

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -

X•⊙V•EX •K||E C:K:|A :||K•Z - X:⊙E⊙t -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

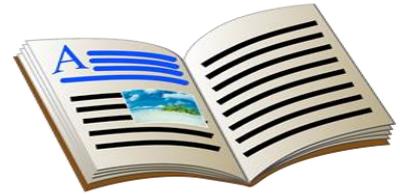
Département de Génie Electrique

## Polycopié de cours/TD/TP

En : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques / Electrotechnique Industrielle

Niveau : Master



---

# Qualité de l'énergie électrique

---

Par BERRAG Amine

Année :2020/2021

# Sommaire

## **Partie I : Introduction aux notions de la qualité de l'énergie**

Introduction aux notions de la qualité de l'énergie	1
---	---

## **Partie II : Dégradation de la qualité de l'énergie**

1	Introduction	4
2	Composition d'une onde distorsionnée	4
3	Harmoniques et diagrammes vectoriels	6
3.1	Valeurs efficaces d'une onde distorsionnée	7
4	Creux de tension et coupures brèves	8
4.1	Définition, origine et conséquences	8
4.2	Représentation dans le plan complexe	9
4.3	Paramètres déterminant les types de creux de tension	10
4.3.1	Types de courts-circuits	10
4.3.2	Régime de neutre	11
4.4	Type de mesures	12
5	Harmoniques et inter harmoniques	12
5.1	Décomposition d'un signal périodique	12
6	Origines des harmoniques	13
7	Grandeurs caractéristiques	13
7.1	Grandeur harmonique	13
7.2	Rang de l'harmonique	14
7.3	Série de Fourier	14
7.4	Valeur efficace d'une grandeur alternative	14
7.5	Taux de distorsion	14
7.6	Spectre d'harmonique (de fréquence)	15
7.7	Charges linéaires et non linéaires	15
8	Conséquences des harmoniques	16
8.1	Effets instantanés	16
8.2	Effets à terme	16
9	Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP	17
10	Problème de l'harmonique 3	18
10.1	Prédominance des courants harmoniques de rang 3	18

10.2	Problèmes causés par les harmoniques de rang 3	19
11	Exemple	19

### **Partie III : Normes en vigueur : Normes IEC et IEEE concernant l'émission des harmoniques en basse et moyenne tension**

1	Normalisation de la QEE	23
2	Normes concernant les perturbations harmoniques	25
3	Normes concernant les perturbations sur la valeur efficace de la tension	28
4	Normes pour FLICKER	30

### **Partie IV : Solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie**

1	Les solutions traditionnelles	31
1.1	Transformateur à couplage spécial	31
1.2	Pont dodécaphasé	31
1.3	Surdimensionnement des installations électriques	32
1.4	Agir sur la structure de l'installation	32
1.5	Utilisation une inductance (selfs) série	33
1.6	Filtres passifs d'harmoniques	33
1.7	Filtre résonant	33
1.8	Filtre amorti	34
1.9	Filtres d'harmoniques de rang 3 –la solution économique	34
1.9.1	Economies d'énergie	35
2	Solutions modernes de dépollution	35
2.1	Filtrage actif	35
2.1.1	Filtre actif parallèle	36
2.1.2	Filtre actif série	37
2.1.3	Combinaison parallèle série actif	37
2.1.4	Filtrage hybride	38
2.2	Les redresseurs MLI	38
2.2.1	Redresseur de tension	39
2.2.2	Redresseur de courant	39
3	Exemple	39

## Liste des figures

**Figure II.1 :** Forme d'onde déformée d'un courant à 60 Hz ayant une valeur efficace de 62,5A à 60 Hz, circulant dans un système d'entraînement électronique.

**Figure II.2 :** a. Deux sources sinusoïdales de 60 Hz et 180 Hz raccordées en série, b. La tension e 3 résultante est distorsionnée.

**Figure II.3 :** a. Une onde distorsionnée peut être représentée par des vecteurs tournant à des vitesses différentes. Leur position angulaire initiale affecte aussi la forme d'onde.  
b. Forme d'onde de la tension générée par les vecteurs.

**Figure II.4 :** Forme d'onde de la tension lorsque l'angle initial du 5<sup>e</sup> harmonique est de 180°.

**Figure II.5 :** Amplitude d'un creux de tension a) provoquées par un court-circuit  
b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur

**Figure II.6 :** a) Creux de Tension, b) Représentation dans le plan complexe.

**Figure II.7 :** Types de courts-circuits : a) monophasé, b) biphasé phase/terre, c) biphasé phase/phase, d) triphasé.

**Figure II.8 :** Régime de neutre : direct et isolé

**Figure II.9 :** Décomposition d'un signal périodique

**Figure II.10 :** Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.

**Figure II.11 :** Diagramme de Fresnel des puissances

**Figure III.1 :** Illustration des concepts de base de la normalisation en matière de qualité de l'électricité, à l'aide de statistiques temps/lieu concernant le système entier.

**Figure IV.1 :** structure du pont dodécaphasé

**Figure IV.2 :** Forme des courants et rang des harmoniques

**Figure IV.3 :** Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

**Figure IV.4 :** Structure du filtre résonant

**Figure IV.5 :** Structure du filtre amorti

**Figure IV.6 :** Montage d'un filtre actif parallèle.

**Figure IV.7 :** Montage d'un filtre actif série

**Figure IV.8 :** Combinaison parallèle – série actif (UPQC )

**Figure IV.9 :** Redresseur de tension

**Figure IV.10 :** Redresseur de courant.

## **Liste des tableaux**

**Tableau III.1** : Limites CEI 1000-2-4 des émissions de courants harmoniques.

**Tableau III.2** : Limites CEI 100-3-2 pour la distorsion harmonique de la tension.

**Tableau III.3** : Limites IEEE des émissions de courants harmoniques.

**Tableau III.4** : Limite IEEE pour distorsion harmonique de la tension.

**Tableau III.5** : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.

**Tableau III.6** : Valeurs nominales d'après la norme EN50160.

## Partie I : Introduction aux notions de la qualité de l'énergie

La qualité d'énergie électrique constitue un grand intérêt ces dernières années pour tous les acteurs du système électrique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs ou consommateurs d'électricité. Parmi tous ces acteurs, le gestionnaire de réseau occupe une position centrale. Sa responsabilité est de mettre en œuvre les moyens permettant de veiller sur la qualité de l'énergie électrique au sein de réseaux.

Le besoin de répondre à un ensemble de critères et indices de qualité est devenu primordial, notamment avec les perturbations inévitables qu'a connu tous le système électrique ces derniers temps, telles que les courts-circuits, les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateur ainsi que les pertes dans les lignes et les aléas de consommation peuvent affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa stabilité.

Les moyens classiques de contrôle de la qualité s'avèrent trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations qui affectent les réseaux.

Les nouveaux contrôleurs à base d'électronique de puissance permettent de résoudre des problèmes de contrôles : de la qualité de la tension, d'amortissement des oscillations, d'amélioration de la répartition des transits de puissance et de stabilité. La maîtrise de la qualité de la tension est sans doute l'application la plus probable, notamment en présence de fortes charges perturbatrices.

La sensibilisation à la qualité de l'énergie électrique est devenue incontournable aujourd'hui depuis les évolutions réglementaires qui ont eu lieu ces dernières années. Les distributeurs ainsi que les divisions de transport d'énergie électrique s'efforcent afin de garantir la qualité de l'électricité fournie. Dans ce nouveau contexte, les exploitants du système devront assumer une certaine responsabilité pour la livraison de l'électricité en conformité au niveau de qualité énoncée soit par les clients, dans les contrats, ou par le régulateur, dans la législation. Cette responsabilité implique que la surveillance systématique de la qualité de l'énergie deviendra de plus en plus une pratique courante, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- **Economiques** les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.
- **La généralisation** des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations.

- **L'ouverture** du marché de l'électricité : la libéralisation du marché de l'électricité fait que la qualité de l'énergie électrique est devenue un des critères de choix d'un fournisseur d'énergie plutôt qu'un autre de la part des consommateurs. Les fournisseurs se doivent donc de fournir à leurs clients une énergie avec une qualité maximale.

Le domaine de la qualité de l'énergie électrique se caractérise par deux grands axes de recherche :

1. la surveillance (monitoring) : mesure et analyse des perturbations électriques dans les réseaux.
2. les solutions préventives et curatives.

**Dans le premier axe** : la surveillance représente l'étape préliminaire dans la recherche de solutions. Il permet de comprendre l'origine des perturbations, d'évaluer leur impact sur les équipements, et donc de trouver et choisir la solution la plus appropriée économiquement et techniquement.

Cet aspect monitoring est riche en problèmes ouverts du fait de la forte augmentation des capacités d'enregistrement et de traitement de données, ainsi que des besoins croissants en termes de distinction de sources perturbatrices et d'amélioration de la planification et de la conception. Il inclut aussi la recommandation des indices de qualité de l'énergie et des objectifs en vue de guider les opérateurs dans une de leurs nouvelles responsabilités.

**Pour le deuxième axe** : l'électronique de puissance grâce à sa rapidité et sa capacité à contrôler le flux de puissance (non seulement active mais aussi réactive), peut aider à améliorer la qualité d'énergie fournie aux clients en particulier et la qualité au sein réseau en général. L'EP peut agir de deux façons afin d'améliorer la cohabitation entre les charges polluantes et sensibles : d'une part, en évitant que les perturbations générées par les charges perturbatrices soient injectées au réseau et d'autre part, en protégeant les charges sensibles des perturbations présentes sur le réseau.

Les systèmes d'EP connectés aux réseaux avec le but d'améliorer la qualité de l'énergie sont connus sous le nom de dispositifs Custom Power (d'après le projet homonyme commencé entre l'EPRI et Westinghouse en 1992). Ils sont aussi désignés sous le nom de FACTS « Flexible AC Transmission System » de distribution. Toutefois, leurs fonctionnalités sont différentes (l'optimisation de la conduite des réseaux de transport dans le cas de FACTS versus l'amélioration de la qualité de l'énergie dans le cas de distribution). Par ailleurs, vu les niveaux de puissance engagés, les FACTS utilisent plus les interrupteurs bicommandables à haute fréquence.

Les systèmes FACTS travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier. Ces dispositifs font partie de la famille des actionneurs<sup>1</sup> réseau, dont le but est d'échanger de l'énergie avec le réseau afin d'améliorer la qualité de fourniture. Ils peuvent se connecter soit en série soit en shunt avec le réseau, et ils peuvent être passifs ou actifs en fonction de l'application. Les systèmes passifs se comportent comme des impédances variables, qui injectent un courant réactif variable dans le réseau ou qui produisent des chutes ou des élévations de tension variables. Du point de vue énergétique, ces dispositifs peuvent être considérés comme des systèmes d'échange d'énergie réactive. Les actionneurs actifs peuvent présenter en plus des caractéristiques présentées ci-dessus pour les actionneurs passifs, un degré de liberté supplémentaire dû à la possibilité d'échange d'énergie active, pour peu que cette dernière soit disponible. Ils sont basés sur des convertisseurs statiques.

Le document se comporte 4 chapitres :

Le premier donne une idée générale sur la qualité de l'énergie électrique, sa nécessité et pourquoi elle est parfois dégradée.

Le deuxième traite la dégradation de la qualité d'énergie électrique, causée essentiellement par les harmoniques, leurs origines et la décomposition fréquentielle d'un signal périodique non sinusoïdal, afin d'analyser et d'étudier ces signaux déformés.

Le troisième montre les différentes normes, soit pour le courant ou la tension ; que doit n'importe quelle installation les respectées.

Le quatrième explique les différentes solutions (soit traditionnelle ou moderne), pour lutter contre ces harmoniques, dans le but de les minimiser ou les éliminer s'il y a lieu, donc et par conséquent améliorer la qualité de l'énergie électrique.

## Partie II : Dégradation de la qualité de l'énergie

### 1) Introduction

Il arrive souvent que les tensions et les courants d'un circuit n'aient pas une forme d'onde sinusoïdale. Ainsi, la Fig.1 montre un courant alternatif qui est fortement déformé. Cette distorsion peut être causée par la saturation du flux dans le noyau d'un transformateur, par la commutation des thyristors dans un système d'entraînement électronique, ou par toute autre charge non linéaire. Les tensions distorsionnées 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.

### 2) Composition d'une onde distorsionnée

On peut décomposer une onde périodique distorsionnée en une série d'ondes sinusoïdales. Inversement, on peut créer une onde périodique distorsionnée, en faisant la somme de plusieurs ondes sinusoïdales de fréquences et d'amplitudes différentes.

Considérons un groupe d'ondes sinusoïdales dont la fréquence la plus basse est  $f$  et dont les autres fréquences sont des multiples entiers de  $f$ . L'onde sinusoïdale ayant la fréquence  $f$  s'appelle la fondamentale alors que les autres ondes sont appelées harmoniques. Ainsi, un groupe d'ondes sinusoïdales ayant des fréquences de 20, 40, 100 et 380 Hz possède les composantes suivantes: Fondamentale :

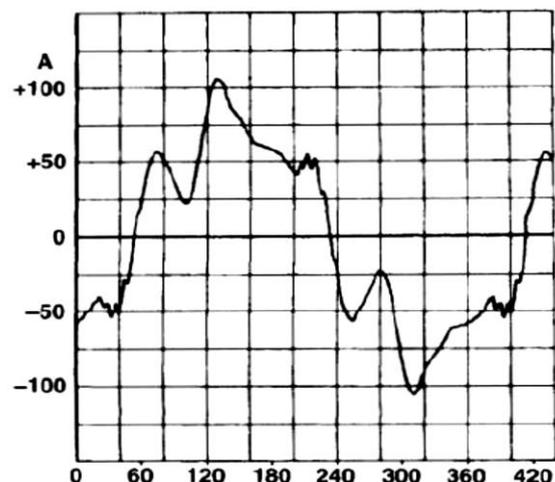
20 Hz (la plus basse fréquence)

2e harmonique : 40 Hz ( $2 \times 20$  Hz)

5e harmonique: 100 Hz ( $5 \times 20$  Hz)

19e harmonique : 380 Hz ( $19 \times 20$  Hz)

**Figure II.1 :** Forme d'onde déformée d'un courant à 60 Hz ayant une valeur efficace de 62,5A à 60 Hz, circulant dans un système d'entraînement électronique.



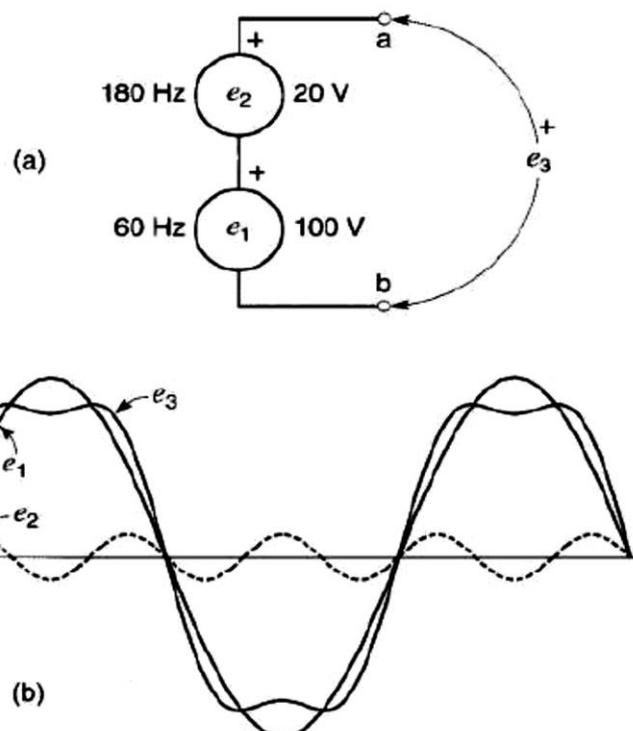
L'onde contient les harmoniques suivants :

Fondamentale (60 Hz) = 59 A

5e harmonique (300 Hz) = 15,6 A

7e harmonique (420 Hz) = 10,3 A

Les harmoniques supérieurs à 420 Hz sont aussi présents, mais leur amplitude est faible. Afin de comprendre comment un harmonique peut produire une distorsion, considérons deux sources de tension  $e_1$  et  $e_2$  raccordées en série (Fig.2a). La tension  $e_1$  a une valeur crête de 100 V et une fréquence de 60 Hz. La tension  $e_2$  a une valeur crête de 20 V et une fréquence de 180 Hz. Il s'ensuit que  $e_1$  est la fondamentale et  $e_2$  le troisième harmonique. Les deux formes d'onde sont parfaitement sinusoïdales et on suppose qu'elles passent par zéro en même temps (Fig.2b). Comme les sources sont en série, la tension  $e_3$  aux bornes a, b est égale à la somme des tensions instantanées produites par chaque source. On constate que la tension  $e_3$  a une forme d'onde aplatie. La somme d'une tension fondamentale et d'une tension harmonique produit donc une forme d'onde non sinusoïdale dont le niveau de distorsion dépend de l'amplitude relative de l'harmonique. On peut, en utilisant ce procédé, créer une tension ou un courant périodique ayant n'importe quelle forme d'onde. Il suffit d'ajouter à la composante fondamentale un certain nombre d'harmoniques. Par exemple, on peut créer une tension alternative carrée ayant une valeur crête de 100 V et une fréquence de 50 Hz en raccordant en série les sources de tension. On constate qu'une onde carrée est composée d'une onde fondamentale et d'un nombre infini d'harmoniques.



**Figure II.2 :** a. Deux sources sinusoïdales de 60 Hz et 180 Hz raccordées en série, b. La tension  $e_3$  résultante est distorsionnée.

