

---

# CHAPITRE 1

---

## QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET FILTRAGE ACTIF

---

L'OBJECTIF fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous une forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus agressif, et par conséquent, il doit faire face à de nombreux types de perturbations qui peuvent être d'origine interne comme l'évolution et la complexité du réseau et des charges qui lui sont connectées, ou externe liées aux phénomènes des changements climatiques.

Ainsi, afin d'assurer l'objectif d'une énergie de qualité, il est impératif de comprendre les caractéristiques, les origines et les effets des différentes perturbations afin de chercher les remèdes adéquats.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques pour les quelles on s'intéressera particulièrement. Nous parlerons également de leurs origines, de leurs effets et des normes en vigueur. Nous discuterons ensuite différentes solutions envisagées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques, en particulier le filtrage actif.

### 1.1 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension, laquelle est caractérisée par les paramètres suivants :

- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale ; pas de distorsions, de pic, de creux et amplitude dans les limites tolérables ;
- Equilibre et symétrie parfaite des phases en amplitude et en phase ;
- Stabilité de la fréquence.

## 1.2 Perturbations

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau, ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanent l'onde de tension. Par extension, on doit prendre comme perturbations aussi les phénomènes pouvant modifier l'onde de courant, du fait qu'elles sont souvent mutuellement influencées. Ces perturbations peuvent être classées selon deux critères, à savoir, selon la durée de persistance, et on a alors :

- *Des perturbations périodiques* (qui durent dans le temps), comme les distorsions harmoniques, chutes de tension dues au flux de puissance réactive dans le réseau, et les déséquilibres ;
- *Des perturbations apériodiques*, où l'en a principalement l'ensemble des phénomènes fugitifs souvent très difficiles à prévoir comme les creux de tension et les surtensions transitoires.

On peut définir aussi les perturbations selon leurs manifestations, ou bien leurs conséquences sur les grandeurs électriques, alors, on a trois familles principales [Du04] :

- Perturbations sur l'amplitude de la tension ;
- Déséquilibres des systèmes triphasés ;
- Les distorsions harmoniques.

S'agissant de l'amplitude de tension, il y a essentiellement deux perturbations très répandues : les creux et les fluctuations.

### 1.2.1 Creux de tension

On appelle creux de tension (voltage sag), une diminution brutale de l'amplitude de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de sa valeur nominale, et ce, pendant une durée allant d'un demi cycle à 30 cycles [IE95]. Un creux de tension est caractérisé par une profondeur  $\Delta V$  et une durée  $\Delta T$  (figure 1.1(a)). Par ailleurs, on peut noter qu'une coupure brève n'est qu'un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90%.

#### Origines

Les principales causes des creux de tensions sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux, comme la mise sous tension des gros transformateurs, les court circuits, enclenchement des condensateurs, simple démarrage des gros moteurs...etc.

#### Effets

Les creux de tension ont comme effets, la perturbation des couples dans les machines tournantes, déclenchement des contacteurs, pannes intempestives...etc.

### 1.2.2 Fluctuation de l'amplitude de la tension

Les fluctuations de tensions sont des variations de basses fréquences de la valeur efficace de la tension [IE95] (figure 1.1(b)). Ces variations ont une amplitude modérée (généralement 10%), mais peuvent se produire plusieurs fois par seconde, et peuvent être cycliques ou aléatoires. L'exemple le plus connu pour ce type de perturbation est le phénomène de *Fliker* [Ow94].

#### Origines

Les fluctuations de tension sont causées principalement par les charges dont l'appel en courant varie rapidement et d'une manière continue. Les exemples les plus connus sont les machines à souder et surtout les fours à arc [Me95].

#### Effets

Les variations de la valeur efficace de tension peut avoir des effets indésirables sur le couple et la vitesse des machines tournantes, mais l'effet gênant le plus important des fluctuations de tension est l'inconfort physiologique sur la vision, suite au changement de luminosité de l'éclairage (dit *Fliker*).

### 1.2.3 Déséquilibres des systèmes triphasés

On dit qu'il y a un déséquilibre dans le système de tensions ou de courants triphasés, lorsqu'on enregistre en régime permanent, des asymétries d'amplitudes et/ou de phases comme le montre la figure 1.1(c).

#### Origines

Les déséquilibres sont essentiellement causés par les asymétries d'impédances des lignes du réseau, asymétrie des impédances des charges, et aussi par des courts circuits monophasés ou biphasés.

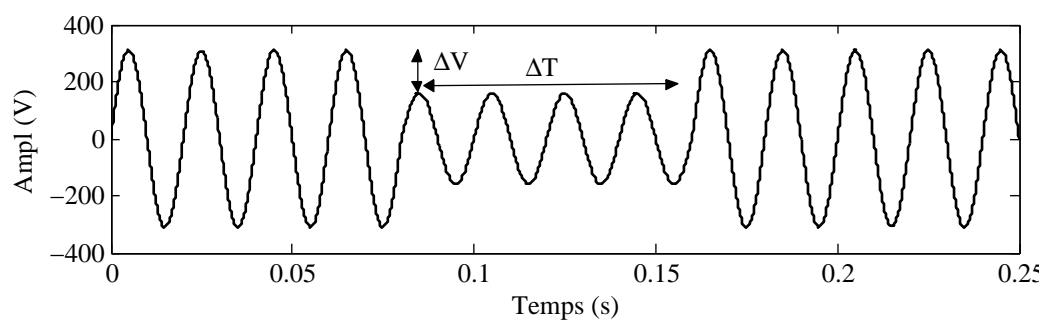
#### Effets

Les principaux effets de ce type de perturbation sont les échauffements des machines tournantes à cause des couples inverses.

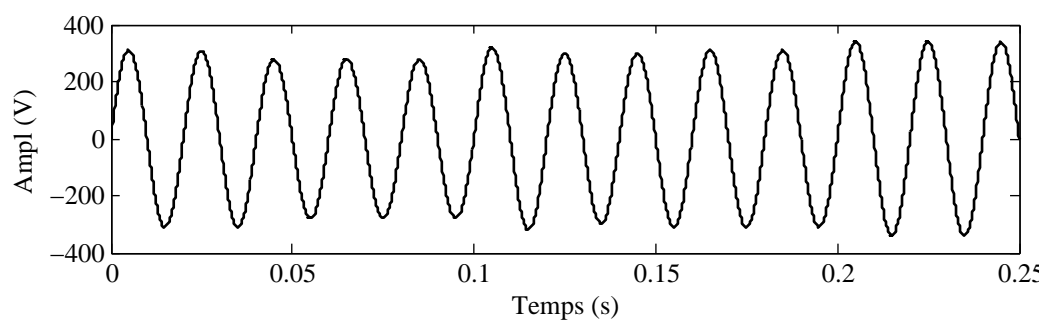
#### Caractérisation

Le déséquilibre est parfois caractérisé par le taux de déviation maximale de la valeur moyenne des tensions ou courants triphasés. Mais cette perturbation est plus rigoureusement définie par la méthode des composantes symétriques [IEC01]. Les taux des séquences inverse et homopolaire par rapport à la séquence positive, sont utilisés pour mesurer la sévérité d'un déséquilibre.

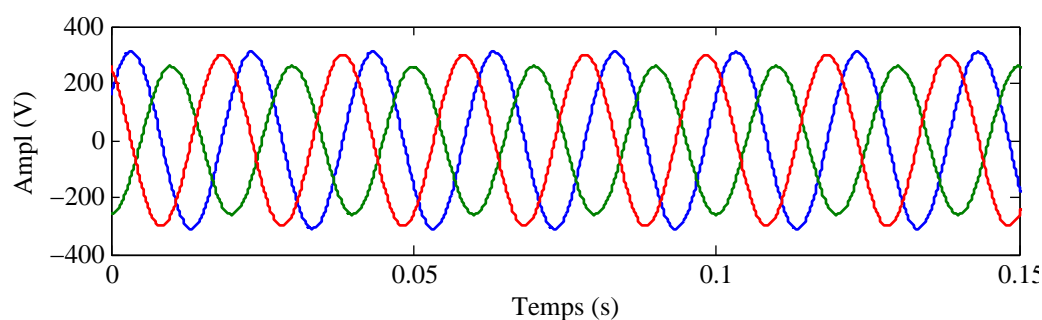
$$\tau_{V-} = \frac{V^-}{V^+}, \quad \tau_{V^0} = \frac{V^0}{V^+} \quad (1.1)$$



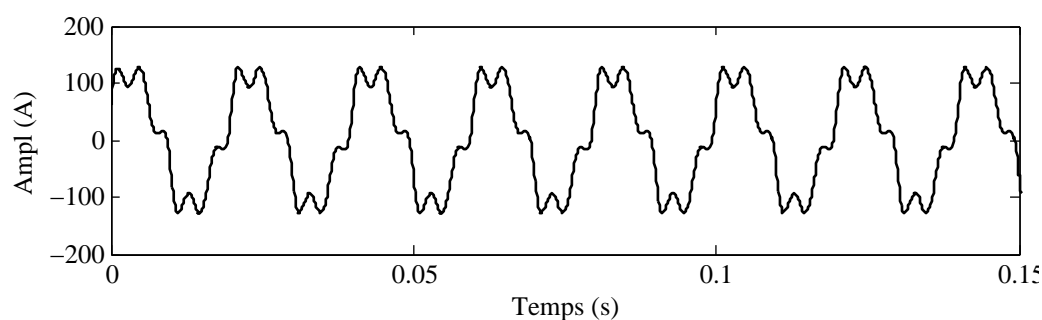
(a) Creux de tension.



(b) Fluctuation d'amplitude de la tension.



(c) Déséquilibre des tensions triphasées.



(d) Distorsions harmoniques.

