

## **Introduction**

La tension fournie par les exploitants de réseaux électriques à leurs clients doit être sinusoïdale triphasée et équilibrée. Toutefois, à cause de multiples perturbations d'origines diverses (imperfections des générateurs et des lignes, perturbations atmosphériques lors du transport, charges défaillantes...), la tension dont dispose un client à son point de raccordement est plus ou moins dégradée. Parmi les défauts les plus courants on dénombre :

- Les déséquilibres,
- Les coupures ou micro-coupures ( $\approx 100\text{ms}$ ),
- Les flickers,
- Les chutes de tension,
- Les pollutions harmoniques.

La pollution harmonique se caractérise par une distorsion plus ou moins importante de l'onde de tension distribuée. Ce chapitre se consacre exclusivement au problème de pollution harmonique. Après avoir étudié le phénomène de pollution harmonique et présenté ses principales causes et effets sur les réseaux et matériels connectés, les diverses solutions envisageables ou existantes pour limiter cette pollution sont exposées et principalement le filtrage.

**Définition de la pollution harmonique** : c'est l'altération de la forme d'onde sinusoïdale du courant et/ou de la tension engendrée par certaines charges électriques dites charges non-linéaires présentées dans le tableau (1). Ce genre de signal, à supposer que la périodicité du signal ne soit pas atteinte, peut être décomposée en une somme de sinusoïde de fréquence (n.f) tel que  $n \in \mathbb{N}$  et f est la fréquence du signal.

Pour  $n = 1$  la sinusoïde est dite fondamentale.

Pour  $n > 1$  les sinusoïdes sont dites harmoniques d'ordre supérieur.

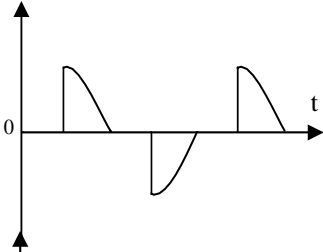
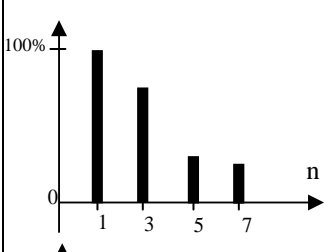
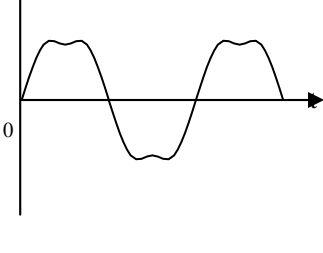
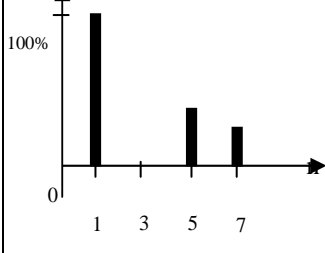
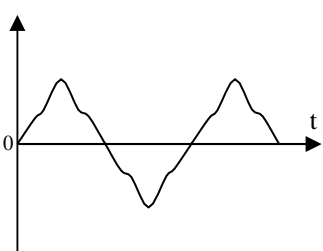
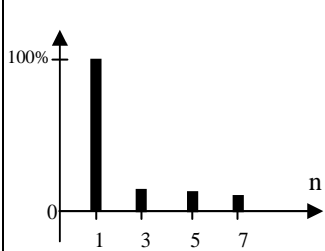
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Specre harmonique Correspondant
- Gradateurs monophasé (commande par angle de phase).	- Régulation de puissance de fours à résistances, - Modulation de puissance des lampes halogènes.		
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		
- Moteur asynchrone.	- Machines-outils, - Appareils électroménagers, - Ascenseurs.		

Tableau I.1 : principales charges polluantes.

Le signal peut éventuellement contenir une composante continue qui présente la valeur moyenne du signal. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série de Fourier.