Les harmoniques de haute fréquence ont une faible amplitude ; par conséquent, ils sont habituellement négligeables. Toutefois, ce sont ces composantes qui produisent ensemble les côtés raides et les coins pointus de l'onde. Même si, en pratique, on ne crée pas des ondes carrées par addition d'ondes sinusoïdales, cet exemple démontre qu'on peut générer n'importe quelle forme d'onde périodique avec une fondamentale et des harmoniques appropriés. Inversement, on peut analyser une onde déformée et déterminer mathématiquement la valeur de la fondamentale et des harmoniques (voir, par exemple, la légende de la Fig.1). Nous verrons plus loin comment faire ce calcul. En général, les harmoniques de tension et de courant sont nuisibles, mais dans certains montages ils sont inévitables. Les harmoniques sont créés par des charges non linéaires telles que les arcs électriques et les circuits magnétiques saturables.

Ils sont aussi générés par les redresseurs et les onduleurs utilisant l'électronique de puissance. Dans les circuits à courant alternatif, la tension fondamentale et le courant fondamental produisent ensemble une puissance apparente fondamentale. Cette dernière comprend la puissance active et réactive qui fait tourner un moteur, ou qui fait allumer une lampe. De même, le produit d'une tension harmonique et du courant harmonique correspondant donne une puissance apparente harmonique. La composante active de cette puissance harmonique ne produit aucun travail utile et elle est généralement dissipée sous forme de chaleur. Par contre, le produit d'une tension sinusoïdale de fréquence donnée et du courant sinusoïdal d'une autre fréquence donne une puissance moyenne nulle. Ainsi, le produit d'une tension de 120 V à 60 Hz et d'un courant de 20 A à 180 Hz donne une puissance moyenne nulle.

### 3) Harmoniques et diagrammes vectoriels

On peut représenter une tension distorsionnée au moyen d'un diagramme vectoriel. Il suffit d'indiquer la fréquence, l'amplitude et la valeur initiale de chacune de ses composantes. Par exemple, le diagramme vectoriel de la Fig.3a indique :

1) une tension fondamentale EF de 100 V crête, 60 Hz avec un angle initial  $0^\circ$  ; ce vecteur tourne à raison de 60 tours par seconde dans le sens antihoraire.

2) un 5e harmonique EH de 20 V crête, 300 Hz, avec un angle initial de  $60^\circ$  ; ce vecteur tourne 5 fois plus vite que la fondamentale.

La forme d'onde distorsionnée composée de la fondamentale et l'harmonique s'exprime par l'équation :

$$E = 100 \sin \theta + 20 \sin (5\theta + 60^\circ)$$

où

$\theta = 360 ft = 360 \times 60 \times t$  (angles en degrés)

La forme d'onde durant un cycle est montrée à la Fig.3b.

En plus de l'amplitude et de la fréquence, la forme d'onde dépend aussi de l'angle initial des composantes harmoniques. Par exemple, si l'angle initial du vecteur à 300 Hz est de  $180^\circ$  au lieu de  $60^\circ$ , l'onde résultante a la forme montrée à la Fig.4.

### 3.1) Valeurs efficaces d'une onde distorsionnée

La valeur efficace d'une tension distorsionnée est donnée par la formule :

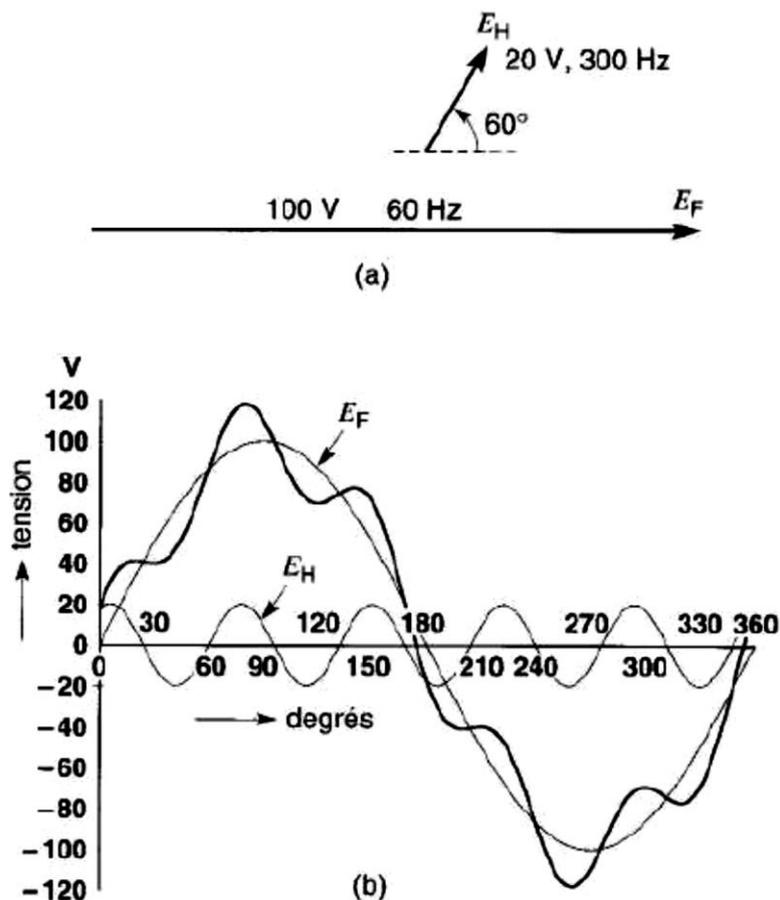
$$E = \sqrt{E^2_F + E^2_H}$$

où

$E$  = valeur efficace de la tension déformée

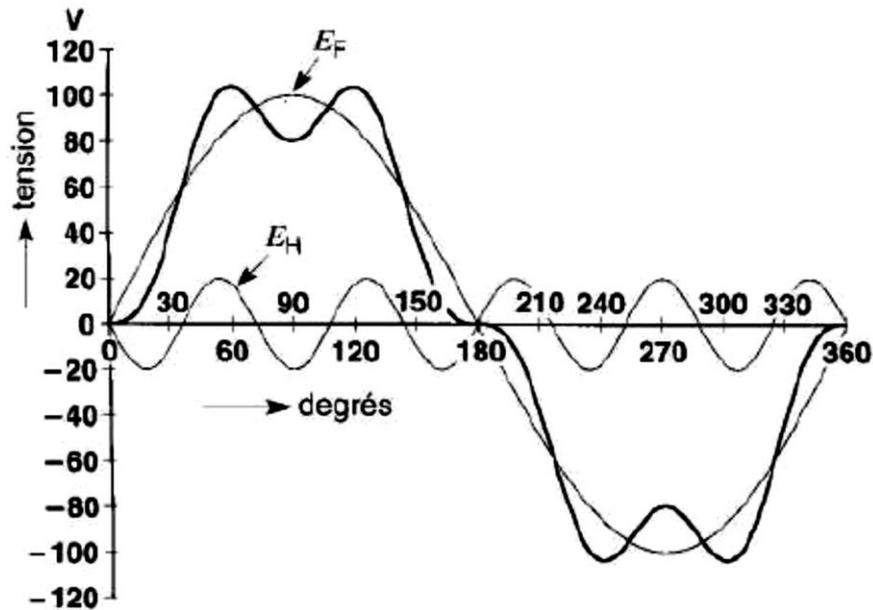
$E_F$  = valeur efficace de la fondamentale

$E_H$  = valeur efficace de l'ensemble des harmoniques.



**Figure II.3 :** a. Une onde distorsionnée peut être représentée par des vecteurs tournant à des vitesses différentes. Leur position angulaire initiale affecte aussi la forme d'onde.

b. Forme d'onde de la tension générée par les vecteurs.



**Figure II.4 :** Forme d'onde de la tension lorsque l'angle initial du 5<sup>e</sup> harmonique est de 180°. La valeur efficace  $E_H$  d'un ensemble d'harmoniques est donnée par la formule :

$$E_H = \sqrt{E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}$$

où  $E_2, E_3, E_4, \dots, E_n$  sont respectivement les valeurs efficaces du 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 4<sup>e</sup>, ... n<sup>ième</sup> harmonique .

À partir des formules précédentes, on obtient la formule :

$$E = \sqrt{E_F^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}$$

Des formules analogues s'appliquent à un courant distorsionné.

#### 4) Creux de tension et coupures brèves

##### 4.1) Définition, origine et conséquences

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

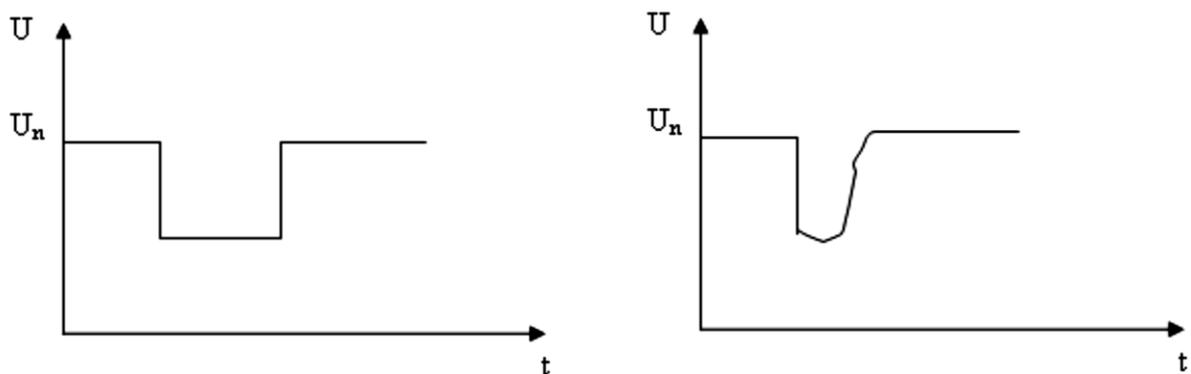
Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en

fonction de temps (voir figure). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale.

Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (voir figure). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.



**Figure II.5 :** Amplitude d'un creux de tension

a) provoquées par un court-circuit

b) provoquées par un démarrage brusque d'un moteur

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes.

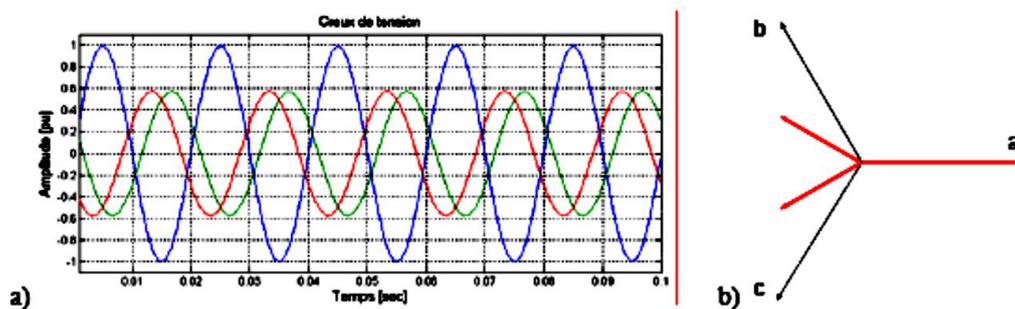
#### **4.2) Représentation dans le plan complexe**

Les creux de tension monophasés se caractérisent principalement par leur amplitude et leur phase. L'amplitude des creux de tension est liée à leur proximité par rapport au défaut, la nature du défaut et la puissance de court-circuit du réseau. La durée du creux de tension est

liée au temps d'élimination du court-circuit par les protections du réseau ou des installations raccordées.

En plus de la durée et de l'amplitude, les creux de tension triphasés se caractérisent par le déphasage entre les tensions de phase qui dépend de la nature et de l'endroit du défaut.

Les creux de tension triphasés sont souvent analysés dans le plan complexe, où les trois grandeurs sont représentées sous forme de vecteurs caractérisés par leur amplitude et leur phase, appelés également phaseurs. La relation entre les phaseurs dans le plan complexe est



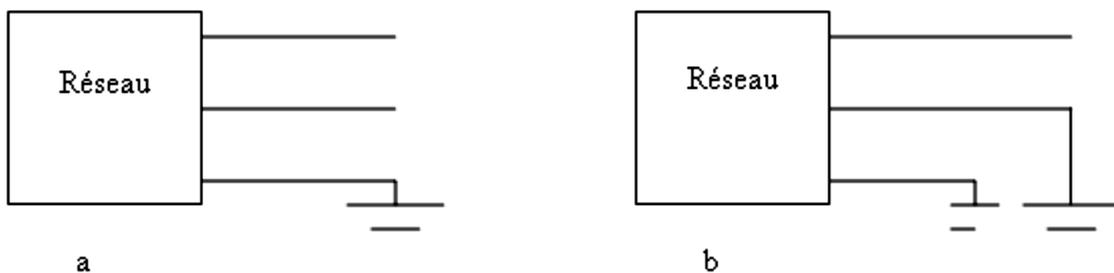
appelée signature où type du creux de tension. Par exemple, le creux de tension de figure se caractérise par la signature présentée en figure

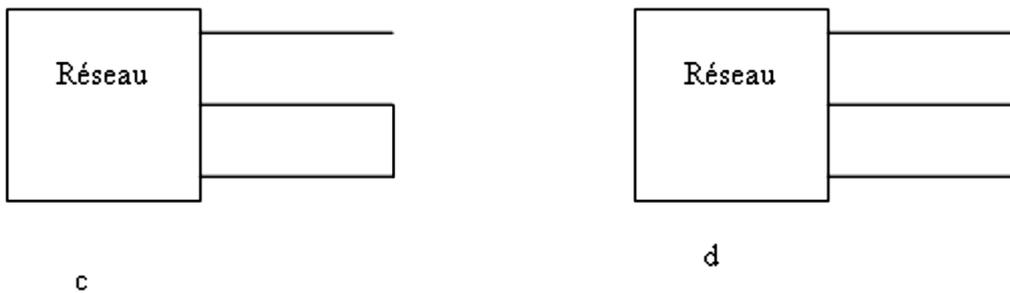
**Figure II.6 :** a) Creux de Tension, b) Représentation dans le plan complexe.

### 4.3) Paramètres déterminant les types de creux de tension

#### 4.3.1) Types de courts-circuits

Les courts-circuits sont la cause principale des creux de tension. Si nous ne tenons pas compte des courts-circuits entre phases et neutre, on distingue alors quatre types de courts-circuits : monophasés, biphasés entre phase et terre, biphasés entre deux phases et triphasés (voir figure)





**Figure II.7 :** Types de courts-circuits : a) monophasé, b) biphasé phase/terre, c) biphasé phase/phase, d) triphasé.

Les courts-circuits monophasés représentent 70% des courts-circuits et sont donc les plus fréquents. Ils se caractérisent par une chute de tension sur une des trois phases à l'endroit du court-circuit. En fonction du régime de neutre, les deux autres phases restent les mêmes ou se caractérisent par des surtensions avec déphasages.

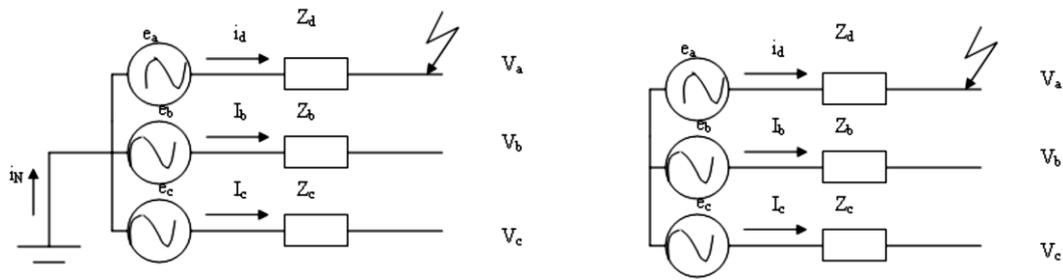
Les creux de tension biphasés entre deux phases viennent en seconde position puisqu'ils représentent 15% des courts-circuits. Ils se caractérisent par des chutes de tensions et déphasages pour deux des phases à l'endroit du défaut. La phase non affectée par le défaut reste la même qu'avant le défaut.

Les creux de tension biphasés entre phase et terre représentent 10% des courts-circuits. Ils sont à l'origine des chutes de tension sur deux phases à l'endroit du court-circuit avec ou sans déphasage supplémentaire. En fonction du régime de neutre, la phase saine peut rester la même ou se caractériser par une surtension.

Enfin, les creux de tension triphasés sont les creux de tension les plus sévères, mais ils ne sont pas très fréquents et ne représentent que 5% des courts-circuits. Ils se caractérisent par des chutes de tension de même amplitude sur les trois phases sans déphasages supplémentaires.

#### **4.3.2) Régime de neutre**

L'allure des creux de tension engendrés par les courts-circuits précédents dépend également du régime de neutre du réseau électrique. On distingue en effet deux régimes de neutre principaux : neutre isolé (ou fortement impédant) et neutre relié directement à la terre (ou par une faible impédance). Afin d'illustrer ce point, considérons l'exemple simple d'un court-circuit monophasé.



**Figure II.8 :** Régime de neutre : direct et isolé

#### 4.4) Type de mesures

On distingue deux principaux types de connexions des appareils de mesure : entre phase et neutre ou phase et terre (connexion en étoile), et entre phases (connexion en triangle). La connexion entre phases est en général utilisée dans des systèmes avec des charges connectées en triangle afin de mesurer les perturbations électriques telles qu'elles sont subies par ces charges.