FIGURE 1.1 – Les perturbations les plus répandues sur l'onde électrique.

### 1.2.4 Fluctuation de fréquence

Les fluctuations de fréquence sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de la fréquence fondamentale du réseau (50 ou 60 Hz), résultant des variations de vitesse des alternateurs, suite à un déséquilibre entre charges et puissances mises en jeu par les centrales, ou encore suite au démarrage ou à l'arrêt d'une charge importante. Elles se manifestent par des perturbations sur les vitesses et les couples des machines synchrones et asynchrones, et parfois par l'arrêt entier des systèmes.

A noter que ce type de perturbation concerne en premier lieu le réseau de transport et de répartition d'énergie, par conséquent, dans les études des perturbations dans les réseaux de distribution auxquelles on s'intéresse dans ce travail, cette perturbation est rarement tenue en compte.

### 1.2.5 Harmoniques et interharmoniques

Les *harmoniques* sont des ondes sinusoïdales, (de tensions ou de courant), ayant des fréquences multiples entières de la fréquence fondamentale, (usuellement 50 ou 60 Hz) [IEC90] [Arr97] [Du04]. De la superposition de ces ondes sur l'onde fondamentale, il en résulte une déformation de cette dernière. Cette déformation est dite *distorsion harmonique*.

Les *interharmoniques* sont des ondes également sinusoïdales, mais de fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale [IEC90] [Arr97] [IE97] [Du99] [Du04]. Ils sont aussi responsables de distorsions harmoniques, et leurs apparitions sont aujourd'hui en augmentation. Les principales sources des interharmoniques sont les convertisseurs statiques de fréquence, les fours à induction, les fours à arc [Du99]...etc.

Les perturbations harmoniques feront l'objet de la section suivante et seront au cœur de nos préoccupations tout au long de ce travail.

## 1.3 Distorsions harmoniques

On appelle distorsion harmonique toute déviation en régime permanent, de la forme sinusoïdale idéale de l'onde tension ou de courant (figure 1.1(d)).

### 1.3.1 Origines des distorsions harmoniques

Bien qu'elle n'est pas la seule raison, les charges non linéaires sont la principale source de pollution harmonique. Une charge non linéaire est une charge dont le courant n'est pas proportionnellement variable avec la tension, comme les éléments d'électronique de puissance de base (diode, thyristors,...etc.), des résistances non linéaires, des transformateurs saturés...etc.

Au début de leur apparition, les distorsions harmoniques étaient plutôt causées par la saturation des transformateurs ; Le courant de magnétisation absorbé par un transformateur opérant dans la région de saturation est non sinusoïdale, et contient en générale tous les harmoniques impaires, à commencer par le troisième. Néanmoins, ce

courant de magnétisation reste faible devant le courant débité par le transformateur en charge, c'est pourquoi, les effets de ce courant (de magnétisation) sont négligeables à plein charge.

Aujourd'hui c'est les systèmes à base d'électronique de puissance qui en est la cause principale. Ces systèmes sont à base de convertisseurs (AC-DC, DC-AC,...etc.) [Ri86] [Ph94] [Ac02] [Du04], qui utilisent des semi conducteurs non contrôlables (diodes) ou contrôlables (thyristors, transistors). Le degré de pollution harmonique générée dépend en partie du type du semi conducteur utilisé, qui dépend à son tour des caractéristiques de la charge (puissance, tension, courant). En générale pour les grandes puissances, c'est les thyristors GTO qui sont utilisés, alors que les transistors (IGBT notamment) sont utilisés pour les puissances moyennes. Ce dernier permet en générale de réduire les harmoniques de commutation grâce à sa fréquence élevée, mais les thyristors et les diodes restent les semi-conducteurs les plus polluants. Ces systèmes à base d'électronique de puissance remplissent diverses tâches, et permettent une meilleure flexibilité, meilleur rendement du système électro-énergétique, c'est pourquoi de nos jours on les trouve presque partout :

- *Dans la production d'énergie* : Excitation et équipements associés au contrôle des alternateurs, conversion et intégration des sources d'énergie renouvelable (éolienne, photovoltaïque,...etc.) dans le réseau de distribution ;
- *Transmission et distribution d'énergie* : Transport en courant continu (HDVC), compensation et contrôle des écoulements des puissances par les éléments FACTS (STATCOM, SVC, UPFC,...etc.). Ces systèmes utilisent des thyristors de fortes puissances qui sont en général d'importantes sources d'harmoniques ;
- *Alimentation des charges industrielles* : Pratiquement toutes les charges industrielles sont interfacées avec l'homme par des convertisseurs d'électronique de puissance ; Convertisseurs de courant (AC/DC), convertisseurs de fréquence, variateurs de vitesse...etc.
- *Alimentation des charges domestiques* : Aujourd'hui, on trouve de plus en plus de charges à usage domestique alimentées par l'électronique de puissance, (matériel informatique, téléviseurs,...etc.). Ces charges, bien que leurs puissances soient incomparables avec celles des charges industrielles, les distorsions harmoniques qu'elles causent peuvent être plus sévères, sans oublier autant qu'elles sont la principale raisons des déséquilibres, et de l'apparition des composantes de séquence homopolaire du fait qu'elles sont généralement monophasées.

### 1.3.2 Effets des perturbations harmoniques

Bien que la susceptibilité des différents appareils soit diversifiée à l'égard des harmoniques, on distingue essentiellement deux sortes d'effets [Re97].

#### Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement sur les équipements ;

- *Systèmes électroniques et électromécaniques* : On peut citer parmi les effets, le dérangement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension, l'augmentation de la marge

d'erreur des appareils de mesures, ou encore le déclenchement intempestif des relais de protection.

- *Effets électrodynamiques* : la présence d'harmoniques entraîne des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques. Des couples mécaniques parasites dus aux champs tournants harmoniques, donnant des vibrations dans les machines tournantes.
- *Télécommunication* : bruit dans les réseaux de télécommunication et nuisance à la qualité de l'image (téléviseur) et du son.

### Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, qui se traduit par l'échauffement conduisant à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent 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 du suréchauffement du neutre et les matériels bobinés, comme les transformateurs ou les moteurs.
- *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 dus aux 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 magnétiques), 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 courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

### Résonance

Les harmoniques peuvent être responsables de phénomène de résonance entre les impédances de différentes parties du réseau. L'exemple le plus répandu est celui d'un banc de capacités de compensation de puissance réactive et l'impédance du réseau amont. Supposons l'exemple illustré sur la figure 1.2(a) [Ac02]. La charge non linéaire est une source de courants harmoniques comme le montre le schéma équivalent sur la figure 1.2(b). Un harmonique de rang  $h$  se divisera au jeu de barre selon la loi du diviseur de courant :

$$I_{ch} = \frac{Z_s}{Z_s + Z_c} I_h = \rho_c I_h \quad (1.2)$$

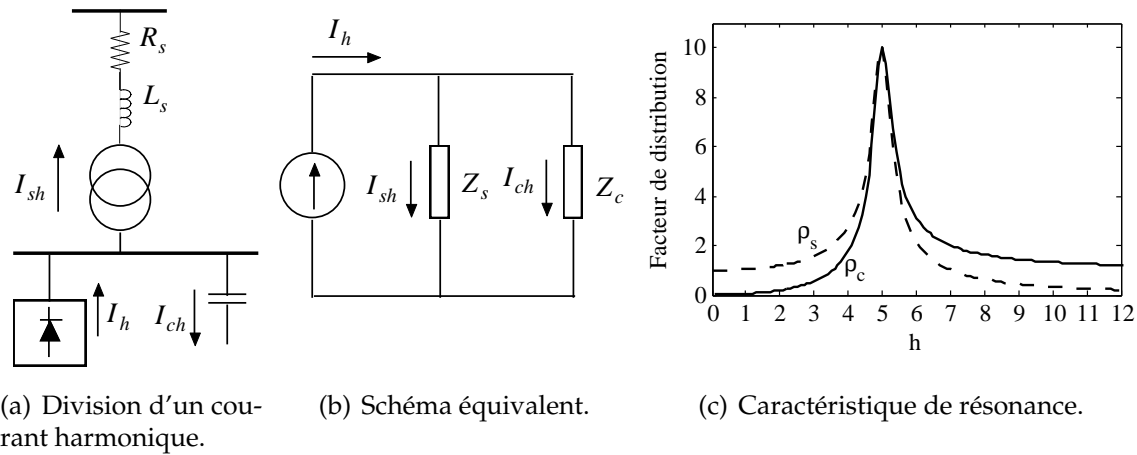


FIGURE 1.2 – Phénomène de résonance provoqué par des courants harmoniques.

$$I_{sh} = \frac{Z_c}{Z_s + Z_c} I_h = \rho_s I_h \quad (1.3)$$

$Z_s$  représente l'impédance de source,  $Z_c$ , l'impédance des capacités, et  $I_h$ , le courant harmonique. D'après ces équations, une résonance parallèle aura lieu si pour une fréquence donnée, on a  $Z_s + Z_c \rightarrow 0$ . On l'illustre par l'exemple suivant [Ac02] : Tension au jeu de barre 13.8kV, puissance de court circuit 476 MVA, puissance des capacités 19.04 MVar,  $X_s/R_s = 10$ . Les réactances de source et de la capacité à la fréquence de rang  $h$  seront donc :  $X_s = (13.8^2 h)/476 = 0.4h$ ,  $X_c = 13.8^2/(19.04h) = 10/h$ , la résistance  $R_s = X_s/10 = 0.04h$ . Ce qui donnera les facteurs de distribution  $\rho_c$  et  $\rho_s$  comme suit :

$$\rho_c = \frac{0.04 + j0.4}{0.04 + j(0.4 - 10/h^2)} \quad (1.4)$$

$$\rho_s = -\frac{j10}{0.04h^2 - j(10 - 0.4h^2)} \quad (1.5)$$

Sur la figure 1.2(c), ces facteurs de distribution de courant harmonique sont représentés en fonction du rang  $h$ . On remarque qu'il y a bien une résonance parallèle entre la capacité et la source au cinquième harmonique.