Dans le cas où la tension et le courant seraient non-sinusoidaux, ils peuvent être mis sous la forme donnée respectivement par (I.1) et (I.2) :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n \sqrt{2} \sin(n \cdot \omega \cdot t - \alpha_n) + V_0 \tag{1}$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sqrt{2} \sin(m \cdot \omega \cdot t - \beta_m) + I_0 \tag{2}$$

**Caractéristiques de l'onde de tension et de courant**  
**Valeurs efficaces**

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont données respectivement par les équations (3) et (4)

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (3)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (4)$$

### La puissance apparente

La puissance apparente est la puissance disponible, son expression est donnée par l'équation (5)

$$S = VI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (5)$$

### Les puissances actives, réactives et déformantes

1- La puissance active est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watt, son expression est donnée par l'équation (6)

$$P = \frac{1}{T} \int_T v(t) \cdot i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (6)$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h \quad (7)$$

$\alpha_h$  : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h,

$\beta_h$  : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h,

$\varphi_h$  : Déphase de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

2- La puissance réactive est une puissance qui est absorbée au réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par (8)

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (8)$$

3- La puissance déformante est donnée par (9)

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \cdot \sum_{\substack{h=1 \\ n \neq h}}^{\infty} I_h^2} \quad (9)$$

Cette puissance est véhiculée par les tensions et les courants harmoniques de rang différents, elle est dite puissance déformante et notée  $D$ .

### Facteur de puissance

Le facteur de puissance est donné par (10)

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (10)$$

Pour une meilleure compréhension, nous allons mettre en évidence quelques effets des harmoniques dans le cas où la tension est sinusoïdale :

- Valeur efficace de la tension et du courant :

$$v(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega \cdot t - \alpha_1) \quad (11)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h \cdot \omega \cdot t - \beta_h) \quad (12)$$

$$\text{Avec : } \varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1$$

- Puissance active et réactive :

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (13)$$

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (14)$$

- Facteur de puissance :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{P^2 + Q^2}}} \quad (15)$$

De l'équation (12), nous pouvons conclure que les courants harmoniques accroissent la valeur efficace, donc il aura une augmentation des pertes par effets Joules.

Les composantes harmoniques véhiculent une puissance harmonique dite déformante, parce qu'elle est créée par les harmoniques et que ces derniers déforment l'onde sinusoïdale, cette puissance est de nature réactive car les composantes harmoniques ne contribuent pas à la production de la puissance active.

De (15), nous pouvons aisément voir que  $F$  est inférieur à 1, les harmoniques réduisent le facteur de puissance donc réduisent la puissance disponible.

### Origines des harmoniques

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs ...) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de vitesse de moteurs à courant continu et alternatif, ainsi que dans les alimentations des ordinateurs (figure 1).

Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels ...

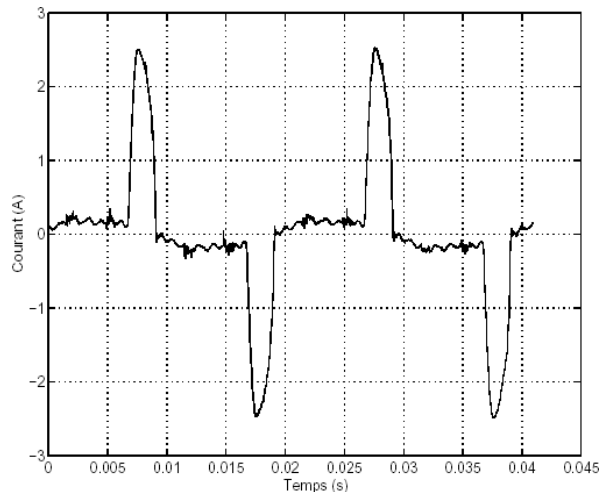


Figure 1 : Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur .

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ils sont considérés comme des charges non-lineaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension.

### Conséquences de la pollution harmonique

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement et l'interférence avec les réseaux.

- **L'échauffement** : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P_{\text{pertes}} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 R \quad (16)$$

Avec  $I_h$  le courant harmonique de rang  $h$  qui représente le fondamental pour  $h=1$ , et  $R$  la résistance traversée par le courant  $I_h$ . Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...). Ce sont des effets à termes qui se traduisent par une fatigue prématurée amenant à un déclassement des équipements. Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent remarquablement le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs,....

- **Le vieillissement des isolants** est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence des harmoniques, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateur, disjoncteur...).

- **L'interférence dans les systèmes de télécommunication**

- **Dysfonctionnement de certains équipements électriques** : En présence des harmoniques, la tension ou/et le courant peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période, par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

- **Le risque d'excitation de résonance** : C'est des effets instantanés, les équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des fréquences d'harmoniques. C'est le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques, il peut apparaître des surtensions ou des surintensités qui puissent détériorer les câbles, les transformateurs, les systèmes de protection, les batteries de capacité....