Cependant, dans des systèmes avec des charges connectées en étoile et en triangle, les mesures de type phase - terre ou phase - neutre sont mieux adaptées. En effet, la connexion en étoile donne accès à plus d'informations que la connexion en triangle, comme par exemple le nombre des défauts et leur localisation. De plus, les tensions composées peuvent être déduites des tensions simples, alors que l'inverse n'est pas toujours possible.

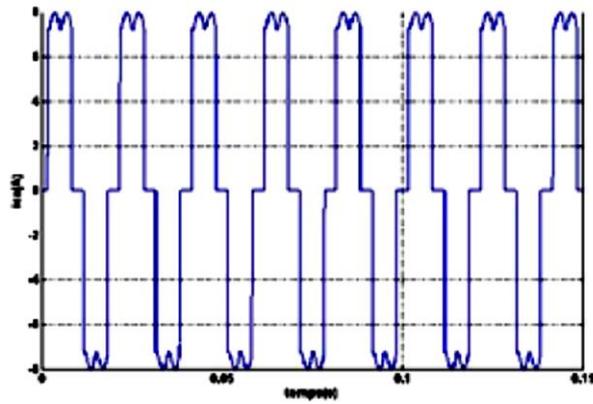
#### 5) Harmoniques et inter harmoniques

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de fréquence fondamentale.

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.

#### 5.1) Décomposition d'un signal périodique

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques. Les courbes de la figure II.9 nous montrent la décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.



Signal déformé

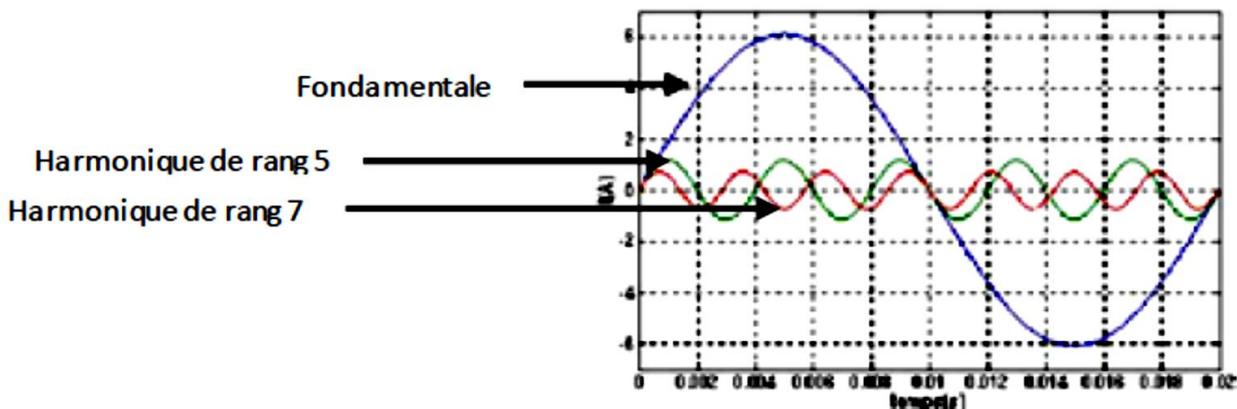


Figure II.9 : Décomposition d'un signal périodique

## 6) Origines des harmoniques

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

## 7) Grandeurs caractéristiques

### 7.1) Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental.

## 7.2) Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :  $n = f_n/f_1$

Par principe, le fondamental  $f_1$  a le rang un.

## 7.3) Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signal périodique de période  $T=1/f$ , peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de  $f$  ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

La valeur  $a_0$  représente la valeur moyenne de  $s(t)$ .

On calcule les coefficients  $a_n$  et  $b_n$  avec les formules suivantes :

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \int f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur  $a_0$  est nulle
- si la fonction est paire, les coefficients  $b_n$  sont nuls.
- si la fonction est impaire, les coefficients  $a_n$  sont nuls.
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

## 7.4) Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ( $y(t)$ ) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T Y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée ( $> 1$  kHz).

## 7.5) Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative.

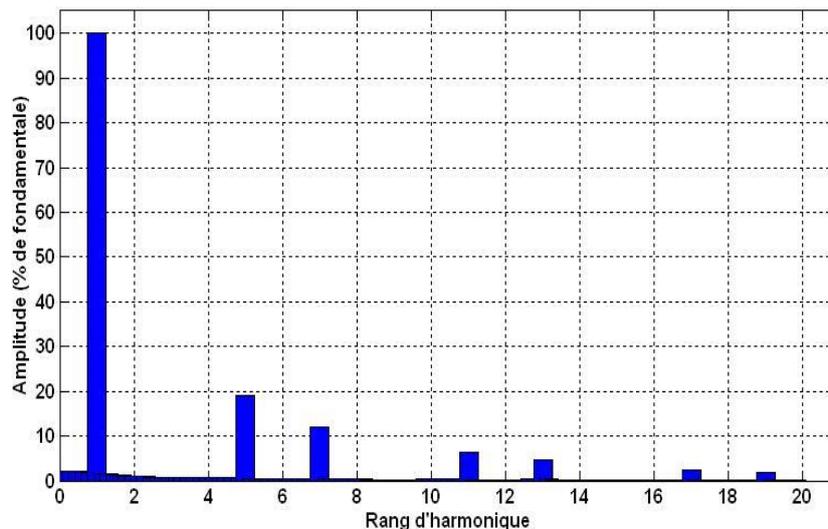
$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_i^2}}{Y_1} \cdot 100$$

$Y_1$  : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension)

$Y_n$  : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

## 7.6) Spectre d'harmonique (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure II.10).



**Figure II.10** : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.

## 7.7) Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires),
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non-linéaire si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques.

## 8) Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques, qui se propagent dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types :

- Les effets instantanés
- Les effets à terme

### 8.1) Effets instantanés

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- ❖ Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques: en présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils, dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électrique peuvent être affectés.
- ❖ Trouble fonctionnel des micro-ordinateurs: les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires, des moteurs d'entraînement de disque.
- ❖ Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électriques : certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecteur supplémentaires en présence des harmoniques.
- ❖ Vibrations et bruits: les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques.

### 8.2) Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet le plus important est de nature thermique, Il se traduit par un échauffement Il conduit à une fatigue prématurée du matériel des lignes et amènent à un déclassement des équipements :

- ❖ Echauffement des câbles et des équipements: ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être, le siège d'un suréchauffement du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteur .....etc).
- ❖ Echauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

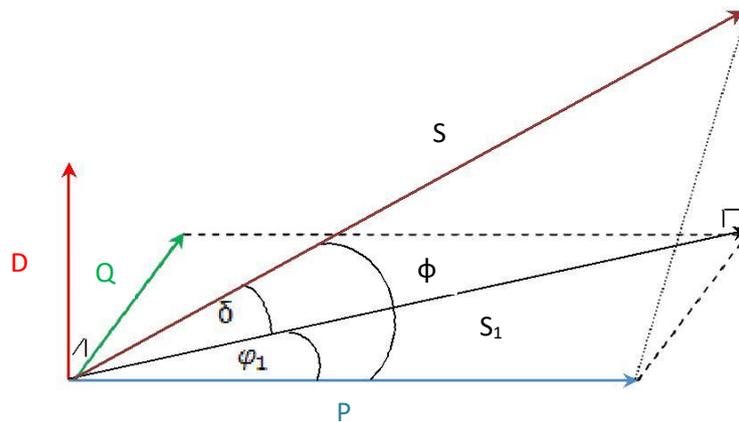
- ❖ Echauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs : Echauffements causés par les pertes dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

### 9) Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

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

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P, réactive Q et déformante D, cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que  $I=I_f+I_h$ .



**Figure II.11 :** Diagramme de Fresnel des puissances

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

Où Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

$$P = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)$$

Où :

$\varphi_1$  : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1)$$

$$D = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2}$$

Et

Finalement le facteur de puissance  $F_p$  est donné par l'expression :

$$F_p = \frac{P}{S} = F_{dis} \cdot \cos(\varphi_1) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Où  $F_{dis}$  représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît.

### 10) Problème de l'harmonique 3

Les dispositifs monophasés à électronique de puissance comme les ordinateurs, imprimantes, photocopieurs, téléviseurs, télécopieurs, alimentations sans interruption (ASI) et éclairages, sont les principales sources de courants harmoniques dans les conducteurs neutres. Ces courants harmoniques présents dans les câbles des bâtiments augmentent les pertes, réduisent la capacité des circuits et surchargent les condensateurs de compensation du facteur de puissance. Le problème est particulièrement important dans le conducteur neutre, où les courants harmoniques de rang 3 généralement ceux d'amplitude maximale dans les phases s'additionnent. Il est même possible que les courants harmoniques de rang 3 dans le conducteur neutre soient supérieurs au courant dans les conducteurs de phase.

Les problèmes liés aux courants harmoniques causés par les dispositifs électroniques monophasés sont les plus aigus dans les installations commerciales et dans l'industrie de l'électronique où sont concentrés un grand nombre d'équipements de ce type. Autre sujet de préoccupations : les réseaux électriques de nombreux immeubles anciens ne sont pas conçus pour supporter des environnements tout électroniques.

Un inconvénient spécifique à la plupart des dispositifs électroniques est la production de charges non linéaires par les alimentations à commutation des ordinateurs et autres équipements bureautiques, ainsi que les alimentations à pont redresseur et condensateur de lissage.

#### 10.1) Prédominance des courants harmoniques de rang 3

Dans les réseaux triphasés équilibrés, le courant de fréquence fondamentale ainsi que les harmoniques de rangs 5, 7, etc., s'annulent, alors que les courants harmoniques de rang 3 monophasés ont le même angle de phase et, par conséquent, s'additionnent dans le conducteur neutre. Comme les équipements électroniques monophasés tirent des courants harmoniques

élevés, un réseau peut connaître des problèmes importants même si la charge, en termes de puissance réelle, est relativement faible. Le courant harmonique de rang 3 peut ajouter jusqu'à 1A par kW pour les éclairages et 4A par kW pour les ordinateurs, selon l'impédance de boucle du réseau et la concentration de la charge. Les harmoniques qui, comble de l'ironie, sont engendrés par les sources qui en sont les principales victimes, entraînent l'échauffement, la détérioration et des pertes dans ces appareils. De plus, ils créent des champs électromagnétiques et dégradent la qualité du courant, provoquant le mauvais fonctionnement des appareils. Les courants neutres générés sont suffisamment élevés pour être à l'origine d'incendies. Une étude récente a mis en évidence des courants neutres atteignant 1250A, alors que les courants de phase équilibrés n'atteignaient que 1000A. L'échauffement dû aux courants harmoniques peut provoquer le déclenchement des disjoncteurs et la fusion des fusibles. Les disjoncteurs actionnés par les courants résiduels sont des dispositifs électromécaniques où les composantes de plus haute fréquence peuvent être totalisées de manière incorrecte, provoquant le déclenchement intempestif des disjoncteurs. Avec les courants harmoniques, le courant qui circule dans le circuit est plus élevé que prévu. Et si les systèmes de mesure sont trop simples, il y aura éventuellement une totalisation erronée des composantes de plus haute fréquence.

### **10.2) Problèmes causés par les harmoniques de rang 3**

Courants au sein de l'installation ; Surcharge des neutres ; Echauffement des transformateurs ; Déclenchement intempestif des disjoncteurs ; Surcharge des condensateurs de compensation du facteur de puissance ; Effet de peau ; Echauffement des moteurs asynchrones ; Courants dans le point de couplage commun ; Champs magnétiques ; Scintillement des écrans.

#### **11) Exemple**

La Figure montre une source de tension  $E$  distorsionnée, composée d'une tension fondamentale de 100 V, 60 Hz et d'un 5e harmonique de 51 V, 300 Hz. La source alimente une résistance de  $24\Omega$  en série avec une inductance de 18,6 mH. A 60 Hz, cette dernière a une réactance de :

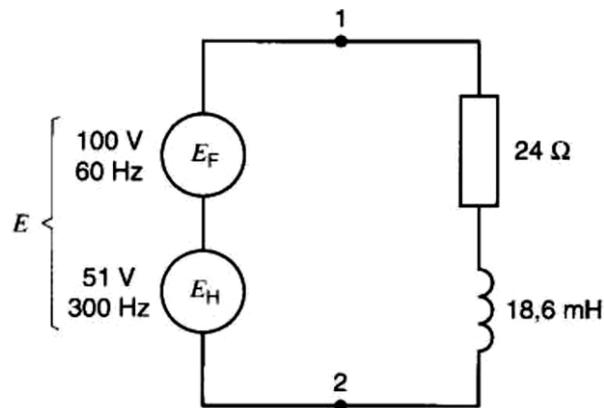
$$X_{60} = 2\pi fL = 2\pi \times 60 \times 0.0186 = 7\Omega$$

Cependant, à 300 Hz, l'inductance présente une réactance qui est 5 fois plus grande, soit :

$$X_{300} = 5 \times 7\Omega = 35\Omega$$

Comme la fondamentale et le 5e harmonique agissent indépendamment l'un de l'autre, on peut tracer deux circuits séparés pour calculer les courants et les puissances respectifs (Figure)

Noter que la source de tension ignorée est simplement remplacée par un court-circuit. Pour les calculs à 60 Hz, la source (le 300 Hz est donc remplacée par un court-circuit).



**Figure :** Source de tension distorsionnée alimentant un circuit RL.

Dans la Fig . 41-6, l'impédance du circuit à 60 Hz est:

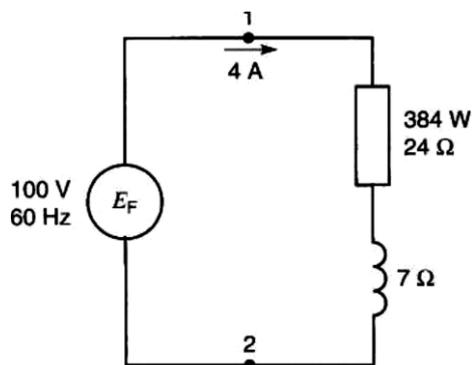
$$Z_{60} = \sqrt{24^2 + 7^2} = 25\Omega$$

Le courant fondamental est donc :

$$I = E_{60} / Z_{60} = 100/25 = 4A$$

Puissance active dissipée dans la résistance :

$$P_{60} = RI_{60}^2 = 24 \times 4^2 = 384W.$$



**Figure :** Impédances et courant pour la composante fondamentale.

Puissance réactive absorbée par la réactance :

$$Q_{60} = X_{60} \times I_{60}^2 = 7 \times 4^2 = 112VAR.$$

Puissance apparente :

$$S_{60} = E_{60} \times I_{60} = 100 \times 4 = 400 VA.$$

Facteur de puissance :

$$FP_{60} = P_{60} / S_{60} = 384 / 400 = 0.96 \text{ ou } 96\%$$

Le courant fondamental est déphasé en arrière de la tension fondamentale d'un angle :

$$\theta_{60} = \arccos 0,96 = 16,3^\circ.$$

Analysons maintenant la Fig . 41-7 concernant le 5<sup>e</sup> harmonique. En procédant de la même manière, mais avec la source de 60 Hz en court-circuit, on trouve les résultats suivants :

Impédance du circuit à 300 Hz :

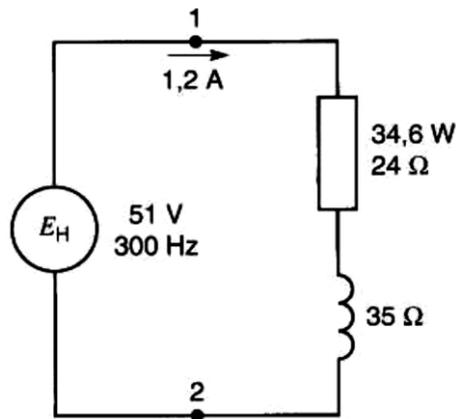
$$Z_{300} = \sqrt{24^2 + 35^2} = 42.4 \Omega.$$

Courant harmonique :

$$I_{300} = E_{300} / Z_{300} = 51 / 42.4 = 1.2 \text{ A.}$$

Puissance active harmonique dissipée dans la résistance :

$$P_{300} = RI_{300}^2 = 24 \times 1.2^2 = 34.6 \text{ W.}$$



**Figure :** Impédances et courant pour la composante 5e harmonique.

Le courant harmonique est déphasé en arrière de la tension harmonique d'un angle :

$$\theta_{300} = \text{atan} (X_{300} / R) = \text{atan} (35 / 24) = 55.6^\circ.$$

Nous pouvons maintenant combiner les tensions et courants à la fondamentale et au 5e harmonique, comme suit :

Courant efficace circulant dans le montage :

$$I = \sqrt{4^2 + 1.2^2} = 4.18 \text{ A.}$$

Tension à 60 Hz aux bornes de la résistance :

$$E_{R60} = R I_{60} = 24 \times 4 = 96 \text{ V.}$$

Tension à 300 Hz aux bornes de la résistance :

$$E_{R300} = R I_{300} = 24 \times 1.2 = 28.8 \text{ V.}$$

Tension efficace aux bornes de la résistance :

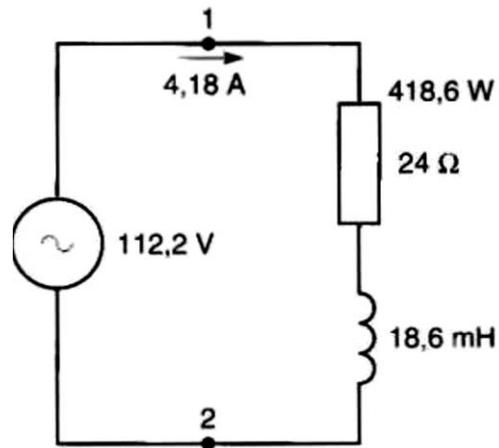
$$E_R = \sqrt{E_{R60}^2 + E_{R300}^2} = \sqrt{96^2 + 28.8^2} = 100.2 \text{ V.}$$

Tension efficace E de la source :

$$E = \sqrt{E_{60}^2 + E_{300}^2} = \sqrt{100^2 + 51^2} = 112.2 \text{ V.}$$

Le courant de 4,18 A et la tension de 112,2 V (Fig . 41-8) sont les valeurs qui seraient mesurées par des instruments indiquant la valeur efficace. La puissance totale dissipée dans la résistance est :

$$P_{\text{totale}} = P_{60} + P_{300} = 384 + 34.6 = 418.6 \text{ W.}$$



**Figure :** Tension et courant efficaces dus aux composantes fondamentale et harmonique.

Cette puissance est aussi la puissance active totale fournie par la source. C'est la puissance qu'indiquerait un wattmètre s'il était branché dans le circuit.