### Caractérisation des distorsions harmoniques

La décomposition en série de Fourier du courant absorbé par une charge non linéaire, peut modéliser cette dernière comme une addition de plusieurs sources de courant, (une pour chaque composante fréquentielle), mises en parallèle comme schématisé sur la figure 1.3.

$$i = i_0 + i_1 + \dots + i_{h_{max}} \quad (1.6)$$



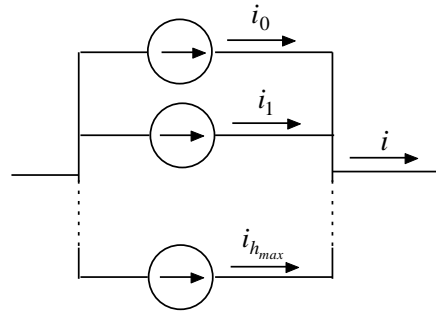


FIGURE 1.3 – Modélisation d'une charge non linéaire.

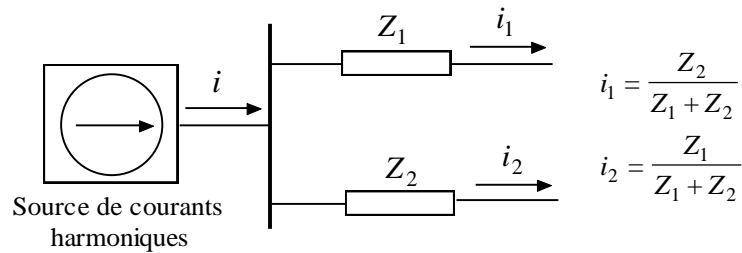


FIGURE 1.4 – Division des harmoniques dans une bifurcation.

Une distorsion harmonique est souvent caractérisée par le *taux de distorsion harmonique total*, (Total Harmonic Distortion), défini comme suit :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (X)_h^2}}{X_1} \times 100\% \quad (1.7)$$

On peut définir aussi un *taux de distorsion harmonique individuel*, (Individual Harmonic Distortion), qui tient compte de la distorsion engendré par une fréquence harmonique donnée. Ce taux est donné par :

$$IHD = \frac{X_h}{X_1} \times 100\% \quad (1.8)$$

$X$  représente l'amplitude de courant ou de tension.  $h_{max}$  étant habituellement pris égal à 40 correspondant à l'harmonique de fréquence 2 kHz.

Il va de soit que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le  $THD$ .

### Propagation des harmoniques

Les harmoniques sont dans la plupart des cas d'origine de courant, mais ces harmoniques, une fois injectés par les charges non-linéaires, se propagent à travers le réseau suivant la loi du diviseur de courant (figure 1.4).

Sachant que le courant et la tension sont couplés à travers la notion d'impédance, alors il se trouve que la tension est affectée à son tours par les distorsions harmoniques, plus ou moins sévères selon l'impédance du réseau. Alors s'il y a des charges

saines connectées approximativement, elles absorberaient des courants sous des tensions perturbées. La propagation des différentes séquences harmoniques dépendra des impédances directe, inverse est homopolaire du réseau. Ces impédances symétriques sont généralement égales pour les séquences directe et inverse, mais la séquence homopolaire dépend de plusieurs facteurs comme le régime du neutre, le couplage et les circuits magnétiques des transformateurs.

### Facteur de puissance et pertes par effet Joule

Le facteur de puissance est défini comme le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$  :

$$FP = \frac{P}{S} \quad (1.9)$$

En situation sinusoïdale, ceci est parfois appelé *facteur de déplacement*, qui est tout simplement égal au cosinus de l'angle entre la tension  $v$  et le courant  $i$ . Cependant, lorsque la tension et/ou le courant sont/est non sinusoïdal(aux), le facteur de puissance n'est plus le cosinus de l'angle entre  $v$  et  $i$ . Dans ce cas le *vrai facteur de puissance* est toujours donné par (1.9) en tenant compte de la contribution des harmoniques à la puissance active  $P$ . Il est à noter que le vrai facteur de puissance est souvent détérioré par rapport au facteur de déplacement [Gr93]. En effet, supposons une tension et un courant harmoniques qu'on peut exprimer en série de Fourier comme suit :

$$v = \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} V_h \sin(h\omega_1 t + \theta_h), \quad i = \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \delta_h) \quad (1.10)$$

Alors, les valeurs efficaces de tension et de courant seront :

$$V = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} V_h^2}, \quad I = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} I_h^2} \quad (1.11)$$

La puissance moyenne, quant à elle sera donnée par :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v i \, dt = \sum_{h=1}^{h_{max}} V_h I_h \cos(\phi_h) \quad \text{où} \quad \phi_h = \theta_h - \delta_h \quad (1.12)$$

Les taux de distortions en tension et en courant s'écrivent selon (1.7) comme :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1.13)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (1.14)$$

Ainsi, les valeurs efficaces peuvent être exprimées, tenant compte des équations (1.13) et (1.14) comme suit :

$$V = V_1 \sqrt{1 + (THD_v/100)^2} \quad (1.15)$$

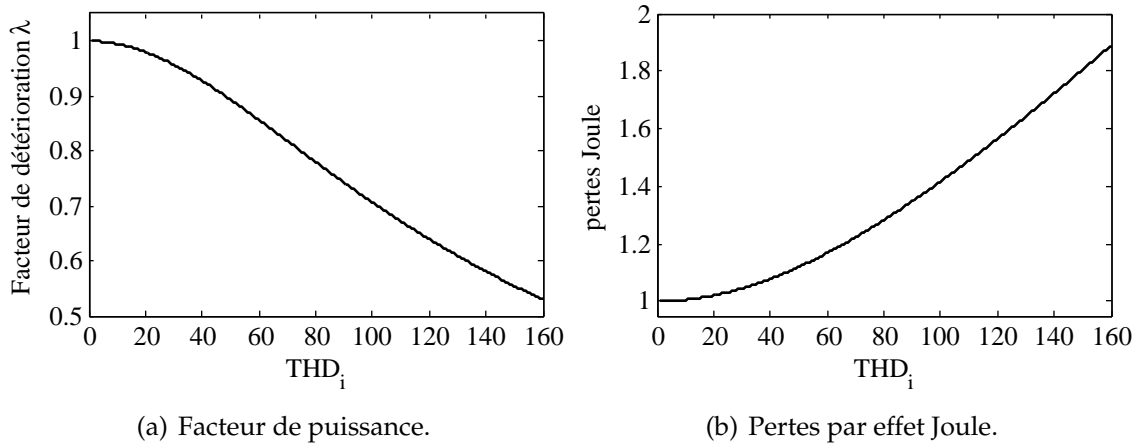


FIGURE 1.5 – Effet des Harmoniques sur le facteur de puissance et les pertes par effet Joule

$$I = I_1 \sqrt{1 + (THD_i/100)^2} \quad (1.16)$$

Le facteur de puissance peut être exprimé alors sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{V_1 I_1} \times \frac{1}{\sqrt{[1 + (THD_v/100)^2] \cdot [1 + (THD_i/100)^2]}} = \frac{P}{V_1 I_1} \times \lambda \quad (1.17)$$

L'équation (1.17) montre que le facteur de puissance en présence d'harmonique est dégradé par un coefficient dépendant des taux de distorsion en tension et en courant. Si on suppose une tension sinusoïdale, alors la puissance active serait portée uniquement à travers les fondamentaux, alors (1.17) peut être réécrite comme suit :

$$FP = \frac{V_1 I_1 \cos(\phi_1)}{V_1 I_1} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_i/100)^2}} = \lambda \cos(\phi_1) \quad (1.18)$$

Admettant un facteur de déplacement  $\cos(\phi_1)$  unitaire, La figure 1.5(a) illustre sa dégradation par le facteur  $\lambda$  en fonction du taux de distorsion harmonique du courant.

D'autre part, on peut facilement vérifier que les pertes par effets Joules peuvent être déduites comme suit :

$$p_j = RI^2 = RI_1^2(1 + (THD_i/100)^2) \quad (1.19)$$

Si on admet que les pertes Joule dues au fondamental sont 1 pu, alors l'effet des harmoniques est d'augmenter ces pertes comme le montre la figure 1.5(b).

