à 75 pour les inductances à fer.

La bande passante :

$$BP = \frac{1}{Q} = \frac{r}{X_c} = 2 \frac{f - f_r}{f_r}$$

2. Dimensionnement du filtre

Dans cette étude, nous nous limiterons au filtrage des harmoniques de rang 3 et 5. Aussi, le montage des filtres est présenté au travers de la figure 5.18

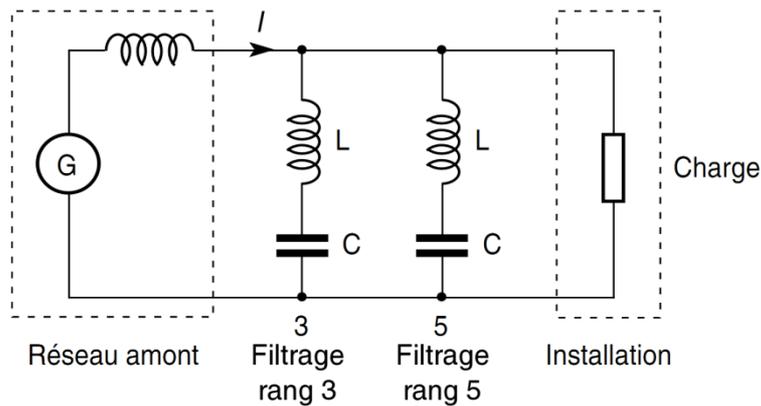


Figure 5.18 – Schéma du filtre résonant.

Les filtres, pour traiter les harmoniques de rang 3 et 5, doivent avoir respectivement les fréquences de résonance de 150 Hz et de 250 Hz tout en ayant chacun un facteur de qualité supérieur à 75. Pour une valeur de capacité choisie on obtient :

Filtre de rang 3	$f_r = 150 \text{ Hz}$	$C = 1 \text{ microfarad}$
		$L = 1,126 \text{ H}$
		$Z_c = 1061 \text{ Ohms}$
		$Q = 88,4$
Filtre de rang 5	$f_r = 250 \text{ Hz}$	$C = 0,5 \text{ microfarad}$
		$L = 0,8 \text{ H}$
		$Z_c = 1265 \text{ Ohms}$
		$Q = 105,4$

La mise au point du filtre passif à nécessité de réaliser des essais électriques de l'ensemble LC (tableau 5.3), sur une plage de fréquence allant de 30 à 700 Hz, afin de tracer la courbe d'impédance tracée à la figure 5.18.

Tableau 5.3 – Résultats des essais – courbe harmonique

f (Hz)	30	40	50	60	70	80	100	120	130	140	150
U (V)	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,46	1,44	1,41	1,28	0,61
I (mA)	0,41	0,55	0,72	0,89	1,10	1,35	2,04	3,44	4,92	8,21	14,74
Z (Ω)	3 585	2 673	2 042	1 652	1 336	1 088	716	419	286	156	41

160	170	180	199,1	200	210	222,2	230,3	241,7	250	261,5	278,6
1,12	1,27	1,36	1,31	1,48	1,46	1,28	1,24	1	0,66	1,04	1,24
8,16	3,98	2,15	0,37	0,37	1,09	2,69	4,46	9,12	12,74	9,55	5,62
137	319	605	3 540	4 000	1 339	476	278	110	52	109	221

304	320	351,3	380,8	409	451,5	500	551,6	600,5	650	700
1,29	1,31	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
3,58	2,98	2,28	1,9	1,65	1,39	1,19	1,04	0,93	1,32	1,32
360	439	579	695	800	950	1 110	1 269	1 419	1 571	1 714

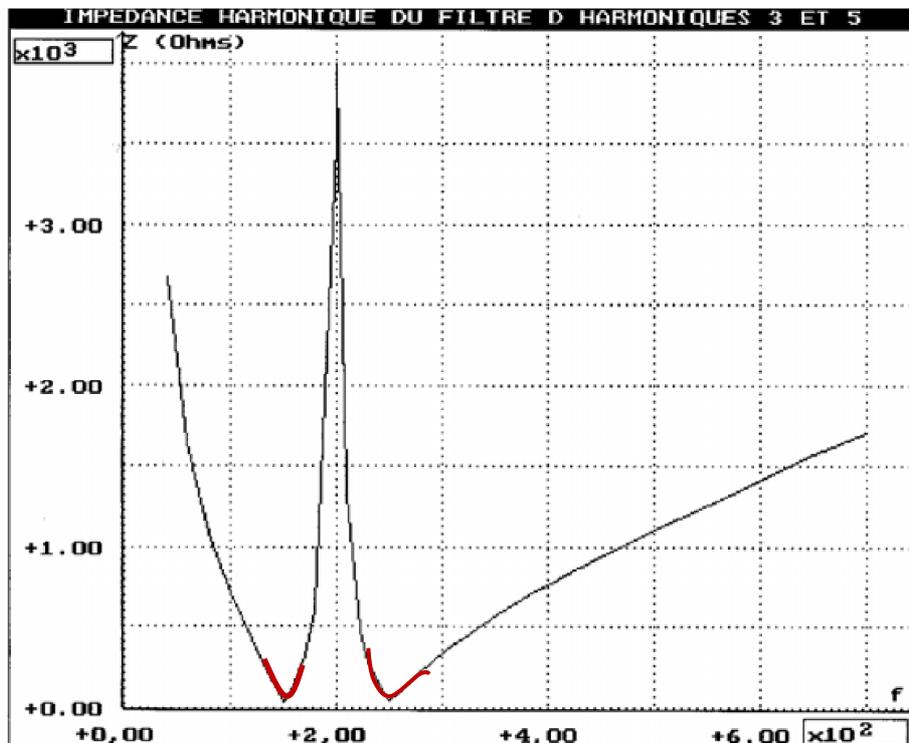


Figure 5.16 – Allure du courant absorbé par le générateur de courant.

La courbe d'impédance harmonique caractéristique du filtre permet de visualiser les minima d'impédances obtenus pour les fréquences de 150 Hz et 250 Hz (figure 5.19). Les impédances de résonance à ces fréquences choisies assureront alors la réduction des harmoniques 3 et 5.