## **Partie III : Normes en vigueur : Normes IEC et IEEE concernant l'émission des harmoniques en basse et moyenne tension**

### **1) Normalisation de la QEE**

Les normes, d'après la définition de l'ISO, sont « des accords documentés contenant des spécifications techniques ou autres critères précis destinés à être utilisés systématiquement en tant que règles, lignes directrices ou définitions de caractéristiques pour s'assurer que des matériaux, produits, processus et services sont aptes à l'emploi ». En ce qui concerne la qualité de l'énergie, les normes ont un double objectif :

- ❖ Etablir la définition des caractéristiques nominales de la fourniture, c'est-à-dire les valeurs nominales comme les déviations admissibles de la tension et de la fréquence.
- ❖ Définir les perturbations qui peuvent agir sur le réseau (par exemple le seuil qui sépare un creux de tension d'une interruption etc.), comme la quantité ou l'intensité maximum de perturbations pouvant avoir lieu dans un réseau particulier.

Les normes de manière générale donnent une définition assez précise des caractéristiques de la fourniture (tension et fréquences nominales, déviations admissibles etc.), mais les limites des perturbations restent assez floues. D'ailleurs, les différents organismes de normalisation n'ont pas toujours la même vision sur la notion de qualité.

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont :

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) : est un organisme officiel composé de comités nationaux de 63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle avec plus de 377.000 membres appartenant à 150 pays, partagée en différentes régions et sections. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

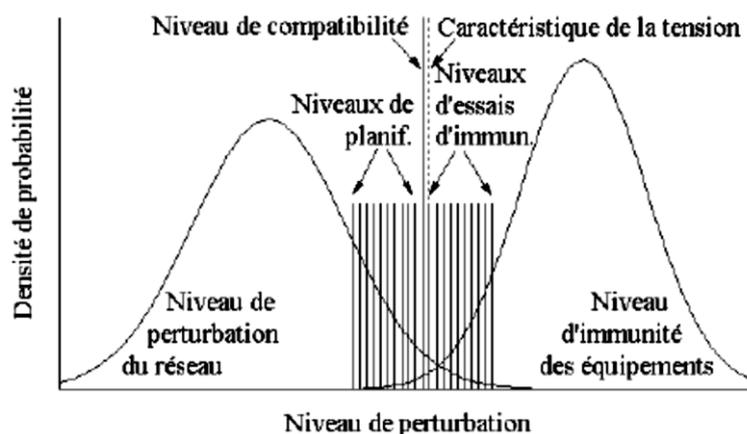
L'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) est un organisme qui a deux sociétés travaillant dans des domaines liés à la qualité de l'énergie : IAS (Industrial Applications Society) et PES (Power Engineering Society). Leurs activités de normalisation sont gérées par le comité SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Les deux normes de qualité principales de l'IEEE sont :

IEEE 519: 1992, (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems) Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le

réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau.

IEEE 1159: 1995, (IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality) : Cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude.

Néanmoins, la CEI (tout comme l'organisme de normalisation européen CENELEC) n'utilise le terme de qualité de l'énergie dans aucune de ces normes. En revanche, elle utilise le concept de « Compatibilité Electromagnétique ». Ce concept est défini comme « la capacité d'un dispositif, équipement ou système à fonctionner de façon satisfaisante dans son environnement électromagnétique sans introduire de perturbations électromagnétiques intolérables pour les autres ». Par environnement électromagnétique d'un dispositif, on entend le niveau de perturbation auquel il est soumis, en tenant compte des perturbations rayonnées et conduites indépendamment de l'origine. A partir de l'environnement électromagnétique d'un dispositif, on peut définir les caractéristiques d'immunité (niveau minimum de perturbations électromagnétiques que doit supporter l'équipement) et d'émission (niveau maximum de perturbations qui peut être produit par l'équipement). Finalement, le niveau de compatibilité peut être introduit : il s'agit d'un niveau de référence qui se trouve entre les limites d'émission et d'immunité et qui permet le fonctionnement correct des dispositifs durant la plupart du temps.



**Figure III.1** : Illustration des concepts de base de la normalisation en matière de qualité de l'électricité, à l'aide de statistiques temps/lieu concernant le système entier.

Les normes d'EMC de la CEI sont regroupées dans la publication CEI-61000. Cette publication est divisée en 6 parties :

Partie 1. Généralités. Considération générales, définitions, terminologie etc.

Partie 2. Description et classification de l'environnement et des niveaux de compatibilité.

Partie 3. Limites d'émission et d'immunité.

Partie 4. Techniques d'essai et de mesure.

Partie 5. Guide d'installation et d'atténuation des perturbations.

Partie 6. Normes génériques.

La plupart de normes de cette publication sont consacrées aux limites d'émission et à la susceptibilité des appareils dans des conditions environnementales données. Comme on peut le constater, les deux termes qualité et CEM expriment des concepts différents, car le domaine d'étude de la CEM est plus vaste que celui de la qualité de l'énergie et comprend également plus de phénomènes (comme par exemple les perturbations rayonnées). Cependant, on pourrait considérer la qualité de l'énergie comme une partie de la CEM, car la qualité de l'énergie peut être considérée comme « l'environnement électromagnétique pour les perturbations venant du réseau électrique ou transmise à travers ce dernier ».

A part, les normes CEI et IEEE, il existe une autre norme de qualité qui mérite une attention spéciale : la norme européenne EN 50160 du CENELEC. Le traitement par cet organisme des aspects liés à la qualité est très similaire à celui de la CEI, c'est-à-dire à travers des normes de CEM. Cependant, la norme EN 50160 n'est pas incluse dans le catalogue des normes CEM et se rapproche plus du type IEEE.

Cette norme définit les caractéristiques de la tension (B.T. et M.T.) sur les réseaux de distribution publics. La norme présente les niveaux maximum et minimum des valeurs et variations qui peuvent être attendues dans les réseaux en conditions normales, et la façon de les mesurer (en faisant une moyenne hebdomadaire des valeurs prises toutes les 10 minutes).

Les caractéristiques limites sont fixées pour 95% du temps, tandis que pour le reste du temps, il n'y a aucune limite. Cette norme est seulement valable en conditions normales ; elle présente également une liste des situations pour lesquelles elle ne doit pas être appliquée (après court-circuit, opérations etc.).

## **2) Normes concernant les perturbations harmoniques**

Les normes CEI établissent des limites pour les émissions de courants harmoniques (IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 et 61000-3-6) et en même temps établissent le niveau de compatibilité (IEC 61000-2-4 et 61000-2-2) qui détermine le taux de distorsion harmonique de la tension de référence sur le réseau.

Harmoniques	Impairs	Harmoniques	pairs
Ordre	Courant(A)	Ordre	Courant(A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4		
11	0,33		
13	0,21		
15<h<39	0,5*15/h		

**Tableau III.1 :** Limites CEI 1000-2-4 des émissions de courants harmoniques.

Harmoniques impairs						Harmoniques pairs		
Non multiples de 3			multiples de 3					
ordre	a)	b)	ordre	a)	b)	ordre	a)	b)
5	2%	6%	3	2%	5%	2%	1,50%	2%
7	2%	5%	9	1%	1,50%	4%	1%	1%
11	1,50%	3,50%	15	0,30%	0,30%	6,00%	0,50%	0,50%
13	2%	3%	21	0,20%	0,20%	8	0,20%	0,50%
17	1%	2%	>21	0,20%	0,20%	10	0,20%	0,50%
19	1,00%	1,50%				12	0,20%	0,20%
23	0,70%	1,50%				>12	0,20%	0,20%
25	0,70%	1,50%						
>25	0,2+(12,5/h)	0,2+(1,3x25/h)						

**a) 100KV ≥ V > 30KV (avec un THD<3%), b) 30KV ≥ V > 1KV (avec un THD<8%).**

**Tableau III.2 :** Limites CEI 100-3-2 pour la distorsion harmonique de la tension.

La norme EN 50160 étant une description des caractéristiques de la tension réseau, elle ne détermine que les valeurs limites des harmoniques de tension. Ces limites sont pratiquement identiques à celles fixées par la CEI.

En ce qui concerne l'IEEE, la norme IEEE 519: 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems, détermine les procédures pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de pollution admissible de la part des clients et de distorsion harmonique globale dans le réseau.

$V_n \leq 69KV$						
$I_{cc} / I_{ch}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	<b>TDD</b>
<20	4	2	1,5	0,6	0	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12		5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20
$69KV < V_n \leq 161KV$						
<20	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
50-100	5	2,25	2	1,25	0,35	6
100-1000	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
$V_n > 161KV$						
<50	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
$50 \geq$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4

**Tableau III.3 :** Limites IEEE des émissions de courants harmoniques.

Tension au point de Raccordement ( $V_n$ )	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD ( $V_n$ )(%)
$V_n \leq 69KV$	3.0	5.0
$69KV < V_n \leq 161KV$	1.5	2.5
$V_n > 161KV$	1.0	1.5

**Tableau III.4 :** Limite IEEE pour distorsion harmonique de la tension.

$$\text{THDV}_n = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}} \times 100\%$$

### 3) Normes concernant les perturbations sur la valeur efficace de la tension

Le traitement des creux de tension est différent de celui des harmoniques. Les normes ne fournissent pas de tableau qui contient les valeurs limites (durée et profondeur) des différentes perturbations. Ces normes sont réalisées d'un double point de vue, d'une part on définit exhaustivement tous les phénomènes électromagnétiques qui peuvent agir sur la tension réseau en précisant les techniques de monitoring et de mesure, et d'autre part on établit les caractéristiques nominales de la tension (ainsi que les déviations admissibles et déviations typiques).

En ce qui concerne l'IEEE, c'est la norme IEEE 1159 : 1995 (IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality) qui classe et définit ce type de perturbations en fonction du contenu spectral, de la durée et de l'amplitude de la perturbation.

		Durée	Magnitude de Tension
<b>Variations de courte durée</b>			
Instantanée	Creux	0,5-30Cycles	0,1-0,9pu
	Surtension	0,5-30Cycles	1,1-1,8pu
Momentané	Coupure	0,5cycles-3s	<0,1pu
	Creux	30cycles-3s	0,1-0,9pu
	Surtension	30cycles-3s	1,1-1,8pu
Temporaire	Coupure	3s-1min	<0,1pu
	Creux	3s-1min	0,1-0,9pu
	Surtension	3s-1min	1,1-1,8pu
<b>Variations de longues durée</b>			
	Coupure longue	>1min	0,0pu
	Surtension	>1min	0,8-0,9pu
	Sous-Tension	>1min	1,1-1,2pu

**Tableau III.5 :** Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.

En ce qui concerne les caractéristiques de la tension réseau, le meilleur exemple est fourni par la norme EN 50160. Cette norme définit les valeurs nominales des grandeurs réseau (tension et fréquence), mais aussi les déviations admissibles et la façon de les mesurer.

Dans sa partie finale, la norme présente quelques chiffres indicatifs de l'incidence des perturbations sur le réseau et aussi de leur intensité. Il ne s'agit pas de limites, mais plutôt de quelques conclusions extraites de campagnes de mesure. Ainsi pour le cas de creux de tension, la norme signale que la quantité annuelle peut varier entre quelques dizaines et un millier, dont la plupart ont une durée inférieure à une seconde et une profondeur maximum de 60%. Dans le cas de coupures brèves, la quantité peut osciller entre quelques dizaines et quelques centaines, et la durée de 70% de ces types de perturbations est inférieure à la seconde

	B.T.	M.T.
Fréquence	49.5-50.5 Hz (99.5% de l'année) Ou 47-52 Hz (toute l'année)	49.5-50.5 Hz (99.5% de l'année) Ou 47-52 Hz (toute l'année)
Amplitude	$V_n \pm 10\%$ (95% de la semaine)	$V_n \pm 10\%$ (95% de la semaine)
Fluctuations	Entre +5% et +10% quelques fois/jour Flicker : $Plt \leq 1$ (95% de la semaine)	Entre +4% et +6% quelques fois/jour Flicker : $Plt \leq 1$ (95% de la semaine)
Déséquilibres	$V - \leq 2\%$ (95% de la semaine) 3% dans quelques zones	$V - \leq 2\%$ (95% de la semaine) 3% dans quelques Zones

**Tableau III.6 :** Valeurs nominales d'après la norme EN50160.

Pour la CEI, les perturbations électromagnétiques sont classifiées dans la norme CEI 61000-2-5 et les creux et coupures sont définis et présentés dans les normes CEI 61000-2-1 et CEI

61000-2-1. Cependant, la norme la plus importante concernant les creux de tension et les coupures brèves de la CEI est la norme CEI 61000-2-8, dont la publication était attendue pour la fin de l'année 2002. La version provisoire disponible est l'un des rapports officiels les plus importants sur le sujet. Elle présente une étude exhaustive des origines, des effets, des solutions et des techniques de mesure de ce type de phénomènes. Y figurent également des études statistiques réalisées sur la base de campagnes de mesures effectuées par l'UNIPED (à la fin des années 80 dans 9 pays européens ), par l'EPRI (entre 1993 et 1995 aux Etats Unis) et par quelques pays individuels. Les normes ne contiennent pas de limites relatives aux creux de tension et coupures brèves, mais il existe des courbes empiriques appelées d'acceptabilité de l'énergie électrique qui représente la durée et la profondeur des creux admissibles pour des types de charges donnés. La courbe la plus connue est la courbe CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturers Association). Cette courbe a été en principe créée comme référence d'acceptabilité pour les équipements informatiques, mais aujourd'hui elle est utilisée comme référence pour la plupart des systèmes qui contiennent une source commutée comme interface de connexion au réseau.

#### **4) Normes pour FLICKER**

L'EN 50160 que la CEI 61000-3-7 font usage du flickermètre international (défini dans la publication CEI 61000-4-15), qui fournit un indice de sévérité à court terme Pst, pour les périodes successives de 10 min, et un indice de sévérité à long terme Plt, pour les périodes successives de 2 h. Cependant, les indices de qualité sont différents :

EN 50160 : pour toute période d'une semaine, le percentile Plt95% est l'indice de qualité à comparer à la Caractéristique de la Tension.

CEI 61000-3-7 : pour toute période d'une semaine minimum, les percentiles Pst99% et Plt99% sont les indices de qualité à comparer à leurs Niveaux de Planification respectifs.

## Partie IV : Solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie

### 1) Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

#### 1.1) Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques.

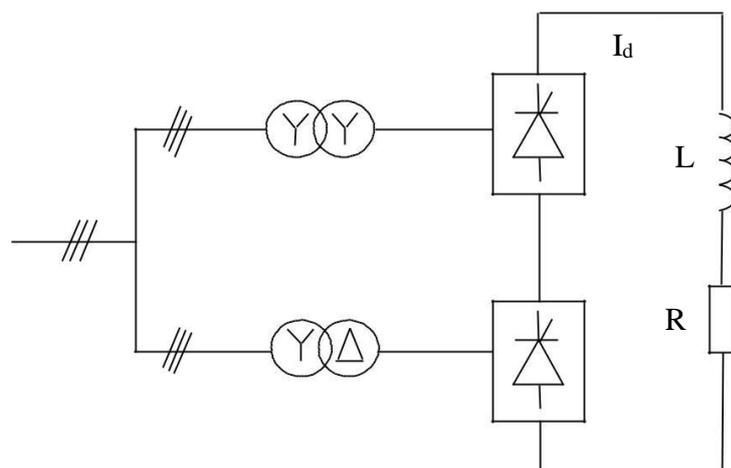
#### 1.2) Pont dodécaphasé

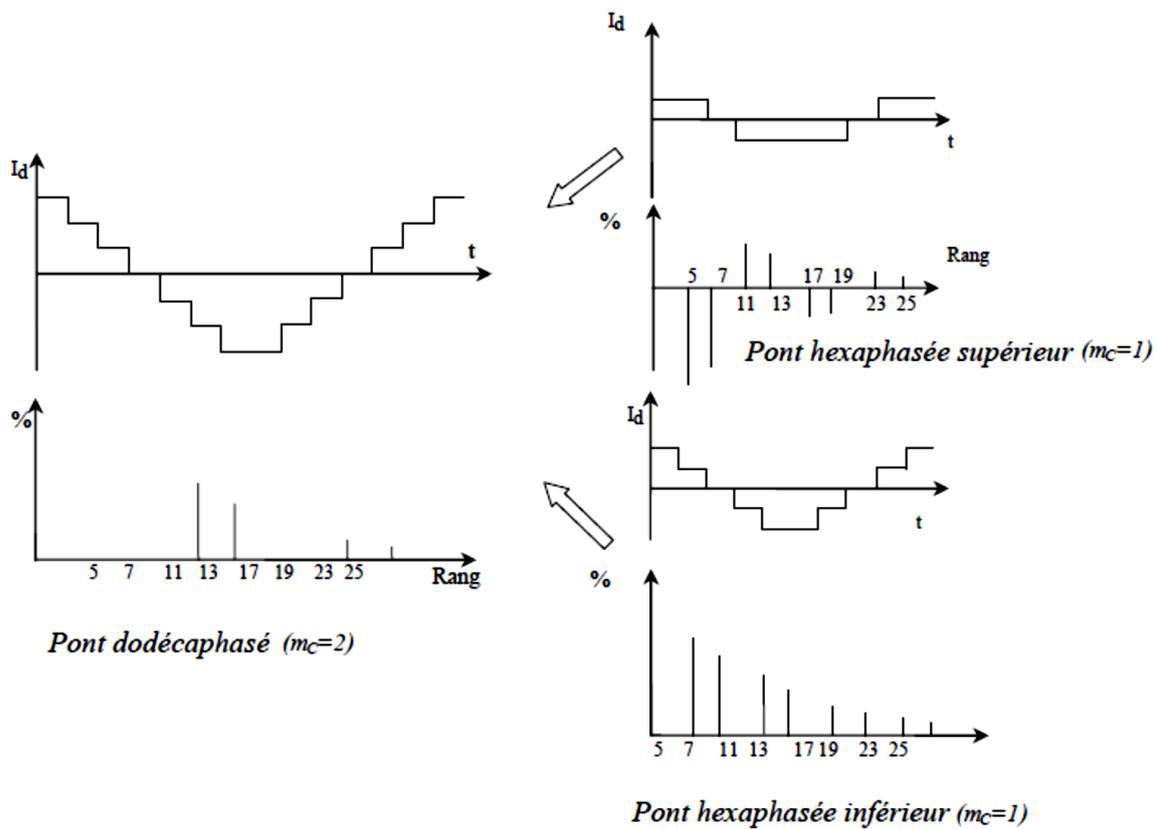
La structure dodécaphasé présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.