## 1.4 Analyse des systèmes électriques perturbés

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux et équilibrés. Cependant les signaux

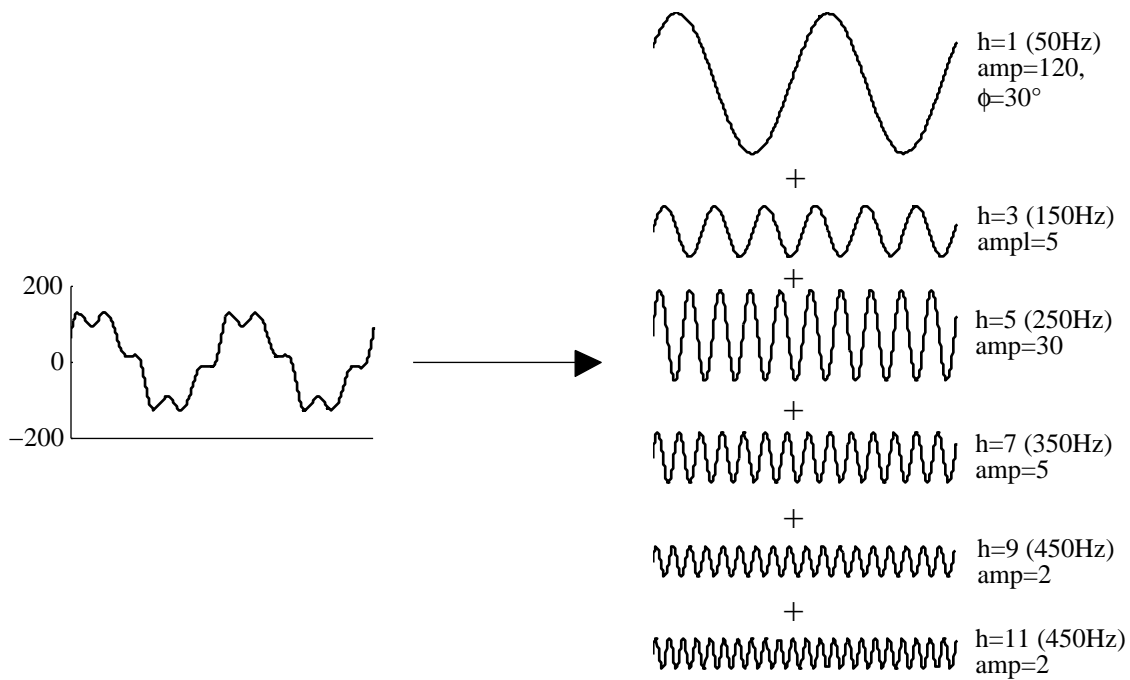


FIGURE 1.6 – Décomposition en composantes harmoniques.

électriques présents sur les réseaux et en particulier les courants sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux ni équilibrés.

L'analyse des signaux non sinusoïdaux et déséquilibrés est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les *harmoniques* et les *composantes symétriques*, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux et déséquilibrés) en composantes idéales et perturbations.

### 1.4.1 Décomposition en composantes harmoniques

Le concept d'harmonique a été introduit par Joseph Fourier, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des

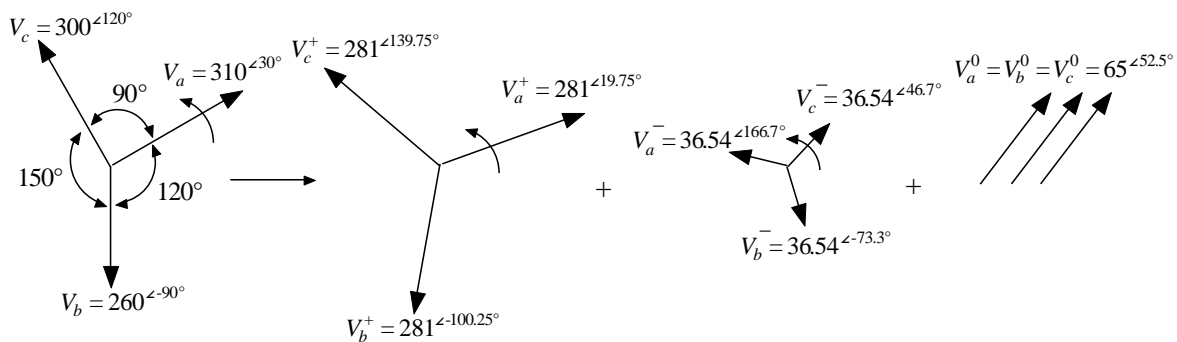


FIGURE 1.7 – Décomposition d'un système déséquilibré en composantes symétriques ; positive (+), négative (-) et homopolaire (0).

sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro est dite composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50 Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques, et sont multiples de la fréquence fondamentale.

La figure 1.6 illustre la décomposition du courant non sinusoïdal de la figure 1.1(d) en composante fondamentale et composantes harmoniques.

### 1.4.2 Décomposition en composantes symétriques

L'outil principal pour l'analyse des circuits déséquilibres est la *théorie des composantes symétriques* introduite par Charles Fourtiscue, qui stipule que tout système déséquilibré peut être décomposé en trois composantes équilibrées : *composante directe*, (positive-sequence), qui tourne dans le même sens que le système original, *composante inverse*, (negative-sequence), tournant dans le sens inverse, et *composante homopolaire* (zero-sequence), données par :

$$\begin{bmatrix} X_a^+ \\ X_a^- \\ X_a^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad a = e^{j2\pi/3} = 1^{\angle 120^\circ} \quad (1.20)$$

$X_a$ ,  $X_b$  et  $X_c$  représentent les courants ou les tensions triphasés,  $X_a^+$ ,  $X_a^-$  et  $X_a^0$  sont les composantes directe, inverse et homopolaire. La figure 1.7 montre la décomposition en composantes symétriques des tensions triphasées déséquilibrées de la figure 1.1(c).

### 1.4.3 Séquences harmoniques

Une charge non linéaire triphasée absorbe des courants triphasés donnés par :

$$i_a = I_{a0} + \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_{ah} \sin(h\omega_1 t + \phi_{ah}) \quad (1.21)$$

$$i_b = I_{b0} + \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_{bh} \sin\left(h(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}) + \phi_{bh}\right) \quad (1.22)$$

$$i_c = I_{c0} + \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2} I_{ch} \sin\left(h(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}) + \phi_{ch}\right) \quad (1.23)$$

Il n'est pas difficile de vérifier que chaque rang harmonique forme un système direct, inverse ou homopolaire. Pour  $h = 1$  le système est direct, (le système formé tourne dans le sens  $a - b - c$ ). Pour  $h = 2$ , le système est inverse car le sens de rotation est  $c - a - b$ , et pour  $h = 3$ , les courants sont en phase, ce qui forme un système homopolaire. De façon générale, si on tient compte uniquement des harmoniques impairs, (les harmoniques pairs sont très rares), alors, les séquences harmoniques peuvent être résumées comme suit :

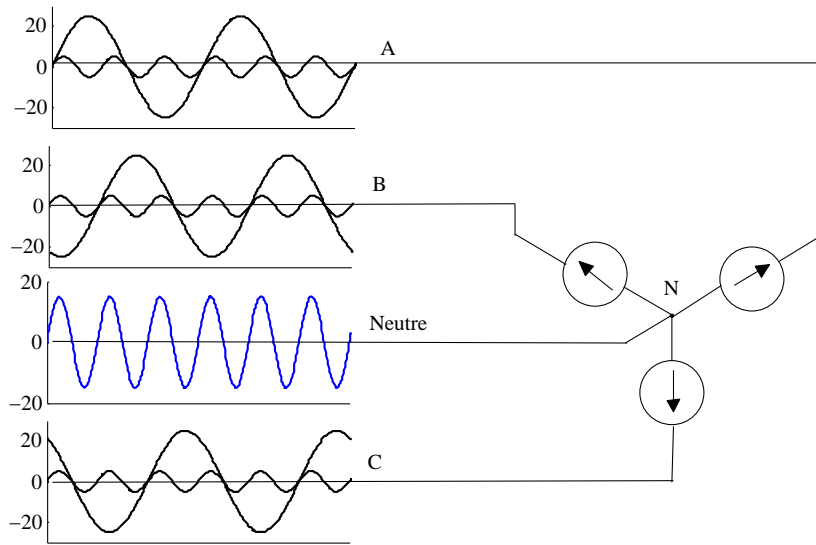


FIGURE 1.8 – Courant élevé dans le neutre à cause de l'harmonique 3.

- Les rangs donnés par  $6h + 1$ , i.e., 1, 7, 13, ... forment des systèmes directs ;
- Les rangs donnés par  $6h + 5$ , i.e., 5, 11, 17, ... forment des systèmes inverses ;
- Les rangs donnés par  $6h + 3$ , i.e., 3, 9, 15, ... forment des systèmes homopolaires.

### Particularité des harmoniques de séquence homopolaire

Les harmoniques de séquence homopolaire, (Les harmoniques impaires multiples de trois, i.e., 3, 9, 15, ...etc.), ont un comportement différents des harmoniques de séquences positive et négative, du fait qu'ils sont en phase. En effet, supposant une charge parfaitement équilibrée, couplée en étoile comme le montre la figure 1.8. Assumant que la charge en question absorbe un courant triphasé composé du fondamental et de l'harmonique 3. La somme des courants au point neutre  $N$  sera égale à trois fois le courant homopolaire dans chaque phase, du fait qu'ils sont en phase. Il en résulte un courant important que le fil neutre peut ne pas supporter.

### 1.4.4 Théorie énergétique

Les premiers essais de généralisation de la théorie énergétique sous distorsions harmoniques ont été introduits par Budeanu [Bu27]. Pour rappeler l'essentiel de cette théorie, soit la tension et le courant harmoniques de rang  $h$  donnés en forme complexe comme suit :

$$v_h = \sqrt{2}V_h e^{j(h\omega_1 t + \theta_h)}, \quad i_h = \sqrt{2}I_h e^{j(h\omega_1 t + \delta_h)}, \quad \text{où } \theta_h - \delta_h = \phi_h \quad (1.24)$$

La puissance réelle instantanée est définie comme suit :

$$p = \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2}\Re\{v_h\}\sqrt{2}\Re\{i_h\} \quad (1.25)$$

Avec  $\Re$  désigne la partie réelle. En remplaçant  $v_h$  et  $i_h$  par leurs expressions données en (1.24), on trouve l'expression de la puissance réelle instantanée  $p$ , dont l'intégration sur une période permet de calculer la valeur moyenne  $P$ , appelé par Budeanu *puissance active*, et donnée par :

$$P = \sum_{h=1}^{h_{max}} V_h I_h \cos(\phi_h) \quad (1.26)$$

La puissance imaginaire est définie par Budeanu comme la puissance qui est en quadrature avec la puissance réelle. Elle est donnée par :

$$q = \sum_{h=1}^{h_{max}} \sqrt{2}\Re\{v_h\}\sqrt{2}\Im\{i_h^*\} \quad (1.27)$$

Avec  $\Im$  désigne la partie imaginaire,  $i_h^*$ , le conjugué de  $i_h$ . Comme la puissance réelle, la puissance imaginaire ait une valeur moyenne appelée *puissance réactive*, et elle est donnée après développement et intégration sur la période de (1.27) par :

$$Q = \sum_{h=1}^{h_{max}} V_h I_h \sin(\phi_h) \quad (1.28)$$

Budeanu introduit une nouvelle quantité  $D$ , dite *puissance de distorsion*, (distortion power), donnée par :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.29)$$

Cette puissance serait due au produit vectoriel entre les harmoniques de différentes fréquences.

### Théorie énergétique généralisée

La définition de Budeanu introduit la notion de de puissance de distorsion, qui n'a pas de signification physique claire. D'autres analyses et définitions de la puissance électrique sous distorsions harmoniques existent [Fr31] [Em93] [De93] [Cz91] [Fe91]. Cependant, c'est la *théorie énergétique généralisée* introduite par Akagi et al [Ak83], qui permet une meilleure décomposition de tous les phénomènes perturbateurs, en tenant compte à la fois des distorsions harmoniques et des déséquilibres. L'auteur introduit trois types de puissances :

- La *puissance réelle*  $p$ , qui est la composante réelle de la puissance transmise par les composantes tournantes, (directe et inverse) de tous les harmoniques y compris le fondamental.
- La *puissance imaginaire*  $q$ , qui est la composante imaginaire de la puissance transmise par les composantes tournantes, (directe et inverse) de tous le harmoniques y compris le fondamental.
- La *puissance homopolaire*  $p_0$ , qui est la puissance transmise par les composantes homopolaires.

Ces puissances contiennent des parties *continues*, ou valeurs moyennes et des parties *oscillatoires* par rapport aux valeurs moyennes. Ces puissances résultent des produits entre harmoniques de diverses caractéristiques. Dans le cas de la puissance réelle

instantanée, la partie continue  $\bar{p}$  correspond à la partie réelle de la somme des produits entre harmoniques de mêmes fréquences et de mêmes séquences.

$$\bar{p} = \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_h^+ I_h^+ \cos(\phi_h^+) + \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_h^- I_h^- \cos(\phi_h^-) \quad (1.30)$$

Tandis que la partie oscillatoire  $\tilde{p}$ , elle correspond à partie réelle de la somme des produits entre harmoniques de natures différentes, i.e., de fréquences et/ou de séquences différentes

$$\tilde{p} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{h=1}^{h_{max}} \left( -3V_h^+ I_h^- \cos(2\omega_h t + \theta_h^+ + \delta_h^-) - 3V_h^- I_h^+ \cos(2\omega_h t + \theta_h^- + \delta_h^+) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_k^+ I_h^+ \cos((\omega_k - \omega_h)t + \theta_k^+ - \delta_h^+) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_k^- I_h^- \cos((\omega_k - \omega_h)t + \theta_k^- - \delta_h^-) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_k^+ I_h^- \cos((\omega_k + \omega_h)t + \theta_k^+ - \delta_h^-) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_k^- I_h^+ \cos((\omega_k + \omega_h)t + \theta_k^- - \delta_h^+) \right) \end{array} \right. \quad (1.31)$$

La même analyse est applicable pour la puissance imaginaire instantanée  $q$ . Ainsi sa partie continue  $\bar{q}$  sera :

$$\bar{q} = \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_h^+ I_h^+ \sin(\phi_h^+) + \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_h^- I_h^- \sin(\phi_h^-) \quad (1.32)$$

La partie oscillatoire  $\tilde{q}$  aura comme expression :

$$\tilde{q} = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{h=1}^{h_{max}} \left( 3V_h^+ I_h^- \sin(2\omega_h t + \theta_h^+ + \delta_h^-) - 3V_h^- I_h^+ \sin(2\omega_h t + \theta_h^- + \delta_h^+) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_k^+ I_h^+ \sin((\omega_k - \omega_h)t + \theta_k^+ - \delta_h^+) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_k^- I_h^- \sin((\omega_k - \omega_h)t + \theta_k^- - \delta_h^-) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_k^+ I_h^- \sin((\omega_k + \omega_h)t + \theta_k^+ + \delta_h^-) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_k^- I_h^+ \sin((\omega_k + \omega_h)t + \theta_k^- + \delta_h^+) \right) \end{array} \right. \quad (1.33)$$

Pour la puissance homopolaire, il n'y a pas de différence de séquence entre harmoniques, mais tout simplement une différence de fréquence. Ainsi pour la partie continue  $\bar{p}_0$

$$\bar{p}_0 = \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_h^0 I_h^0 \cos(\theta_h^0 - \delta_h^0) \quad (1.34)$$

Et la partie oscillatoire  $\tilde{p}_0$

$$\tilde{p}_0 = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_h^0 I_h^0 \cos(2\omega_n t + \theta_h^0 + \theta_n^0) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} 3V_k^0 I_h^0 \cos((\omega_k - \omega_h)t + \theta_k^0 - \delta_h^0) \right) \\ + \sum_{k=1, k \neq h}^{k_{max}} \left( \sum_{h=1}^{h_{max}} -3V_k^0 I_h^0 \cos((\omega_k + \omega_h)t + \theta_k^0 + \delta_h^0) \right) \end{array} \right. \quad (1.35)$$



## 1.5 Normes

Les normes limitant les distorsions harmoniques ont pour but de réduire leurs effets. Il y a deux organismes de normalisation dans ce domaine, qui sont IEEE, (Institute of Electrical and Electronics Engineers), et le IEC, (International Electrotechnical Committee). Le premier définit les normes de qualité dans la publication IEEE-519, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems* [IE92], tandis que le second organisme définit les normes de Compatibilité Electromagnétique, (*Electromagnetic Compatibility, EMC*), regroupées dans la publication IEC-61000. Ci-après, les trois normes IEC les plus importantes concernant les distorsions harmoniques [IEC93] [IEC98] [IEC00] :

**IEC 61000-2-2** : Elle établit les niveaux de compatibilité des tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension et elle a pour but, la protection des équipements raccordés au réseau. Les niveaux de compatibilité des taux individuels, (par rapport fondamental) des tensions harmoniques sont résumés dans le tableau 1.1. Cette norme limite à 8% le THD jusqu'au 40<sup>ème</sup> rang.

**IEC 61000-3-2 et IEC 61000-3-4** : Ces deux normes définissent les limites des émissions des courants harmoniques pour les équipements raccordés au réseau basse tension, dont le courant par phase est respectivement inférieur ou égal et supérieur à 16 A. L'objectif de ces limites est de réduire l'impact des courants harmoniques sur la tension, afin de respecter les limites de compatibilité fixées par IEC 61000-2-2. Les limites de ces émissions sont résumées dans les tableaux 1.2 et 1.3 respectivement pour les deux normes IEC 61000-3-2 et 3-4. Pour cette dernière, les limites sont calculées en pourcent par rapport au fondamental.

Il y a aussi la norme IEC 61000-3-6 qui limite les émissions des courants harmoniques des équipements raccordés au réseau moyenne et haute tension, ainsi que les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles. Cette norme fixe le THD limité à 6.5%.

## 1.6 Solutions de dépollution harmonique

L'amélioration de la qualité de l'énergie, et en particulier la dépollution harmonique a pour but de minimiser leurs impacts sur les charges et les équipements du réseau. Il y a deux stratégies principales pour la dépollution harmonique : *modification* et *compensation*.

### Modification

La stratégie de modification consiste à modifier les caractéristiques des charges ou des sources, afin de réduire la génération des harmoniques et leur propagation dans le réseau. On peut citer les exemples suivants :

- Remplacement des sources polluantes classiques par des topologies à prélèvement sinusoïdal, comme les redresseurs MLI, les structures multi-niveaux [Si08];

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Mon multiple de 3		Multiple de 3		pairs	
Rang $h$	Taux max. admissible (%)	Rang $h$	Taux max. admissible (%)	Rang $h$	Taux max. admissible (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2 + 1.3 \times 25/h$				

TABLE 1.1 – Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme IEC 61000-2-2).

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang	Courant max.	Rang	Courant max.
$h$	admissible ( $A$ )	$h$	admissible ( $A$ )
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$		

TABLE 1.2 – Limites des émissions des courants harmoniques (norme IEC 61000-3-2).

$h$	Taux max. admissible (%)	$h$	Taux max. admissible (%)
3	21.6	19	1.1
5	10.7	21	0.6
7	7.2	23	0.9
9	3.8	25	0.8
11	3.1	27	0.6
13	2	29	0.7
15	0.7	31	0.7
17	1.2	33	0.6

TABLE 1.3 – Limites des émissions des courants harmoniques selon la norme IEC 61000-3-4.