Un convertisseur composé de ( $m_c$ ) convertisseur triphasé élémentaire à indice de pulsation  $p$ , sera à indice de pulsation  $n$  tel que  $n = m_c \cdot p$ , si les convertisseurs élémentaires sont alimentés par des tensions dont les déphasages sont en progression arithmétique de  $\frac{2\pi}{m_c p}$ .

La figure illustre un exemple pour  $p = 6$  (pont de graëtz) et  $m_c = 2$ , soit un convertisseur à indice de pulsation égale à 12. Ce convertisseur appelé dodécaphasé, est le plus utilisé (cas des puissances importantes) dans la mesure où le déphasage de  $\pi/6$  est facilement obtenu par un couplage étoile-triangle et étoile-étoile d'un transformateur à double enroulement au secondaire.

**Figure IV.1 :** structure du pont dodécaphasé





**Figure IV.2 :** Forme des courants et rang des harmoniques

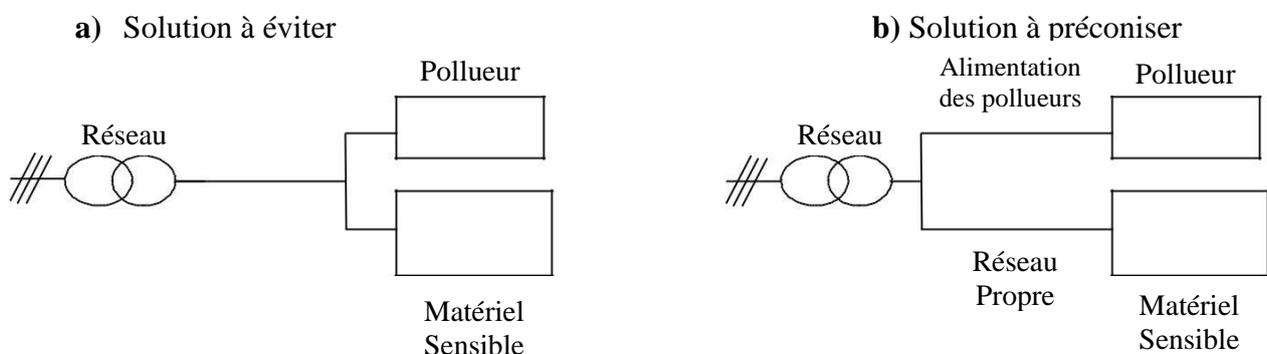
Cette solution provoque un encombrement lors de la commande ce qui limite son utilisation.

### 1.3) Surdimensionnement des installations électriques

Cette stratégie consiste à surdimensionner les équipements du réseau de telle sorte à supporter les surtensions produites par les harmoniques.

### 1.4) Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur (figure). Une alimentation par câble distinct est préférable.



**Figure IV.3 :** Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

## 1.5) Utilisation une inductance (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

## 1.6) Filtres passifs d'harmoniques

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges.

Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie.

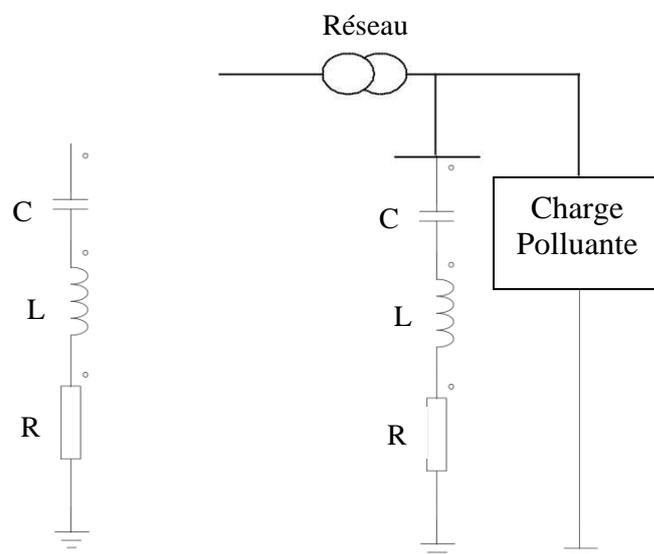
Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs :

- ❖ Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.
- ❖ Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- ❖ La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.
- ❖ Equipements volumineux.

## 1.7) Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur.

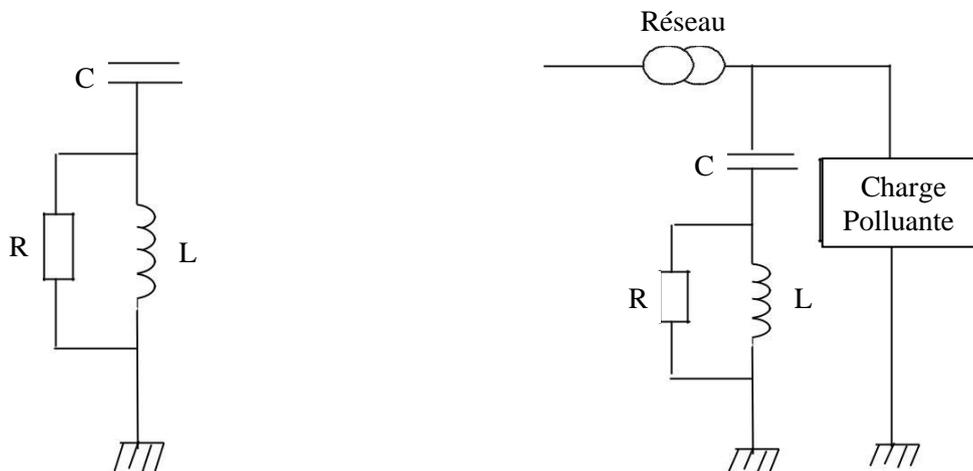
**Figure IV.4 :** Structure du filtre résonant



Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtre, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmonique d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11<sup>ème</sup>.

### 1.8) Filtre amorti

La figure montre le montage de ce type de filtre, ainsi que son impédance en fonction de la fréquence. En plus de difficulté de dimensionnement des filtres et à coût globale donné, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de  $h=13$ ).



**Figure IV.5 :** Structure du filtre amorti

### 1.9) Filtres d'harmoniques de rang 3 –la solution économique

Le filtre d'harmoniques de rang 3 est un filtre résonant parallèle ayant une impédance élevée pour le courant harmonique de rang 3 et une impédance très faible pour la fréquence fondamentale. Celle-ci est tellement faible qu'en insérant ce filtre sur le conducteur neutre, on n'augmente que très légèrement l'impédance de boucle du réseau et le temps de fonctionnement des dispositifs de protection contre les courts-circuits. Le raccordement du filtre d'harmoniques de rang 3 en série dans le conducteur neutre a été breveté par ABB Control en Finlande. Le conducteur neutre constitue l'emplacement logique et idéal pour le montage du filtre d'harmoniques de rang 3 car c'est précisément là que les courants harmoniques de rang 3 des phases s'additionnent. Solution passive, son niveau de bruit est très faible et, étant un filtre de type à blocage plutôt que de type à impédance nulle, il n'a aucun effet néfaste sur les signaux logiques et ne provoque aucune instabilité ni résonance dans le

réseau. Une bobine d'amortissement intégrée confère aux éléments du filtre une bonne tenue aux pointes de tension. Le filtre est monté sur le conducteur neutre ou sur le point étoile du transformateur à côté du tableau de distribution du réseau en schéma TN-S. Il est pourvu d'une protection contre les courants de déséquilibre à la fréquence fondamentale de 50 Hz et contre les surintensités à 150 Hz.

### **1.9.1) Economies d'énergie**

En atténuant l'harmonique de rang 3, non seulement on prolonge la durée de vie des composants du réseau, mais on diminue aussi les pertes en réduisant la composante de puissance. Le filtre d'harmoniques de rang 3 lui-même consomme très peu de puissance (les pertes par unité sont de 40 W).

En plus de limiter les risques d'incendie liés à la surcharge des conducteurs, les utilisateurs y gagnent grâce à la réduction des pertes dans les câbles des immeubles causées par les courants harmoniques élevés. Dans des cas établis de concentration de charges harmoniques de rang 3, des économies d'énergie entre 4 et 5% ont été mesurées, permettant un retour sur investissement du filtre entre 3 et 10 ans, selon les caractéristiques électriques et la charge réelle des réseaux.

## **2) Solutions modernes de dépollution**

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur.

### **2.1) Filtrage actif**

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO (Gate Turn Off) et les transistors IGBT

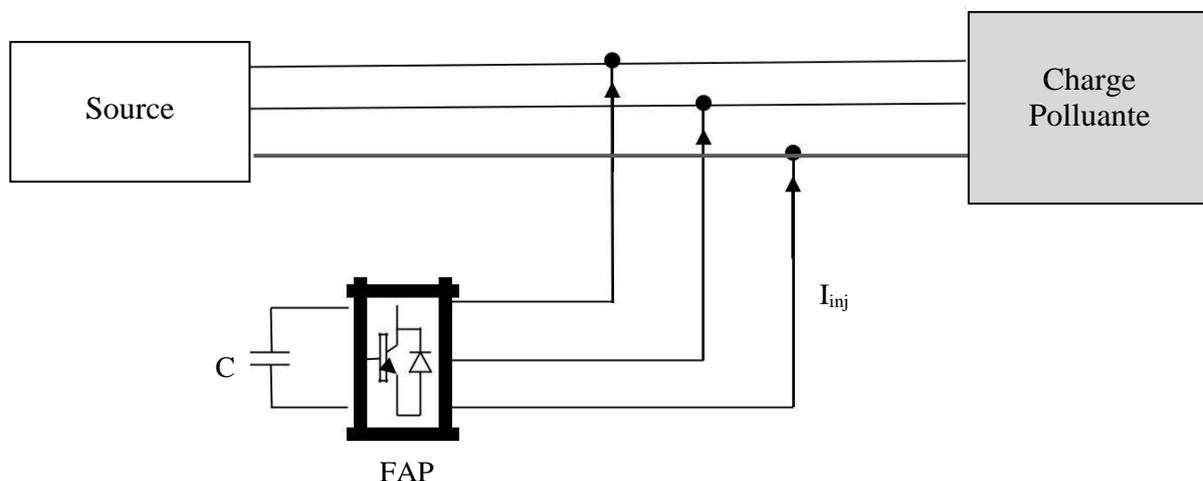
(transistor bipolaire à grille isolée) qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

Nous citerons configurations possibles des filtres actifs

- ❖ Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive;
- ❖ Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension;
- ❖ La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

### 2.1.1) Filtre actif parallèle

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure. Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques  $I_{inj}$  égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau  $I_s$  soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.



**Figure IV.6 :** Montage d'un filtre actif parallèle.

### 2.1.2) Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau le montré la figure. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

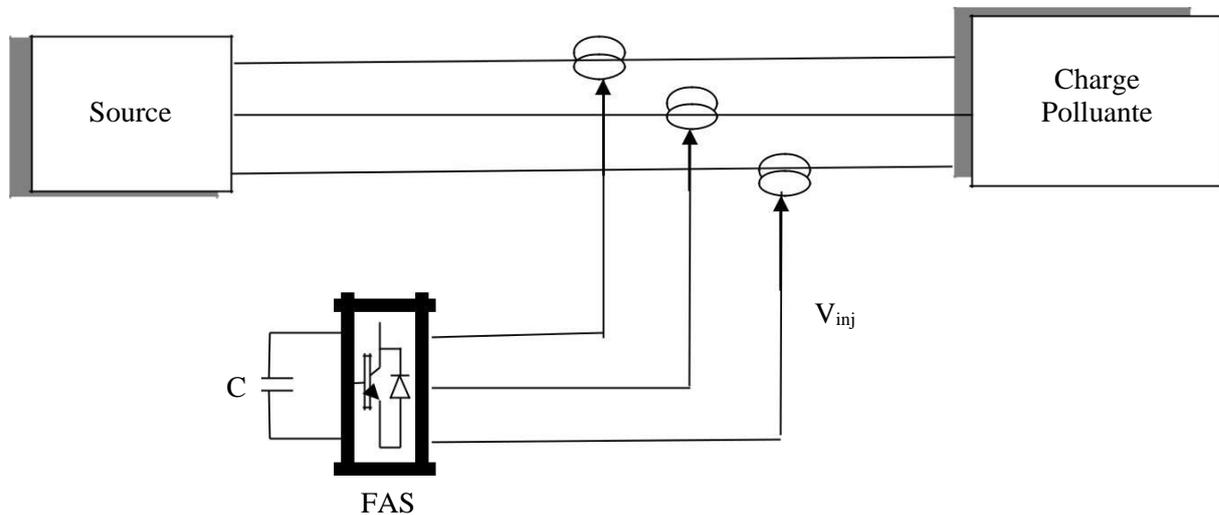
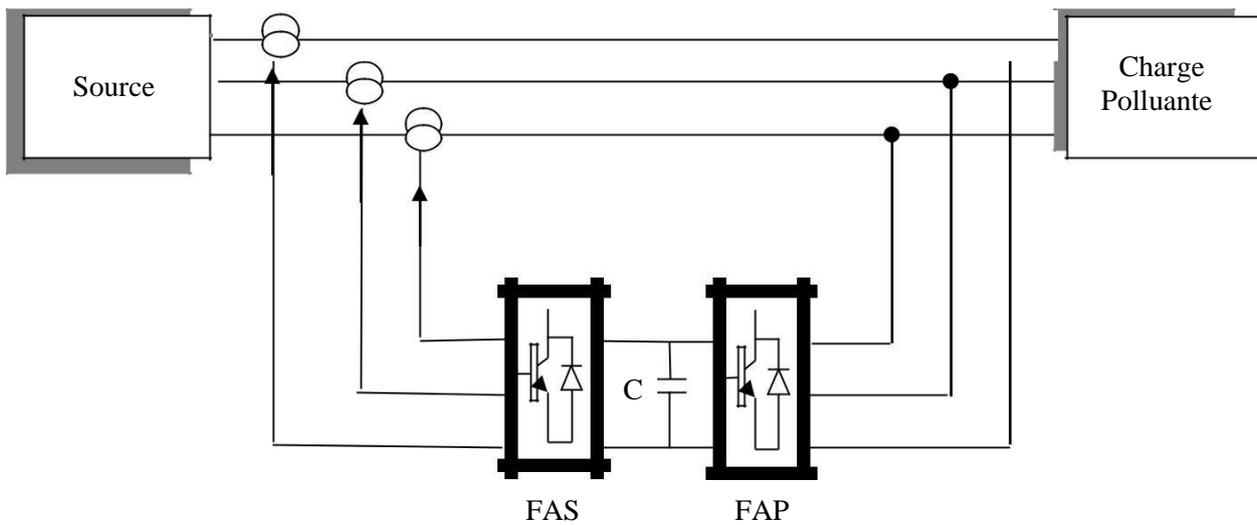


Figure IV.7 : Montage d'un filtre actif série

### 2.1.3) Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure. Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*. Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci-dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.



**Figure IV.8 :** Combinaison parallèle –série actif (UPQC )

### 2.1.4) Filtrage hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant:

- *Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.*
- *Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.*
- *Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.*

## 2.2) Les redresseurs MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives.

On distingue deux structures, la structure courant et la structure tension. Elles sont développées dans les paragraphes ci-après.

### 2.2.1) Redresseur de tension

Son schéma de principe est présenté sur la figure. Les composants de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant  $I_d$  le sera également. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée  $U_d$ . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension.

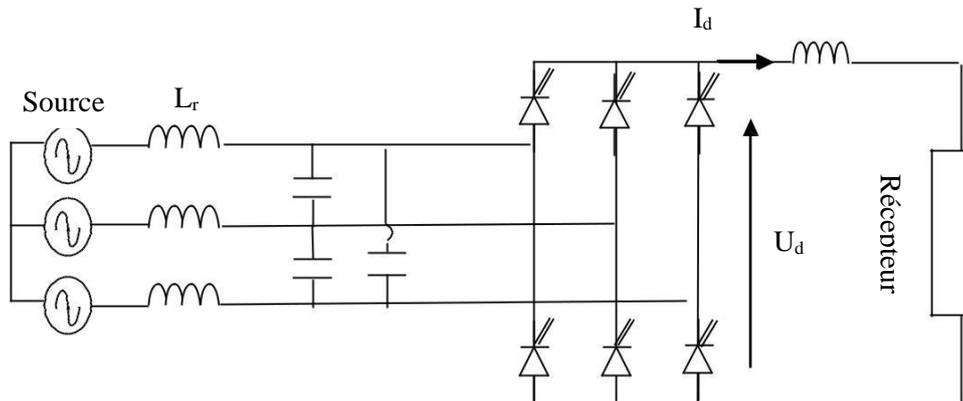


Figure IV.9 : Redresseur de tension

### 2.2.2) Redresseur de courant

La tension  $U_d$  étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant  $I_d$ , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau.

Les inductances  $L_r$  servent dans la figure à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension.

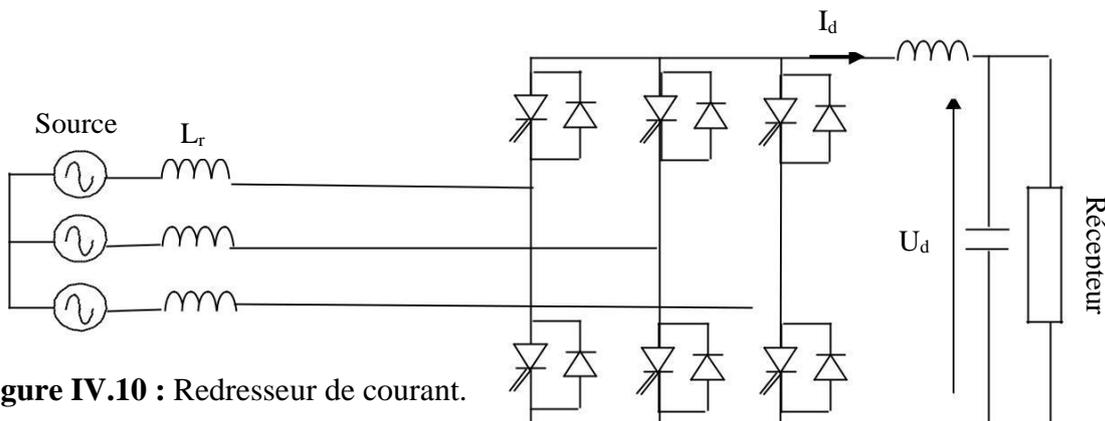


Figure IV.10 : Redresseur de courant.

### 3) Exemple

L'utilisation du convertisseur alimentant le moteur asynchrone peut avoir des conséquences néfastes sur le réseau d'alimentation électrique, notamment en termes de pollution

harmonique. On s'intéresse donc maintenant aux grandeurs d'entrée du variateur afin d'évaluer le degré de pollution occasionné.

Mise en garde : Le variateur de vitesse est alimenté par le réseau triphasé 230V/400V, 50 Hz. Par contre, l'étude se base sur des relevés effectués à l'aide d'un **analyseur de réseau monophasé**, recevant la tension simple  $v_a(t)$  du réseau et le courant de ligne  $i_a(t)$  absorbé par le convertisseur (voir les écrans en annexe 2).

Sur cet analyseur, l'indication de puissance en kVAR contient les deux puissances Q et D (écran 2).

On rappelle l'expression du taux de distorsion harmonique d'un courant  $i$  :

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1}$$

### Analyse des courants absorbés par le variateur

1. À l'aide des indications fournies par l'analyseur (écran 1), donner la valeur efficace  $I$  du courant de ligne  $i_a(t)$  et évaluer sa valeur maximale  $I_{max}$ .
2. Relever également la valeur efficace  $I_1$  de son fondamental (écran 3).
3. Donner les fréquences des quatre harmoniques de courant les plus polluants puis estimer leur valeur efficace grâce au spectre de  $i_a(t)$  (écran 3).
4. Calculer le taux de distorsion harmonique TDHi que représentent ces quatre rangs. Comparer ce résultat à celui annoncé par l'appareil (écran 3).
5. Citer une solution permettant de réduire les harmoniques de courant prélevés au réseau.

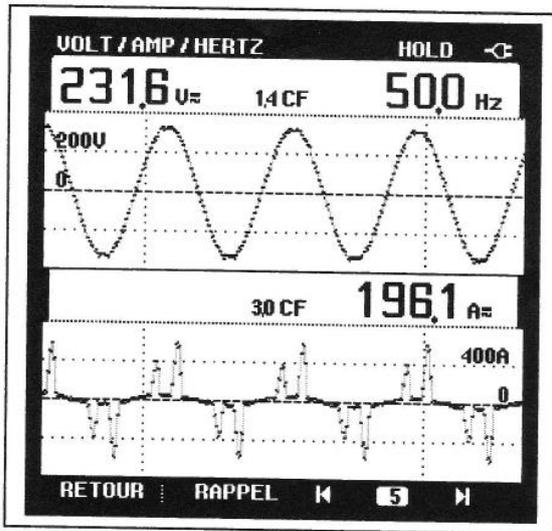
### Conséquences sur les puissances

6. Relever la valeur du facteur de déplacement  $\cos\phi_1$ , puis esquisser l'onde du fondamental de  $i_a(t)$  sur le document réponse 3.

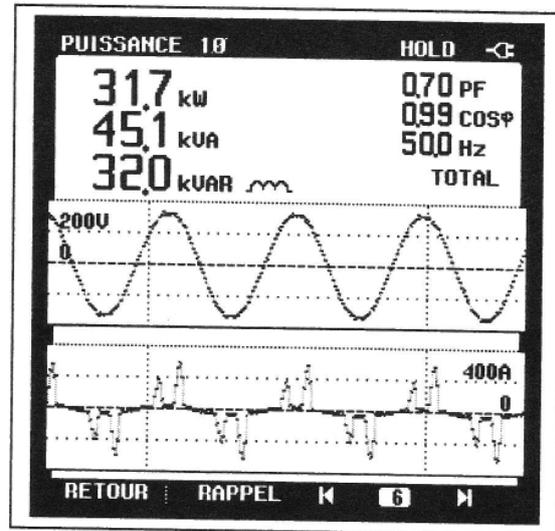
Comme le montre l'écran 1 de l'analyseur, les tensions d'alimentation du variateur sont purement sinusoïdales.

7. Vérifier par calcul les valeurs de P, Q et S annoncées par l'analyseur (écran 2).
8. En déduire la puissance déformante D.
9. Vérifier le facteur de puissance  $f_p$  affiché par l'appareil et commenter sa valeur.

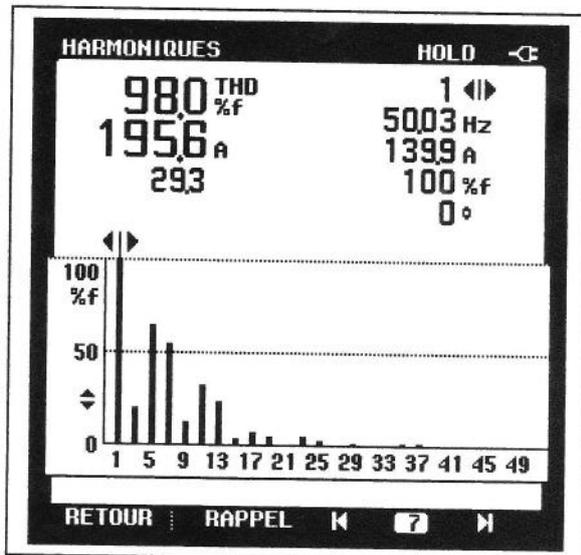
ANNEXE2



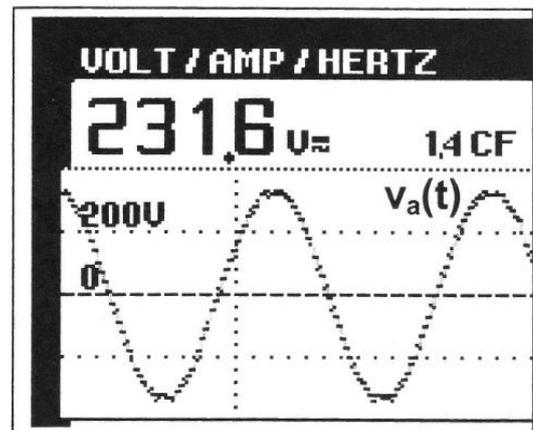
Écran 1



Écran 2



Écran 3



**Solution :**

*Analyse des courants absorbés par le variateur*

C.I. La lecture de l'oscillogramme donne  $I = 196,1$  A.

$I_{max}$  peut être lu sur le graphique  $I_{max} \approx 600$  A

Ou on le détermine avec la valeur du facteur de crête : 3,0 CF défini par  $CF = f_c = \frac{I_{\max}}{I}$  donc  $I_{\max} = CF \times I = 3 \times 196,1 = 588,3A$  donc par cette méthode plus précise  $I_{\max} = 588 A$

C.2. La lecture du spectre nous renseigne sur le valeur efficace (pas évident : sans confirmation avec la valeur du THD cela pourrait être la valeur crête donc l'amplitude) du fondamental :  $I_1 = 139,9 A$

C.3. La lecture du spectre nous renseigne sur le pourcentage du fondamental de chaque harmonique.

On détermine le pourcentage en mesurant la hauteur du fondamental, l'on mesure ensuite chaque harmonique et l'on fait le rapport de la longueur de l'harmonique sur celle du fondamental

Harmonique	rang	fréquence	% de $I_1$	Valeur efficace
$I_5$	5	250	64	90 A
$I_7$	7	350	54	76 A
$I_{11}$	11	550	32	45 A
$I_{13}$	13	650	24	34 A

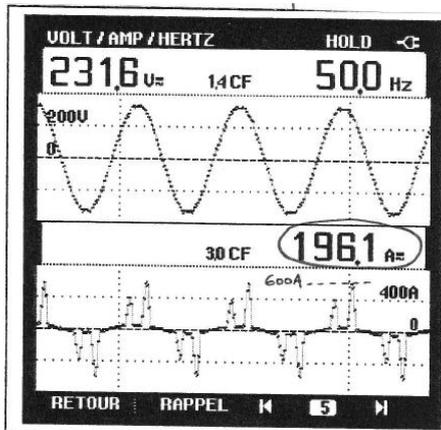
C.4. La définition du THD est strictement  $THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2}}{I_1}$ .

En ne comptabilisant que les 4 harmoniques principaux, on fait une légère erreur qui

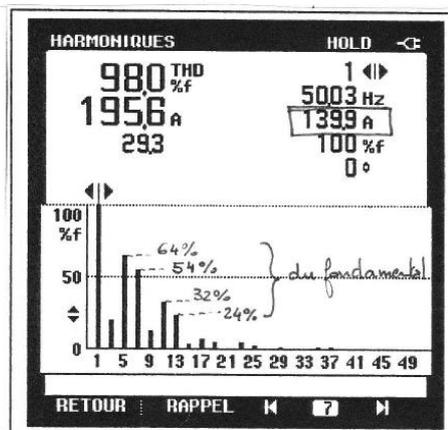
mène au résultat  $THD = \frac{\sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{90^2 + 76^2 + 45^2 + 34^2}}{139,9} = 93,3\%$

Si l'on effectue un calcul plus rigoureux  $THD = \frac{\sqrt{195,6^2 - 139,9^2}}{139,9} = 97,7\%$

Dans les deux cas, le résultat est proche des 98 % annoncés par l'appareil.



Écran 1

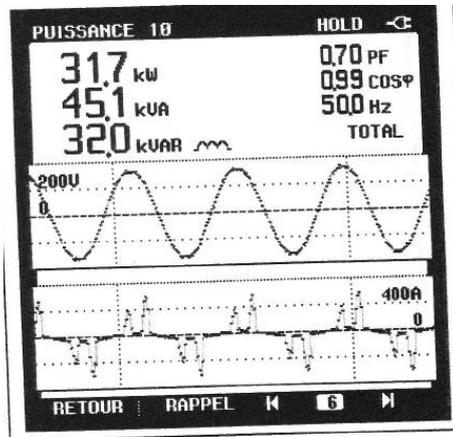


Écran 3

C.5. Pour réduire les harmoniques de courants un filtrage est nécessaire (circuit bouchon en série accordé sur le fondamental)

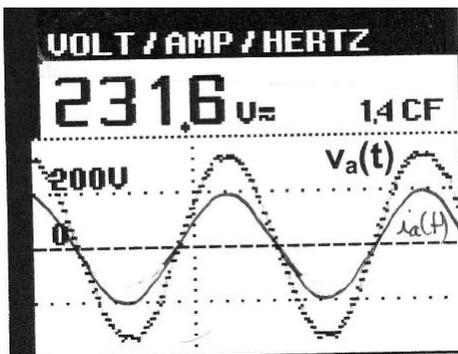
**Conséquence sur les puissances**

C.6. Le facteur de déplacement  $\cos\varphi = 0,99$  (soit un déphasage très faible de  $8^\circ$ ) ou 1 si on regarde  $\varphi_1 = 0$



Écran 2

L'allure du fondamental est donc



C.7. La puissance  $P = VI_1 \cos\varphi_1 = 231,6 \times 139,9 \times 0,99 = 32100$

La puissance mesurée par l'appareil est  $P = 31,7$  kW proche de ce que l'on peut vérifier par

le calcul  $P = 32,1$  kW.

(Remarque : pas coefficient 3 car la mesure est faite en monophasé)

La puissance réactive réelle est

$$Q = VI_1 \sin(\arccos \varphi_1) = 4570 \text{ VAr}$$

Mais l'appareil donne une puissance réactive qui contient Q et D donc il faut d'abord trouver S pour trouver ce que mesure l'appareil.

$$\text{Donc } S = VI = 231,6 \times 196,1 = 45400 \text{ VA}$$

La puissance apparente que mesure l'appareil est  $S = 45,4$  kVA.

En présence de puissance déformante  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ , donc comme l'appareil mesure Q et D, le résultat de la mesure est

$$\sqrt{Q^2 + D^2} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{45,4^2 - 32,1^2} = 32,1 \text{ kVAr}.$$

Ce qu'indique l'appareil et notre calcul concordent bien.

**C.8.** On en déduit la puissance déformante. On sait que  $\sqrt{Q^2 + D^2} = 32,1$  kVAr or  $Q = 4,57$  kVAR

$$\text{Donc } D = \sqrt{32,1^2 - 4,57^2} = 31,7 \text{ kVAd}$$

La puissance déformante est donc  $D = 31,7$  kVAd

**C.9.**  $f_p = \frac{P}{S} = \frac{32,1}{45,4} = 0,7$  On retrouve bien le résultat de la mesure

La valeur du  $f_p$  est plus faible que la  $\cos \varphi$  car il témoigne de la présence de puissance déformante.

## Références Bibliographiques

- [1] Gilbert Sybille, Electrotechnique, Théodor WILDI, 3<sup>ème</sup> édition, Chapitre 41 : Les Harmoniques.
- [2] Luc Lasne, Exercices et problèmes d'électrotechnique, notion de base des machines électriques, rappels de cours, Chapitre 3 : Charge non linéaire, harmoniques de courants et régimes transitoires.
- [3] Jouko Jaakkola, Vivre en harmonique avec son électricité, Revue ABB 3/2001.
- [4] I. Exteberria-Otadui, Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – application à la qualité de l'énergie, thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2003.
- [5] IEEE STD 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. – IEEE 519 working Group. 1992.
- [6] IEEE Voltage Sag Indices – Draft 2. Working document for IEEE P1564 November 2001.
- [7] Bollen, M. H. J. "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions". IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [8] CEI 61000-1-1, Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 1: General, Section 1: Application and Interpretation of Fundamental Definitions and Terms. 2001.
- [9] CENELEC, EN 50160. Caractéristiques des tensions sur les réseaux publics de distribution d'électricité. 2001.
- [10] CEI 61000-2-8, Voltage Dips and Short Interruptions on Public Electric Power Supply Systems with Statistical Measurement Results. Novembre 2000.
- [11] Davenport, F. W. T. "Voltage Dips and Short Interruptions in Medium Voltage Public Electricity Supply Systems," UNIPEDE/DISDIP Report, 1990.
- [12] Sabin, D. D. "Statistical Analysis of Voltage Dips and Interruptions– Final Results from the EPRI Distribution System Power Quality Monitoring Survey". CIRED June 1999.