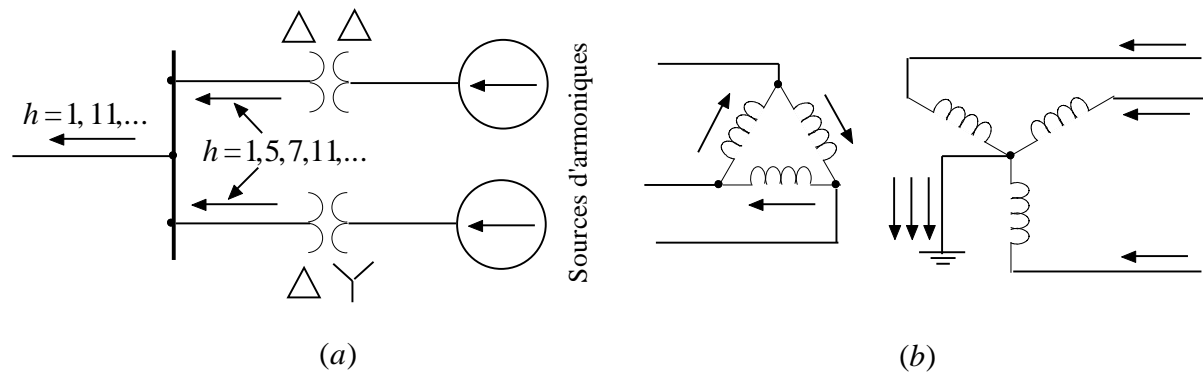


FIGURE 1.9 – Isolation des harmoniques par couplages spéciaux de transformateurs ; (a) Isolation du 5<sup>ème</sup> et 7<sup>ème</sup> harmoniques, (b) Isolation des harmoniques homopolaires.

- Le renforcement du réseau permet de réduire l'impédance totale en amont de la charge polluante, et ainsi de réduire l'impact des courants harmoniques sur les tensions et par conséquent protéger les charges saines ;
- Le mode de couplage des transformateurs peut servir à isoler certains harmoniques [Ma09]. On peut citer deux exemples intéressants illustrés sur la figure 1.9. Le premier peut servir de structure à prélèvement sinusoïdale vis-à-vis du réseau. En effet le 5<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup> harmoniques sont en général les plus persistants notamment dans les entraînements réglés. Avec ce montage, bien qu'ils circulent avant le jeu de barre, ils sont tout simplement annulés côté amont. Le deuxième exemple sur la figure montre l'influence du mode de couplage des transformateurs sur la circulation des courants homopolaires et par conséquent le courant du neutre : Le couplage Y- $\Delta$  ( $\Delta$  côté amont) est capable de contenir les courants homopolaires dans le  $\Delta$  sans qu'ils puissent sortir. On peut citer aussi le transformateur zigzag très utilisé pour le contrôle des courants homopolaires ;
- ...etc.

## Compensation

Cette deuxième stratégie sert à mitiger ou éliminer les composantes indésirables déjà générées par les charges polluantes. Dans cette stratégie, on trouve comme exemples la compensation de la puissance réactive par les procédés classiques ou modernes, mais aussi est surtout le filtrage d'harmonique. Ce dernier est aujourd'hui considéré comme la solution la plus adéquate vue la prolifération accélérée des charges non linéaires. La solution traditionnelle pour cette stratégie est le filtrage passif, néanmoins il devient de plus en plus difficile d'adapter cette solution classique aux évolutions des charges et des exigences, ce qui a donné naissance à une solution moderne qui est le filtrage actif.

### 1.6.1 Filtrage passif

C'est la solution classique pour le filtrage des harmoniques. Son principe est de piéger les fréquences indésirables dans des systèmes à éléments passifs (RLC),

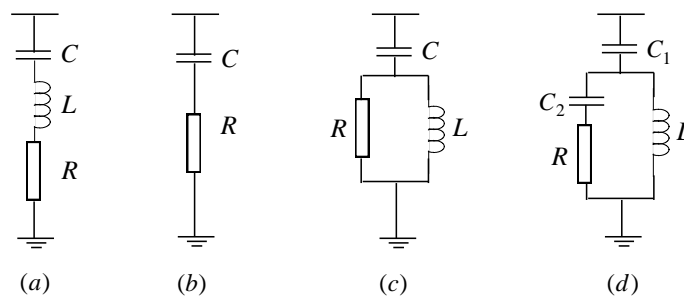


FIGURE 1.10 – Filtres passifs : (a) filtre résonant, (b) filtre amorti de 1<sup>er</sup> ordre, (c) filtre amorti de 2<sup>ème</sup> ordre, (d) filtre amorti de 3<sup>ème</sup> ordre.

connectés en série ou en parallèle avec le réseau et formants des impédances très faibles vis-à-vis des fréquences à filtrer. Un filtre série, essentiellement utilisé pour le filtrage des harmoniques de tension, agit comme un isolateur, c'est-à-dire qu'il doit manifester une impédance assez élevée face aux harmoniques afin de les empêcher de se propager.

Le filtre shunt (parallèle) est plus approprié pour le filtrage des courants harmoniques. Placé en dérivation avec le réseau, il est capable de fournir de la puissance réactive à la fréquence fondamentale. Plusieurs filtres passifs existent [Du04] :

### Filtre résonant

Le filtre résonant (figure 1.10) présente selon les valeurs accordées de  $L$  et  $C$  une résonance à la fréquence à éliminer, ainsi, en plus du fait qu'il faut prévoir un filtre pour chaque phase, il est aussi nécessaire un filtre pour chaque fréquence à filtrer. Bien que capable d'améliorer le facteur de puissance en plus du filtrage harmonique, le filtre résonant peut être à l'origine des phénomènes de résonance non souhaités avec les éléments du réseau, c'est pourquoi il est très recommandé de connaître le comportement du réseau-filtre passif en présence d'harmoniques.

### Filtre amorti

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti ; le filtre de premier ordre, le filtre de deuxième ordre et le filtre de troisième ordre (figure 1.10). Le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont de meilleures performances.

En pratique, il est courant de mettre en œuvre des filtres résonants en parallèle avec un filtre amorti comme le montre la figure. Les filtres résonants sont accordés pour l'élimination des harmoniques basses fréquences comme le 5<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup>, alors que le filtre amorti s'en charge des harmoniques supérieurs.

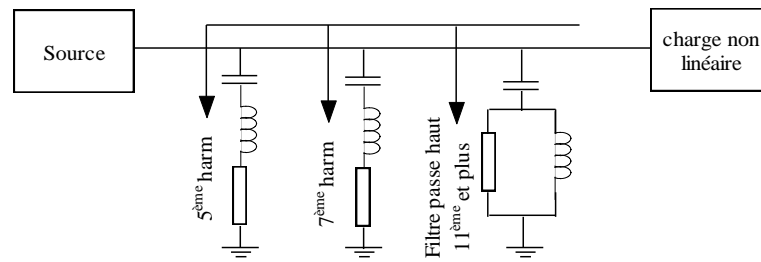


FIGURE 1.11 – Exemple pratique de combinaison de filtres passifs résonants et amortis.

## 1.7 Filtrage actif

Les solutions traditionnelles précédemment citées pour l'amélioration de la qualité de l'énergie, et particulièrement pour la dépollution harmonique peuvent avoir plus d'inconvénients que d'avantages, c'est pourquoi aujourd'hui le filtrage actif est la solution la plus souhaitable, surtout pour le filtrage harmonique.

Le principe de fonctionnement a été présenté au début des années 1970, et quelques années plus tard, un prototype à base d'onduleur utilisant des thyristors à commutation naturelle à vu le jour [Gy76] [Mo77]. Cependant, ce type de semi-conducteur a immédiatement posé le problème des harmoniques de commutation. Cette inconvénient a posé aussi le même problème lors de la mise en œuvre d'un compensateur de puissance réactive [Gr77]. C'est durant les années 1980 [Ak84] [Pe88], et surtout 1990 [Ak96] [Si99], que des progrès ont été réalisés grâce notamment à la technologie des semi-conducteurs, et en particulier à l'avènement des interrupteurs de puissance commandés en MLI comme le GTO et l'IGBT. De nos jours, les filtres actifs de puissance ont atteint une maturité technologique sans précédent. Ils sont utilisés pour la compensation des courants et tensions harmoniques, la compensation de la puissance réactive et la régulation de la tension, la compensation des déséquilibres des systèmes triphasés...etc. C'est pourquoi on parle ces dernières années de *conditionneur actif de puissance* (Active Power Conditioner) [Sa04] [Sa05].

### 1.7.1 Principe de filtrage actif

Le cœur d'un filtre actif est un convertisseur d'électronique de puissance, qui est en générale un onduleur connecté au réseau à travers des éléments passifs. Ce système commandé en courant ou en tension est alors capable de reproduire et d'injecter dans le réseau des composantes de tension ou de courant équivalentes, mais en opposition de phase aux composantes indésirables générées par les charges polluantes afin de les éliminer. Un filtre actif peut être raccordé au point de raccordement commun pour une compensation globale ou individuelle.

### 1.7.2 Classification des filtres actifs

On peut classer les filtres actifs selon plusieurs critères, comme sa configurations par rapport au réseau, le type d'onduleur qu'il utilise, le nombre de fils. Concernant la

configuration par rapport au réseau, on distingue le *filtre actif shunt*, *filtre actif série*, ou encore le *filtre universel*.

### Filtrage shunt

La configuration la plus utilisée, et sans doute la plus intéressante pour la dépollution des courants harmoniques est le filtre actif shunt ou parallèle [Ch00]. La figure 1.2(a) montre le schéma de principe de ce type de filtre, où l'onduleur est connecté au réseau à travers un filtre inductif, et éventuellement un transformateur. Du côté continu, l'onduleur utilise une capacité comme source de tension. Le but de cette configuration est de découpler les perturbations provoquées par la charge polluante du réseau électrique amont. La charge polluante représentée par un redresseur alimentant une charge RL absorbe un courant  $i_L$  qui contient outre le fondamental, des composantes harmoniques que le filtre actif doit éliminer en les injectant en sens inverse dans le réseau un courant harmonique  $i_c$ , ainsi le courant de source  $i_s$  reste sinusoïdal et éventuellement en phase avec la tension.