## Série 1

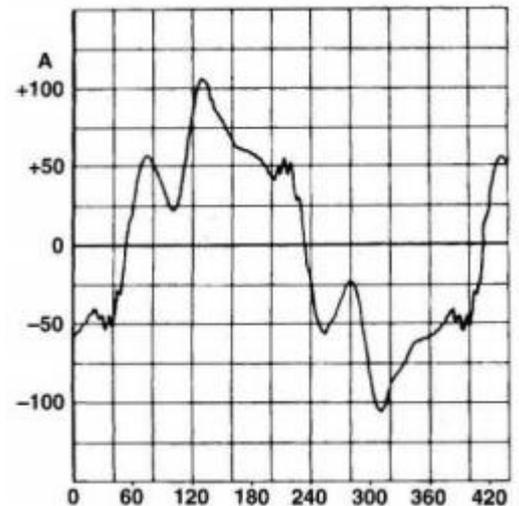
### Exercice 1 :

Forme d'onde déformée d'un courant à 60 Hz ayant une valeur efficace de 62,5 A à 60 Hz, circulant dans un système d'entraînement électronique. L'onde contient les harmoniques suivants :

Fondamentale (60 Hz) = 59 A  
5e harmonique (300 Hz) = 15,6 A  
7e harmonique (420 Hz) = 10,3 A

Le courant distorsionné de la Figure ci contre a une valeur efficace de 62,5 A. Sachant que la composante fondamentale est de 59 A. Calculer :

- la valeur efficace  $I_H$  de l'ensemble des harmoniques
- le facteur de distorsion en pour cent
- la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques supérieurs au 7e
- la valeur crête du 7e harmonique



### Exercice 2 :

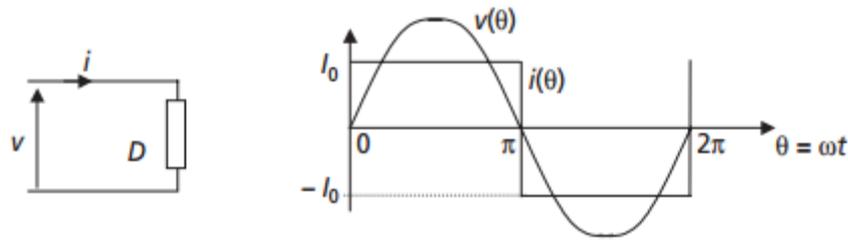
Une onde carrée a une amplitude de 100 V. En utilisant le tableau ci contre, calculer :

- la valeur efficace de l'onde carrée
- la valeur efficace de la composante fondamentale
- la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques

harmonique	amplitude volts (crête)	fréquence Hz	amplitude relative
fondamentale	127,3	50	1
3 <sup>e</sup>	42,44	150	1/3
5 <sup>e</sup>	25,46	250	1/5
7 <sup>e</sup>	18,19	350	1/7
9 <sup>e</sup>	14,15	450	1/9
-	-	-	-
-	-	-	-
127 <sup>e</sup>	1,00	6350	1/127
-	-	-	-
n <sup>ième</sup>	127,3/n	50 n	1/n

### Exercice 3 :

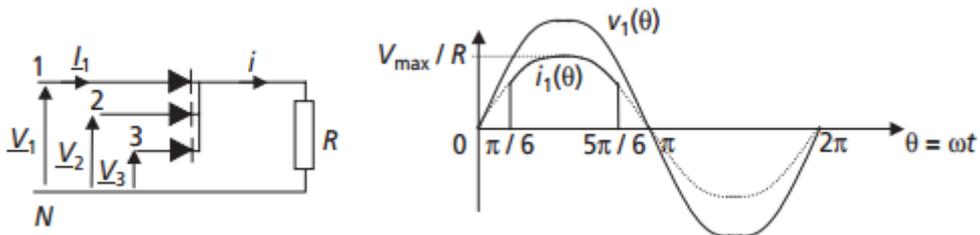
Un dipôle non linéaire consomme, sous la tension  $v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$ , le courant  $i$  représenté sur la figure suivante



- 1) Calculer l'expression littérale de la valeur efficace  $I$  du courant  $i$ .
- 2) Calculer l'expression littérale de la puissance active consommée par le dipôle  $D$ .
- 3) Préciser la valeur de la puissance réactive consommée par le dipôle  $D$ .
- 4) Calculer la valeur du facteur de puissance imposé par ce dipôle et commenter.
- 5) Préciser l'expression de la puissance déformante consommée par le dipôle  $D$ .
- 6) Calculer les termes de la décomposition en série de Fourier du courant  $i$ .
- 7) Représenter alors le spectre du courant  $i$ .
- 8) Montrer alors que la puissance active est bien due aux composantes fondamentales du courant et de la tension.
- 9) Écrire l'expression de la valeur efficace  $I_{de}$  de  $i$  en fonction des amplitudes des composantes du développement en série de Fourier et donner l'expression de la puissance déformante consommée par le dipôle  $D$  en fonction de ces composantes.

**Exercice 4 :**

La figure 1 représente le redresseur P3 et le courant qu'il consomme en débitant sur une charge résistive et en considérant les diodes parfaites. Les points 1, 2 et 3 représentent les phases d'un générateur triphasé et N son neutre.



**Figure 1**

La valeur efficace des tensions simples sera notée  $V$ .

- 1) Calculer l'expression littérale de la valeur efficace du courant  $i_1$ , notée  $I_1$  en fonction de  $V$  et  $R$ .
- 2) Calculer l'expression de la puissance active consommée par la phase 1 du système triphasé. En déduire l'expression de la puissance totale fournie,  $P$ , si on considère le système triphasé équilibré.
- 3) Calculer alors la valeur du facteur de puissance que présente ce montage.

La figure 2 représente le redresseur PD3 et le courant qu'il consomme en débitant sur une charge résistive et en considérant les diodes parfaites. Les points 1, 2 et 3 représentent les trois phases d'un générateur triphasé et N son neutre.

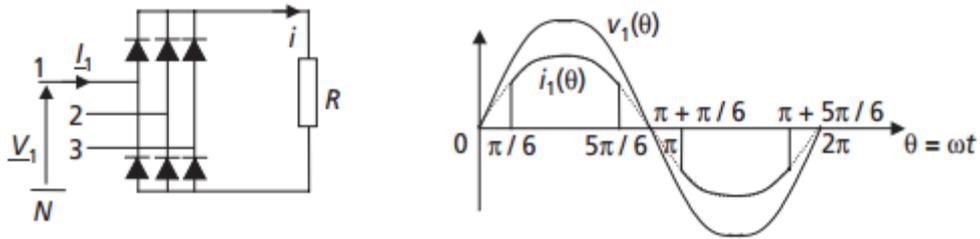


Figure 2

- 4) Calculer l'expression littérale de la valeur efficace du courant  $i_1$ , notée  $I_1$ . (On n'hésitera pas à remarquer certaines similitudes avec le calcul effectué à la question 1.)
- 5) Calculer l'expression de la puissance active consommée par la phase 1 du système triphasé. En déduire l'expression de la puissance totale fournie si on considère le système triphasé équilibré.
- 6) Calculer alors la valeur du facteur de puissance que présente ce montage. Commenter.

**Exercice 5 :**

Un dipôle non linéaire consomme, sous la tension  $v(t) = 230\sqrt{2}.\sin(100\pi t)$ , le courant  $i$  dont le spectre a été mesuré sur un énergie-mètre et représenté sur la figure 3

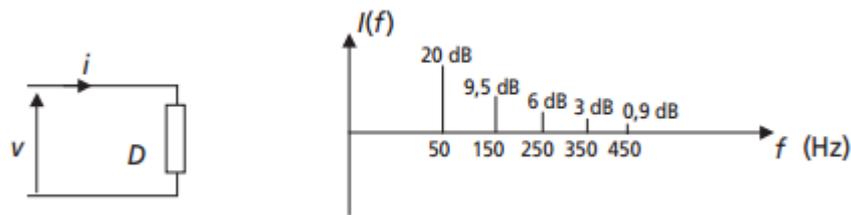


Figure 3

Les composantes harmoniques sont indiquées en décibel, c'est-à-dire que chaque valeur notée représente . Par ailleurs, l'appareil indique également que le dipôle consomme la puissance active  $P = 1380W$

- 1) Calculer les valeurs en ampères du fondamental et des diverses composantes harmoniques du courant.
- 2) Calculer la valeur efficace  $I$  du courant  $i$ .
- 3) Calculer le déphasage entre le fondamental du courant et de la tension.
- 4) Calculer alors la valeur de la puissance réactive consommée.
- 5) En déduire la valeur de la puissance déformante.
- 6) Calculer le taux de distorsion harmonique (THD) du courant.

## Solution TD1

### Exercice 1 :

a) La valeur efficace (ou rms) de l'ensemble des courants harmoniques est :

$$I_H = \sqrt{I^2 - I_H^2} = \sqrt{62,5^2 - 59^2} = 20,6 \text{ A}$$

b) Le facteur de distorsion est :

$$\text{THD} = I_H / I_F = 20,6 / 59 = 0,349 = 34,9 \%$$

c) D'après les données de la Figure, la valeur efficace des harmoniques  $> 7^e$  est :

$$I_{>7H} = \sqrt{I^2 - I_5^2 - I_7^2} = \sqrt{20,6^2 - 15,6^2 - 10,3^2} = 8,7 \text{ A}$$

d) La valeur crête du 7e harmonique est:

$$I_{7\text{crête}} = 10,3\sqrt{2} = 14,6 \text{ A.}$$

### Exercice 2 :

a) La valeur efficace de l'onde carrée est évidemment 100 V.

b) La valeur efficace de la fondamentale est :

$$E_F = 0,707 E_{\text{Crête}} = 0,707 \times 127,3 = 90 \text{ V}$$

c) En utilisant la formule on obtient :

$$E = \sqrt{E_F^2 + E_H^2}$$

$$100 = \sqrt{90^2 + E_H^2}$$

$$E_H = 43,6 \text{ V.}$$

### Exercice 3 :

$$1) I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2(\theta) \cdot d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_0^2 \cdot d\theta} = I_0 \sqrt{\frac{1}{2\pi} 2\pi} = I_0$$

2) La puissance active consommée par le dipôle est la puissance moyenne, c'est-à-dire la valeur moyenne de la puissance instantanée :  $p(t) = v(t) \cdot i(t)$  ou de façon plus pratique :

$$p(\theta) = v(\theta) \cdot i(\theta)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} p(\theta) \cdot d\theta = 2 \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} I_0 \cdot V\sqrt{2} \cdot \sin\theta \cdot d\theta = \frac{I_0 \cdot V \cdot \sqrt{2}}{\pi} [-\cos\theta]_0^{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot I_0 \cdot V}{\pi}$$

3) La puissance réactive est définie comme due au déphasage entre le fondamental du courant et celui de la tension. Ici, le courant et la tension sont en phase, la puissance réactive  $Q$  est donc nulle.

4) Le facteur de puissance est défini comme le rapport de la puissance active sur la puissance apparente  $S = V \cdot I$

$$K = \frac{P}{S} = \frac{\frac{2\sqrt{2} \cdot I_0 \cdot V}{\pi}}{V \cdot I_0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,9$$

5) L'expression de la puissance déformante  $D$  se déduit de la formule générale :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \text{ soit } D = \sqrt{V^2 I_0^2 - \frac{8.V^2.I_0^2}{\pi^2}} = 0,43.V.I_0$$

6) La décomposition en série de Fourier du courant  $i$  s'écrit :

$$i(t) = \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)$$

Il faut noter que : la valeur moyenne de  $i$  est nulle, les termes  $a_n$  sont nuls puisque la fonction est impaire et les termes  $b_n$  d'indice  $n$  pairs sont nuls puisque la fonction est symétrique par rapport à son passage à zéro.

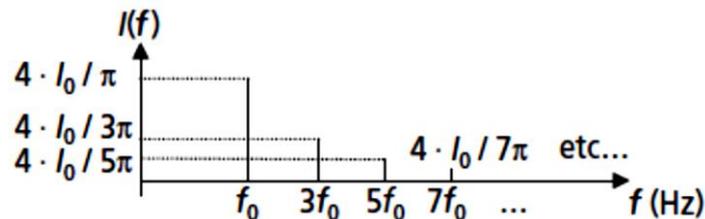
Il reste donc à calculer, en prenant  $\theta = \omega t$  comme variable d'intégration :

$$\begin{aligned} b_{2k+1} &= \frac{2}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} i(\theta) \cdot \sin((2K+1)\theta) \cdot d\theta = 2 \cdot \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} I_0 \cdot \sin((2K+1)\theta) \cdot d\theta \\ &= \frac{2 \cdot I_0}{\pi(2K+1)} \cdot [-\cos((2K+1)\theta)]_0^{\pi} \end{aligned}$$

$$\text{C'est-à-dire : } b_{2K+1} = \frac{4 \cdot I_0}{\pi(2K+1)}$$

$$\text{Donc : } i(t) = \sum_{K=1}^{\infty} \frac{4 \cdot I_0}{\pi(2K+1)} \cdot \sin((2K+1)\omega t)$$

7) On représente le spectre du courant  $i$  sur la *figure* sans échelle où on note la fréquence  $f_0 = \omega/2\pi$ .



8) On retrouve la valeur de la puissance active en considérant la valeur moyenne du produit des fondamentaux de courant et de tension. Ces composantes étant sinusoïdales pures, on écrit :  $P = I_1 \cdot V_1 \cdot \cos \varphi_1$  avec  $I_1$  et  $V_1$  les valeurs efficaces des composantes fondamentales de  $i$  et  $v$ .

Ici le fondamental de courant est en phase avec la tension qui est sinusoïdale pure. On écrit

$$\text{donc : } P = V \cdot I_1 = V \cdot \frac{b_1}{\sqrt{2}} = V \cdot \frac{4 \cdot I_0}{\pi \sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot V \cdot I_0}{\pi}$$

On retrouve bien l'expression calculée directement à la *question 2*.

9) La valeur efficace de  $i$  s'écrit :  $I = \sqrt{\sum_{K=1}^{\infty} \left(\frac{b_{2K+1}}{\sqrt{2}}\right)^2}$

En utilisant cette expression dans la formule :  $(V.I)^2 = P^2 + D^2$  ( $Q$  étant nulle), on obtient :

$$V^2 \cdot \sum_{K=1}^{\infty} \left(\frac{b_{2K+1}}{\sqrt{2}}\right)^2 = V^2 \cdot I_1^2 + D^2$$

Donc :  $D = V \cdot \sqrt{\sum_{K=2}^{\infty} \left(\frac{b_{2K+1}}{\sqrt{2}}\right)^2}$

#### Exercice 4 :

1) Sur l'intervalle  $[\pi/6, 5\pi/6]$  le courant  $i_1$  a pour expression :

$$i_1(\theta) = \frac{V_{max}}{R} \cdot \sin \theta = \frac{V\sqrt{2}}{R} \cdot \sin \theta$$

On calcule alors :

$$I_1^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^2(\theta) \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \left(\frac{V \cdot \sqrt{2}}{R} \cdot \sin \theta\right)^2 \cdot d\theta = \frac{2 \cdot V^2}{2\pi R^2} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \frac{(1 - \cos 2\theta)}{2} \cdot d\theta$$

C'est-à-dire :  $I_1^2 = \frac{V^2}{2\pi R^2} \left[ \theta - \frac{\sin 2\theta}{2} \right]_{\pi/6}^{5\pi/6} = \frac{V^2}{2\pi R^2} \left( \frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$

Donc :  $I_1 = \frac{V}{R} \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi}\right)} = 0,68 \cdot \frac{V}{R}$

2) On calcule ici :

$$P_1 = \langle V_1(\theta) \cdot i_1(\theta) \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1(\theta) \cdot v_1(\theta) \cdot d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \frac{2 \cdot V^2}{R} \sin^2 \theta \cdot d\theta = \frac{V^2}{2\pi R} \left( \frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} \right)$$

C'est-à-dire :  $P_1 = \langle V_1(\theta) \cdot i_1(\theta) \rangle = 0,47 \cdot \frac{V^2}{R}$

La puissance totale fournie par le générateur triphasé est donc :  $P = 3P_1 = 1,41 V^2/R$

3) On calcule le facteur de puissance en revenant à sa définition :

$$k = \frac{P}{S} = \frac{1,41 \cdot \frac{V^2}{R}}{3 \cdot V \cdot I_1} = \frac{1,41 \cdot \frac{V^2}{R}}{3 \times 0,68 \cdot \frac{V^2}{R}} = 0,69$$

4) Le calcul revient exactement à celui de la *question 1* sur l'intervalle  $[0, \pi]$ . En revanche, le courant possède maintenant une alternance négative sur  $[\pi, 2\pi]$ . Lorsqu'on calcule la valeur moyenne du courant au carré, on constate que celle-ci est tout simplement le double de celle calculée à la *question 1*.

Ainsi :  $I_1^2 = 2 \times \frac{V^2}{2\pi R^2} \left( \frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$

$$\text{Et donc : } I_1 = \sqrt{2} \cdot \frac{V}{R} \sqrt{\left(\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi}\right)} = 0,96 \cdot \frac{V}{R}$$

5) Pour le calcul de la puissance, on remarque des symétries analogues et on écrit :

$$P_1 = \langle V_1(\theta) \cdot i_1(\theta) \rangle = 2x \frac{V^2}{2\pi R} \left(\frac{2\pi}{3} + \sqrt{3}\right)$$

$$\text{C'est-à-dire : } P_1 = 0,94 \cdot \frac{V^2}{R} \text{ et } P = 3P_1 = 2,82 \cdot \frac{V^2}{R}$$

6) Le facteur de puissance que présente ce montage est donc :

$$k = \frac{P}{S} = \frac{2,82 \cdot \frac{V^2}{R}}{3 \cdot V \cdot I_1} = \frac{2,82 \cdot \frac{V^2}{R}}{3 \times 0,96 \cdot \frac{V^2}{R}} = 0,98$$

Ce résultat est sans appel et nous indique qu'on choisira quasiment toujours le redresseur PD3 qui présente un facteur de puissance naturel excellent. Le redresseur P3 par contre pose un grave problème sur ce point. Ajouté au fait qu'il rend la présence du neutre obligatoire, on comprend qu'il constitue un montage très peu rencontré dans la pratique.