### Filtrage série

Cette configuration est utilisée pour garantir une onde de tension de qualité. Le schéma de principe de ce type de filtre est montré sur la figure 1.2(b), où l'onduleur de tension est cette fois-ci connecté au réseau à travers un filtre passif de type LC et un transformateur série. Le filtre actif doit injecter une certaine tension  $v_c$  à l'onde de tension  $v_L$ , perturbée par des distorsions harmoniques, déséquilibres [Ca94]...etc. Cette topologie peut jouer aussi le rôle d'un *restaurateur dynamique de tension* (Dynamic Voltage Restorer DVR) pour protéger la charge contre d'éventuels creux ou coupure de tension [Bh94].

### Filtrage universel

Cette configuration dont le schéma de principe est sur la figure 1.12(c) est une combinaison d'un filtre actif shunt et d'un filtre actif série, qui est souvent connue sous le nom de *Conditionneur Universel de la qualité de l'énergie*, (Unified Power Quality Conditioner UPQC) [Ka98] [Ar98] [Fu98] [Pr02]. Cette structure permet d'aller chercher plusieurs fonctions simultanément, servant à améliorer la qualité de la tension (compensation d'harmoniques, de puissance réactive, régulation et stabilisation de tension, etc.). Le filtre série a pour principales fonctions d'isoler les harmoniques entre la source et la charge polluante, de compenser la puissance réactive et les tensions déséquilibrées. Le rôle du filtre shunt est d'absorber les courants harmoniques, de compenser la puissance réactive, de compenser les courants de séquence négative, et de faire la régulation de la capacité du bus continu entre les deux filtres actifs.

## 1.7.3 Filtrage hybride

Il est possible de combiner entre des filtres actifs et passifs [Fu90] [Ak95] [Pe98] [Fu00] [Pe01] [Wa01]. Cette solution dite hybride est préconisée dans le but de réduire

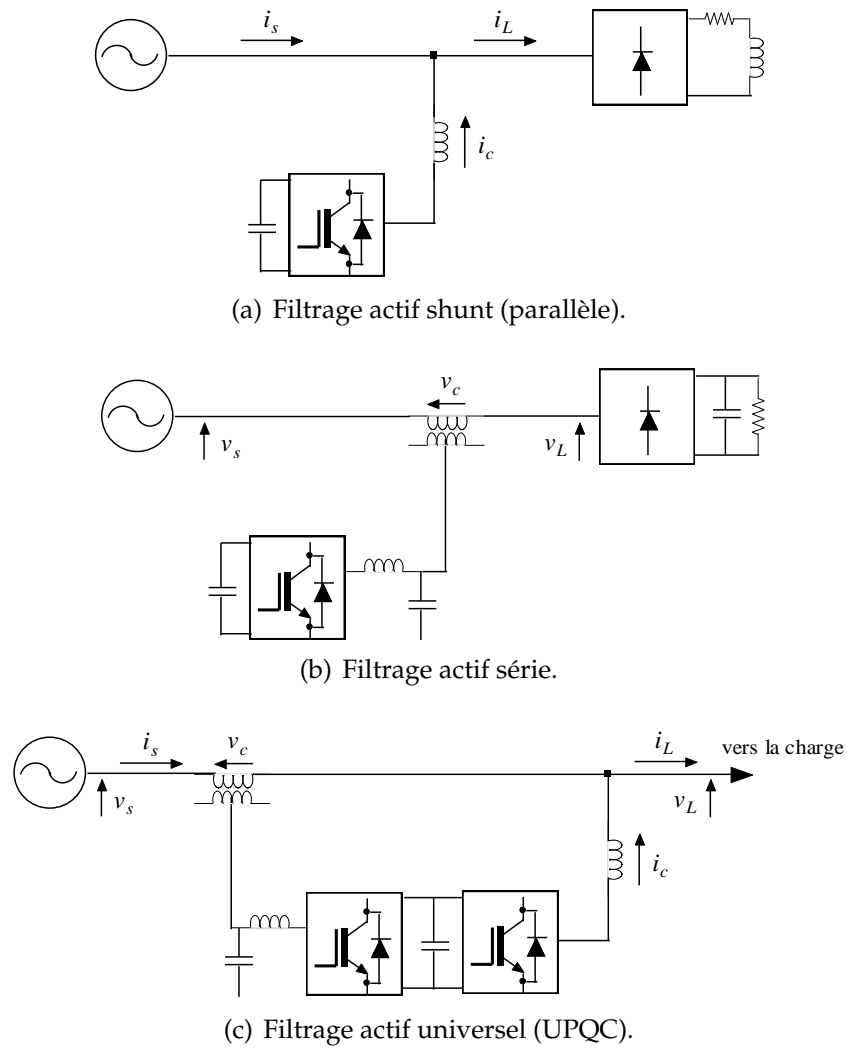


FIGURE 1.12 – Différentes topologies de filtrage actif.

la taille et par conséquent le coût du filtrage. Dans le cas général, un ou des filtres passifs sont accordés pour la suppression des harmoniques les plus persistants, alors que le filtre actif peut s'en charger de l'évolution de la charge et des rangs harmoniques élevés. Plusieurs combinaisons de filtres hybrides peuvent être imaginées, néanmoins, peu de structure sont réalisées en pratique et parmi lesquelles les deux exemples suivant :

### Filtre hybride shunt

Dans cette topologie (figure 1.13(a)), le filtre passif shunt sert à éliminer le rang le plus faible (le 5<sup>ème</sup> par exemple), tandis que le filtre actif shunt est conçu pour les autres rangs élevés. Néanmoins, le filtre actif peut aussi protéger contre d'éventuelle résonance entre le filtre le filtre passif et l'impédance du réseau.

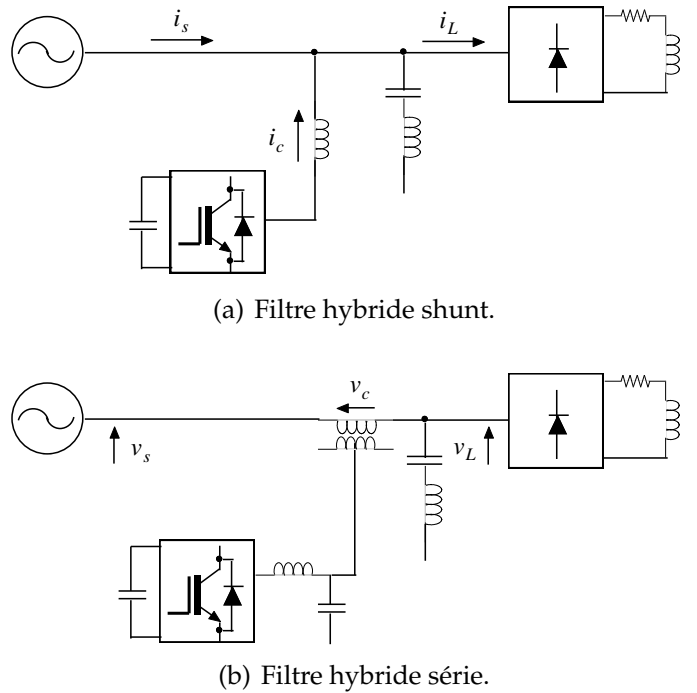


FIGURE 1.13 – Filtres hybrides.

### Filtre hybride série

Le filtre hybride série est composé d'un filtre active série et d'un filtre passif shunt (figure 1.13(b)). Le filtre actif est utilisé pour éliminer les problèmes (comme la résonance et l'influence de l'impédance de source), engendrés par le filtre passif et améliorer les performances de compensation. Le filtre passif a pour rôle de dévier les courants harmoniques par sa capacité de modifier localement l'impédance du réseau.

### Le convertisseur

Il y a deux types de convertisseurs pouvant servir de filtre actif : un onduleur de tension et un onduleur de courant (figure 1.14). Le premier utilise une source de tension continue représentée par une capacité alors que l'autre utilise une source de courant représentée par l'inductance. Cependant, en pratique, l'onduleur de tension est toujours le plus utilisé [Ak05], ceci pour son meilleur rendement mais aussi pour sa taille et par conséquent son prix.

## 1.8 Filtres actifs triphasés à quatre fils

Les filtres actifs triphasés à trois fils sont les premiers à connaître le succès, néanmoins, à partir des années 1990 un intérêt particulier a été porté sur les structures à quatre fils [Qu93] [Su97] [Ar97] [Si98] [Mi01] [Ro02] [Uc07], notamment pour la topologie shunt, et depuis, plusieurs travaux se sont sérieusement penchés sur cette solution qui serait plus intéressante pour les réseaux de distribution basse tension. En effet,



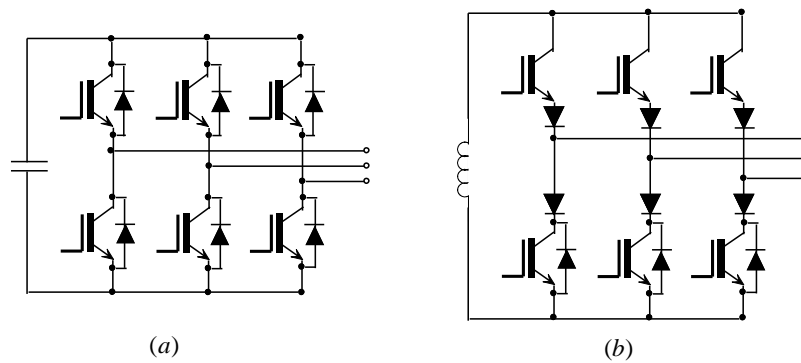


FIGURE 1.14 – Convertisseur de puissance applicables pour l’implémentation des filtres actifs triphasés ; (a) onduleur de tension, (b) onduleur de courant.

la plupart des charges connectées au réseau basse tension sont monophasées, utilisant le fil neutre (quatrième fil). Ce type de charge est généralement connu pour son courant très pollué en harmoniques, sans oublier les déséquilibres qui sont généralement inévitables et qui sont responsables de la surcharge du fil neutre.