#### Exercice 5 :

1) Il suffit d'inverser la formule donnée pour déduire les valeurs :

$$I_1 = 10 \text{ A, } I_3 = 3 \text{ A, } I_5 = 2 \text{ A, } I_7 = 1,4 \text{ A et } I_9 = 1,1 \text{ A}$$

2) La valeur efficace du courant :  $I$  se calcule en écrivant :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2} = 10,77 \text{ A}$$

3) La puissance active n'est créée que par le fondamental du courant qui est une composante sinusoïdale.

$$\text{Ainsi : } P = 1380 \text{ W} = V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \text{ d'où } \cos \varphi_1 = P / V \cdot I_1 = 0,557 \text{ soit } \varphi_1 = 56,1^\circ$$

4) La puissance réactive s'écrira donc :  $P = V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = 2057 \text{ VAR}$

5) La puissance déformante se déduira de la formule :  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ , soit donc :

$$D = \sqrt{(V \cdot I)^2 - P^2 - Q^2} = 19,37$$

Le taux de distorsion harmonique s'écrit :  $THD = \frac{\sqrt{I - I_1^2}}{I_1} = 0,4$ . Ce taux tend vers 0 à mesure que le courant s'approche d'une sinusoïde pure. Ici, ce critère permet de chiffrer la part de la composante harmonique par rapport à la composante fondamentale.

## Série 2

### Exercice 1

Afin de relever le facteur de puissance d'une installation triphasée comportant une charge déformante (redresseur triphasé en pont sur machine à courant continu, on insère 3 cellules LC entre phases et neutre. Chaque cellule ayant le même rôle, on s'intéressera dans un premier temps à celle de la phase 1. **Pour supprimer un harmonique, la cellule LC doit faire court circuit à la fréquence de cet harmonique.**

Sans le filtre, le courant  $i_{p1}$  a l'allure de la figure ci-dessous. Les courants  $i_{p2}$  et  $i_{p3}$  sont les mêmes, décalés de  $T/3$ . L'ensemble sans filtre consomme une puissance active  $P = 38,2$  kW et réactive  $Q = 38,2$  kVAR. La tension entre phases fournie par le réseau est  $U = 400$  V,  $f = 50$  Hz, la valeur maximale du courant de ligne est  $I = 100$  A

1. Sans cellule LC : calculer la valeur efficace de  $i_{p1} : I_{p1}$ . En déduire la puissance apparente  $S$  absorbée par la charge et le facteur de puissance.
2. Sur quels facteurs doit-on agir pour relever le facteur de puissance ?
3. Pourquoi le courant  $i_{p1}$  ne comporte-t-il pas d'harmonique de rang pair ?
4. Sachant que  $i_{p1}(t)$  se décompose en harmoniques tel que

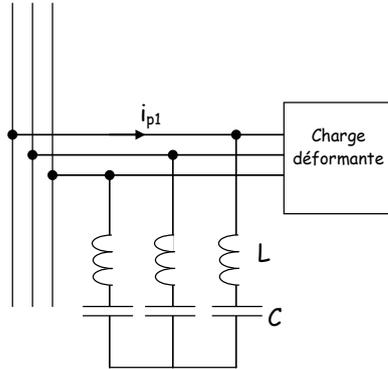
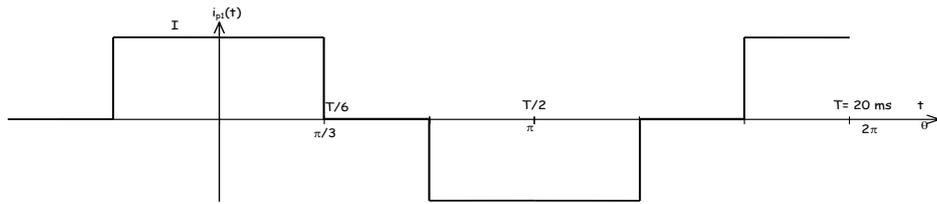
$$i_{p1}(t) = \frac{4I}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left((2n+1) \times \frac{\pi}{3}\right) \cos((2n+1)\omega t)$$

Justifiez alors le fait que l'harmonique 5 soit le plus gênant.

Déterminez la valeur efficace du fondamental de  $i_{p1} : I_{p1}$

Déterminez le  $THD = \frac{\sqrt{I_{p1}^2 - I_{p1_1}^2}}{I_{p1_1}}$

5. On veut supprimer l'harmonique de rang 5 de chacun des trois courants  $i_{p1}$ ,  $i_{p2}$ ,  $i_{p3}$ . En déduire une relation entre  $L$ ,  $C$  et  $\omega$ .
6. Montrer alors que vis-à-vis du fondamental, la cellule LC se comporte comme un condensateur équivalent ( $C_{eq}$ )
7. Calculer la valeur de  $C_{eq}$  pour que les cellules LC compensent la puissance réactive  $Q$  pour la fréquence du fondamental.
8. En déduire la valeur de  $C$  puis celle de  $L$ .



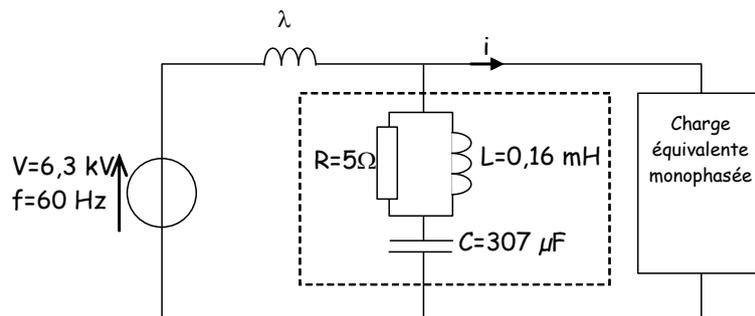
## Exercice 2

Une installation comporte une charge déformante constituée entre autres de plusieurs redresseurs associés de telle sorte que le courant réseau comporte en plus de son fondamental des harmoniques. Le premier d'entre eux est celui de rang 11. Pour diminuer le taux global de distorsion en courant de cette installation triphasée, on place sur le réseau un filtre triphasé constitué de 3 éléments identiques couplés en étoile.

On envisage un fonctionnement pour lequel la puissance réactive vaut :  $Q=14,8$  MVAR

### On fera l'étude pour une seule phase du réseau

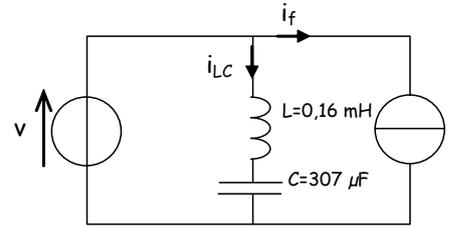
Le modèle équivalent retenu pour ce filtre est représenté ci-contre. La tension sinusoïdale entre phases et neutre a pour valeur  $V = 6,3$  kV et  $f=60$  Hz



**1<sup>ère</sup> Partie : Comportement du filtre à la fréquence du fondamental.**

A la fréquence du fondamental, on utilise le schéma simplifié suivant.

1. Exprimer puis calculer l'impédance complexe  $Z_1$  du circuit LC pour  $f = 60$  Hz. En déduire la valeur efficace  $I_{LC}$  du courant  $i_{LC}$ .
2. Calculer la puissance réactive  $Q_{LC}$  mise en jeu dans le circuit LC pour  $f = 60$  Hz.

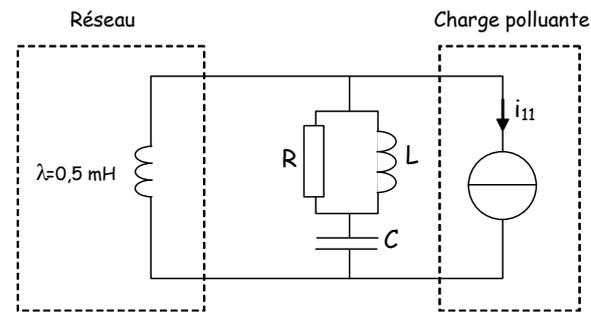


**2<sup>ème</sup> Partie : Comportement du filtre au rang 11.**

1. Donner l'expression de  $Z_{e11}$ , impédance complexe équivalente aux éléments R et L en parallèle pour la fréquence  $f_{11} = 660$  Hz. Mettre cette expression sous la forme  $r + jx$ .  
Sachant que  $R = 5 \Omega$ , donner les valeurs numériques de r et x.

*Dans la suite, on prendra  $r = 0,086 \Omega$  et  $x = 0,65 \Omega$*

2. Calculer le module de l'impédance  $Z_{11}$  du filtre pour la fréquence  $f_{11}$ .
3. On utilise le modèle suivant où  $i_{11}$  est l'harmonique de courant de rang 11 généré par l'installation.  
Calculer l'impédance  $Z_{e11}$  représentée par l'inductance  $\lambda$  à la fréquence  $f_{11}$ .



Montrer, en comparant les valeurs de  $Z_{11}$  et  $Z_{e11}$  que l'harmonique  $i_{11}$  circule principalement dans le filtre.

## Solution TD2

### Exercice 1 :

1. En mettant le signal au carré, puis en recherchant sa valeur moyenne dont on prend la

$$\text{racine : } I_{p1} = \sqrt{\frac{100^2 \times \frac{2\pi}{3}}{\pi}} = 81,6 \text{ A}$$

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{3} \times 400 \times 81,6 = 56,5 \text{ kVA}$$

$$f_p = \frac{P}{S} = \frac{38,2}{56,5} = 0,67$$

2. La présence d'harmoniques peut être éliminée par des filtres et la puissance réactive par des condensateurs.  
 3. Le signal présente une symétrie de glissement donc pas d'harmoniques de rang pair, et le signal est pair donc  $b_n = 0$

4. si  $n=0$   $i_{p_{11}}(t) = \frac{4I}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \cos(\omega t) = \frac{200\sqrt{3}}{\pi} \cos(\omega t)$  donc  $I_{p_{11}} = \frac{110}{\sqrt{2}} = 77,78 \text{ A}$

si  $n=1$   $i_{p_{13}}(t) = \frac{4I}{\pi} \times \frac{1}{3} \sin\left(\frac{3\pi}{3}\right) \cos(3\omega t) = 0$

si  $n=2$   $i_{p_{15}}(t) = \frac{4I}{\pi} \times \frac{1}{5} \sin\left(\frac{5\pi}{3}\right) \cos(5\omega t) = -\frac{40\sqrt{3}}{\pi} \cos(5\omega t)$

$$THD = \frac{\sqrt{81,6^2 - \left(\frac{110}{\sqrt{2}}\right)^2}}{\frac{110}{\sqrt{2}}} = 31\%$$

5.  $Z_{LC} = j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$  donc  $Z_{LC} = 0$  si  $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  donc le filtre enlèvera l'harmonique

de rang 5 si  $\sqrt{LC} = \frac{1}{5\omega_f}$  avec  $\omega_f$  la pulsation du fondamental.

6. Si  $\omega = \omega_f$  et comme L et C sont choisis tels que  $\omega_f = \frac{1}{5\sqrt{LC}}$  alors

$$Z_{LC} = j\left(L\omega_f - \frac{1}{C\omega_f}\right) = j\left(L\frac{1}{5\sqrt{LC}} - \frac{1}{C\frac{1}{5\sqrt{LC}}}\right) = j\left(\frac{\sqrt{L}}{5\sqrt{C}} - \frac{5\sqrt{L}}{\sqrt{C}}\right) = j\left(\frac{\sqrt{L} - 25\sqrt{L}}{5\sqrt{C}}\right)$$

$Z_{LC} = j\left(-\frac{24\sqrt{L}}{5\sqrt{C}}\right)$  et  $Z_{LC}$  est un imaginaire pure négatif il est donc équivalent à un

dipôle capacitif à cette fréquence et  $Z_{LC} = j\left(-\frac{24\sqrt{L}}{5\sqrt{C}}\right) = j\left(-\frac{1}{C_{\text{eq}}\omega_f}\right)$  donc

$$\frac{24\sqrt{L}}{5\sqrt{C}} = \frac{1}{C_{\text{eq}}\omega_f} \text{ donc } C_{\text{eq}} = \frac{5\sqrt{C}}{24\sqrt{L}\omega_f} = \frac{5\sqrt{C}}{24\sqrt{L}} \times 5\sqrt{LC} = \frac{25}{24}C \text{ donc } \boxed{C_{\text{eq}} = \frac{25}{24}C}$$

$$\frac{1}{5\sqrt{LC}}$$

7. Pour compenser l'énergie réactive qui « pulse » à  $\omega = \omega_f$  les trois cellules LC se comportent à cette fréquence comme  $C_{\text{eq}}$  donc génèrent une énergie réactive  $Q_C = 3C_{\text{eq}}\omega_f V^2$  (V car ici le couplage est étoile donc chaque  $C_{\text{eq}}$  est soumis à V) qui doit compenser les 38,2 kVAR absorbés par la charge.

$$\text{Donc } 3C_{\text{eq}}\omega_f V^2 = 38,2 \cdot 10^3 \text{ donc } C_{\text{eq}} = \frac{38,2 \cdot 10^3}{3 \times 50 \times 2\pi \times \left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2} = 760 \mu\text{F} \text{ donc}$$

$$C = \frac{24}{25}C_{\text{eq}} = 730 \mu\text{F}$$

8. Comme  $\omega_f = \frac{1}{5\sqrt{LC}}$  alors  $L = \left(\frac{1}{5\omega_f\sqrt{C}}\right)^2 = \frac{1}{(5 \times 50 \times 2\pi)^2 \times 730 \cdot 10^{-6}} = 0,55 \text{ mH}$

## Exercice 2 :

### 1 ère partie : Comportement du filtre à la fréquence du fondamental

Les deux éléments sont en série donc l'impédance complexe  $Z_1$  vaut :

$$\underline{Z}_1 = jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = j\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$$

$$\text{donc } \underline{Z}_1 = j\left(0,00016 \times 2\pi \times 60 - \frac{1}{307 \cdot 10^{-6} \times 2\pi \times 60}\right) = -8,58j$$

$$\boxed{\underline{Z}_1 = -8,58j}$$

L'impédance complexe est un imaginaire pur dont la partie imaginaire est négative, l'ensemble condensateur — inductance se comporte donc comme un condensateur vu du fondamental.

$$\text{On obtient le courant } I_{LC} \text{ par la relation : } I_{LC} = \frac{V}{|Z_1|} = \frac{6300}{8,58} = 734 \text{ A}$$

$$\boxed{I_{LC} = 734 \text{ A}}$$

Pour une impédance complexe  $jX$  ( $X$  pouvant être positive ou négative), la puissance réactive s'écrit  $XI^2$  ou  $U^2/X$  où  $I$  et  $U$  sont les valeurs efficaces respectivement du courant traversant l'impédance et la tension à ses bornes. Appliquée à notre cas, on a alors :

$$Q_{LC} = X_{LC}^2 = -8,58 \times 734^2 = -4622 \text{ kVAR}$$

$$\boxed{Q_{LC} = -4,6 \text{ MVAR}}$$

Il s'agit de puissance réactive fournie par le circuit LC.

### 2ème partie : Comportement du filtre au rang 11

1. Si l'on appelle  $\omega_{11} = 2\pi f_{11}$  la pulsation associée à l'harmonique de rang 11, alors l'impédance  $Z_{e11}$  vaut :

$$\boxed{Z_{e11} = \frac{jL\omega_{11} \times R}{jL\omega_{11} + R}}$$

Pour la mettre sous la forme algébrique, il faut multiplier numérateur et dénominateur par le complexe conjugué du dénominateur :

$$Z_{e11} = \frac{jL\omega_{11} \times R}{jL\omega_{11} + R} = \frac{jL\omega_{11} \times R}{jL\omega_{11} + R} \times \frac{R - jL\omega_{11}}{R - jL\omega_{11}} = \frac{R(L\omega_{11})^2 + jR^2L\omega_{11}}{R^2 + (L\omega_{11})^2} = \underbrace{\frac{R(L\omega_{11})^2}{R^2 + (L\omega_{11})^2}}_r + j \underbrace{\frac{R^2L\omega_{11}}{R^2 + (L\omega_{11})^2}}_x$$

$$\text{avec } r = \frac{R(L\omega_{11})^2}{R^2 + (L\omega_{11})^2} = \frac{5 \times (0,00016 \times 2\pi \times 660)^2}{5^2 + (0,00016 \times 2\pi \times 660)^2} = 0,086 \Omega \Rightarrow \boxed{r = 0,086 \Omega}$$

$$x = \frac{R^2L\omega_{11}}{R^2 + (L\omega_{11})^2} = \frac{5^2 \times (0,00016 \times 2\pi \times 660)}{5^2 + (0,00016 \times 2\pi \times 660)^2} = 0,65 \Omega \Rightarrow \boxed{x = 0,65 \Omega}$$

2. L'expression de l'impédance complexe  $Z_{11}$  est :  $Z_{11} = r + jx + \frac{1}{jC\omega_{11}} = r + j\left(x - \frac{1}{C\omega_{11}}\right)$

Le module de l'impédance  $Z_{11}$  vaut :

$$Z_{11} = \sqrt{0,086^2 + j\left(0,65 - \frac{1}{307 \cdot 10^{-6} \times 2\pi \times 60}\right)^2} = 0,160 \Omega$$

$$\boxed{Z_{11} = 160 \text{ m}\Omega}$$

3. L'impédance réseau pour l'harmonique 11 est :

$$Z_{e11} = \ell \omega_{11} = 0,0005 \times 2\pi \times 660 = 2,07 \Omega$$

$$\boxed{Z_{e11} = 2,07 \Omega}$$

On constate que  $Z_{11} \ll Z_{e11}$ , le filtre court-circuite l'harmonique 11 de courant, ce qui aura pour effet de réduire le taux de distorsion harmonique.