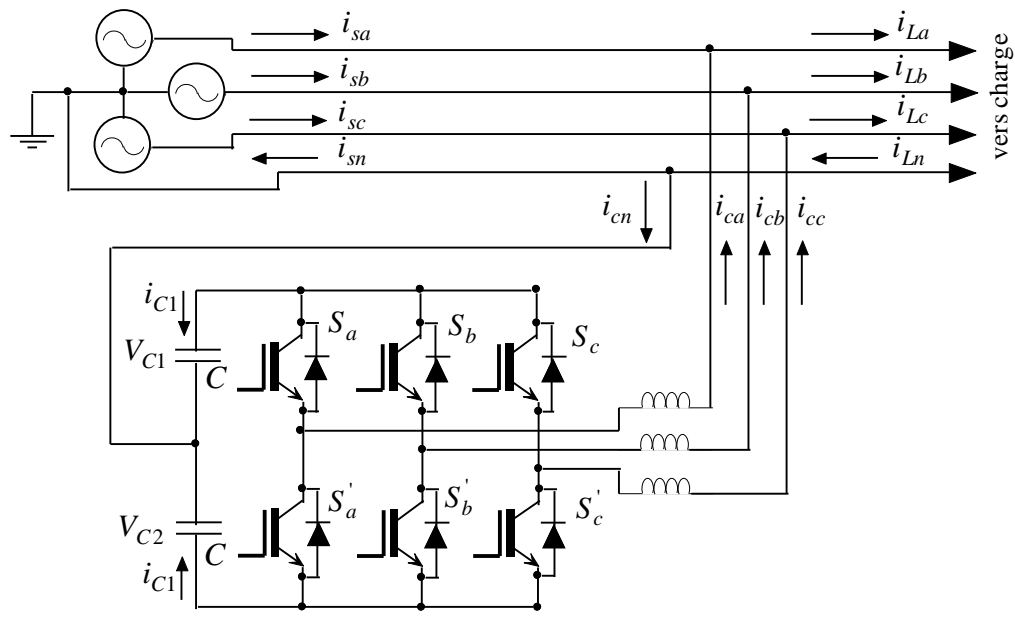
Le filtre actif triphasé à quatre fils offre les qualités d’un filtre à trois fils plus la mitigation ou l’élimination du courant dans le neutre. L’implémentation de cette topologie de filtre actif peut être réalisée en utilisant deux structures d’onduleur de tension :

- Onduleur à trois bras, dit TLSC-VSI (Three-Leg Split-Capacitor Voltage Source Inverter) ;
- Onduleur à quatre bras, dit FLFB-VSI (Four-Leg Full-Bridge Voltage Source Inverter).

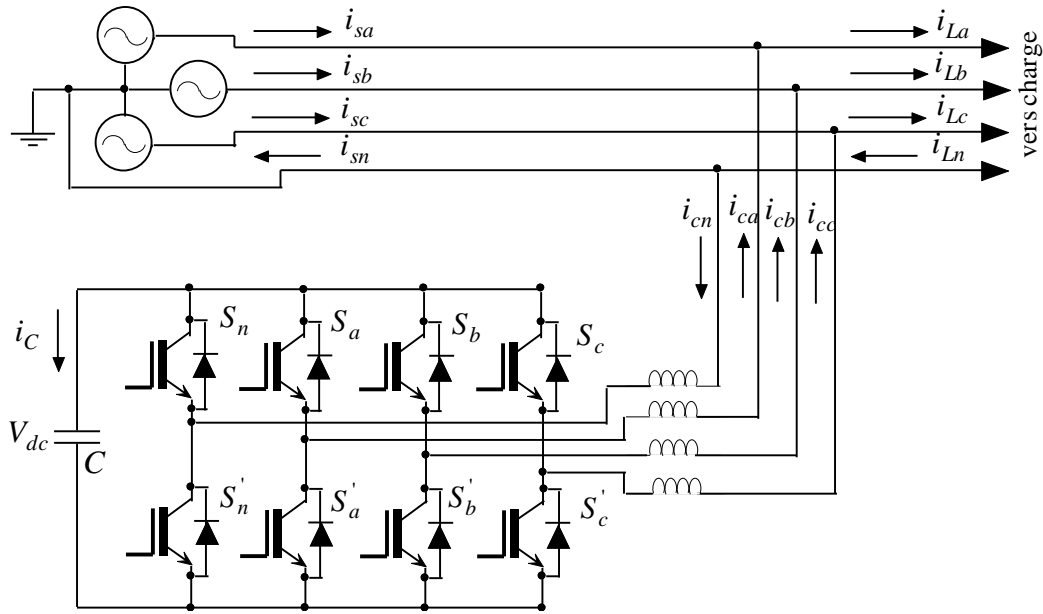
La première structure (TLSC), montrée sur la figure 1.15(a) est plus intéressante de point de vue économique, car elle utilise un onduleur triphasé conventionnel avec les six semi-conducteurs nécessaires. Cependant, elle a besoin d’un bus continu plus compliqué de point de vue contrôle par rapport à la structure FLFB. En effet, ce bus est formé par deux capacités en cascade, dont le point milieu est connecté au neutre du réseau. Cette connexion sert à compenser les courants homopolaires, mais le déséquilibre des tensions aux bornes des deux capacités pose un problème supplémentaire au contrôle du filtre actif.

La deuxième structure est montrée sur la figure 1.15(b). Le bus continu utilise une capacité et le fil neutre est connecté cette fois-ci à un quatrième bras. Cette structure simplifie le contrôle du bus continu au prix d’un quatrième bras. De point de vue performances, la structure à quatre bras permet une meilleure exploitation, et réduit sensiblement la taille du bus continu, contrairement à la structure à trois bras qui a souvent besoin d’un bus continu plus large et d’un niveau de tension plus élevé. Néanmoins, outre le nombre de semi-conducteurs réduit, la structure TLSC présente un grand avantage à cause de la nature découplée des trois phases, qui permet un contrôle plus simple.

Au début des années 2000 une nouvelle structure est proposée [Mi01] [Ro02]. Celle-ci combine entre les deux structures sus-citées. Cette structure dite à FLSC, (Four-leg Split-Capacitor) est illustrée sur la figure 1.16. Sensée avoir les avantages des deux topologies, néanmoins cette nouvelle structure semble plus complexe.



(a) Onduleur de tension type TLSC.



(b) Onduleur de tension type FLFB.

FIGURE 1.15 – Différentes structures d'onduleur de tension pour l'implémentation de filtre actif à quatre fils.

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de faire la lumière sur les principales perturbations qui peuvent prendre naissance dans les réseaux de distribution, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements essentiels existant dans le réseau, et les installations industrielles. Nous avons vu que la dégradation de la qualité de l'énergie

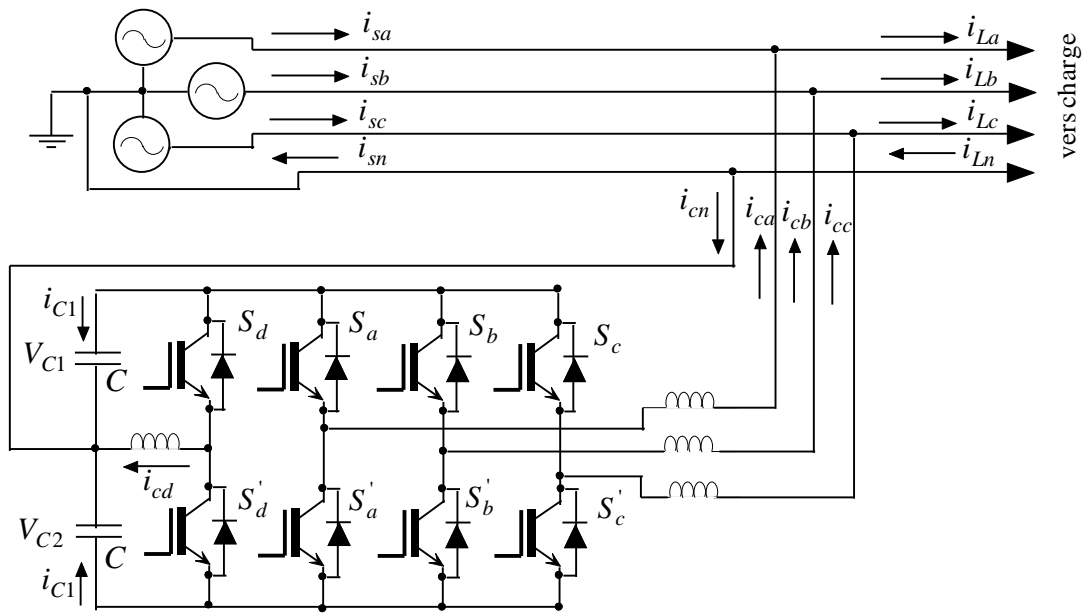


FIGURE 1.16 – Filtre actif shunt à base d’onduleur de tension de type FLSC.

peut conduire à une modification du comportement des performances ou même de la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques. Par ailleurs, l’analyse des causes principales de la dégradation de la qualité de l’énergie, nous laisse responsabiliser d’avantage l’utilisateur sur cette dégradation notamment les gros consommateurs industriels, surtout quant il s’agit des harmoniques de courant. Le distributeur a aussi sa part de responsabilité liée essentiellement à la maîtrise de gestion de son réseau. Cependant les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité, car les solutions existent, et doivent être prise par chacun des deux partenaires afin de minimiser les effets des perturbations et de garantir une électricité de qualité. S’agissant de la pollution harmonique, le filtrage actif, vue ses qualités adaptatives, il est actuellement la solution la plus adéquate pour en remédier. Le prochain chapitre fera l’objet d’étude d’un cas particulier de ces filtres qui est le filtre actif à quatre fils.