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

□ le taux harmonique de rang  $h$  :

$$THh = \frac{f_h}{f_1} \quad (17)$$

Où  $f_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$ ,  $f_1$  représente la composante fondamentale,

□ Le taux global de distorsion harmonique : On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant :

$$THD (\%) = 100 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{f_h^2}{f_1^2}} \quad (18)$$

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz (rang 50), ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevées sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

□ Le facteur de puissance :

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), apparaît comme le montre la définition donnée par C. Budeanu et approuvée par un groupe de travail IEEE en 1977.

C. Budeanu a eu donné les définitions des puissances dans le cas périodique non-sinusoïdal :

La puissance active dans le cas périodique non-sinusoïdal est définie par :

$$P = \sum_n P_n = \sum_n U_n I_n \cos \Phi_n \tag{19}$$

Où :  $U_n$  et  $I_n$  sont les valeurs RMS (Real Mean Square) de la tension et du courant harmonique d'ordre n, et  $\Phi_n$  est le déphasage entre eux. La puissance réactive est définie par :

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \Phi_n \tag{20}$$

Cependant, ces définitions ne sont pas conformes à l'équation de triangle des puissances :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{I.21}$$

La puissance apparente est définie par :

$$S^2 = U^2 I^2 = \sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2 \tag{22}$$

Alors :

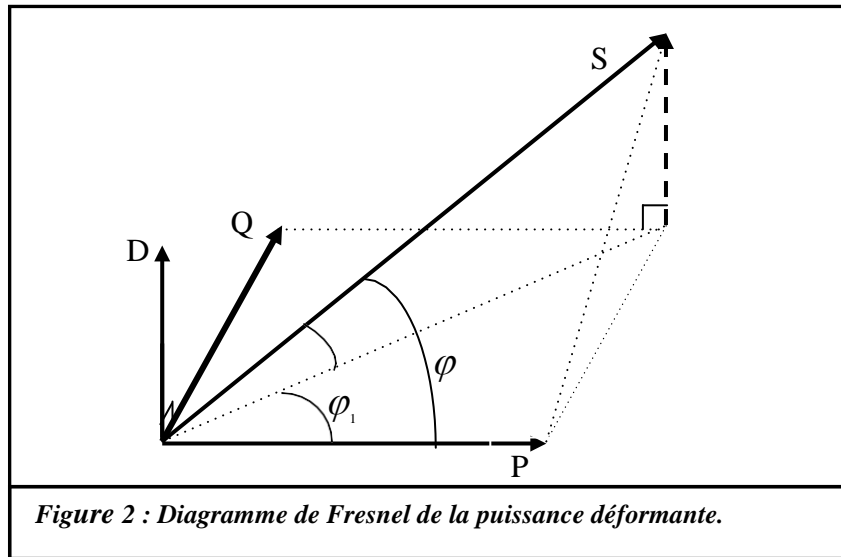
$$S^2 = \sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2 = \left( \sum_n U_n I_n \cos \Phi_n \right)^2 + \left( \sum_n U_n I_n \sin \Phi_n \right)^2 \tag{23}$$

Donc une quantité nommée la puissance déformante est ajoutée par C. Budeanu selon l'équation suivante :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \tag{24}$$

On peut donc écrire la puissance apparente de la manière suivante :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{25}$$



La puissance déformante se compose principalement des produits croisés de la tension et du courant harmonique de différents ordres et sera réduite à zéro si les harmoniques sont réduits à zéro, c.-à-d. aux conditions sinusoïdales.

$$D = \sqrt{\sum_{\substack{i=2 \\ j=2 \\ i \neq j}}^{\infty} U_i^2 I_j^2} \tag{26}$$

Si uniquement le courant est non-sinusoidal alors :

$$D = U_1 \sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2} \tag{27}$$

L'inconvénient majeur de cette définition est qu'il n'est pas sûr que le facteur de puissance sera égal à l'unité si la puissance réactive (par cette définition) est réduite à zéro et que la puissance réactive peut être totalement compensée en insérant des composants inductifs ou capacitifs.

□ Le facteur de puissance (F.P.) devient :

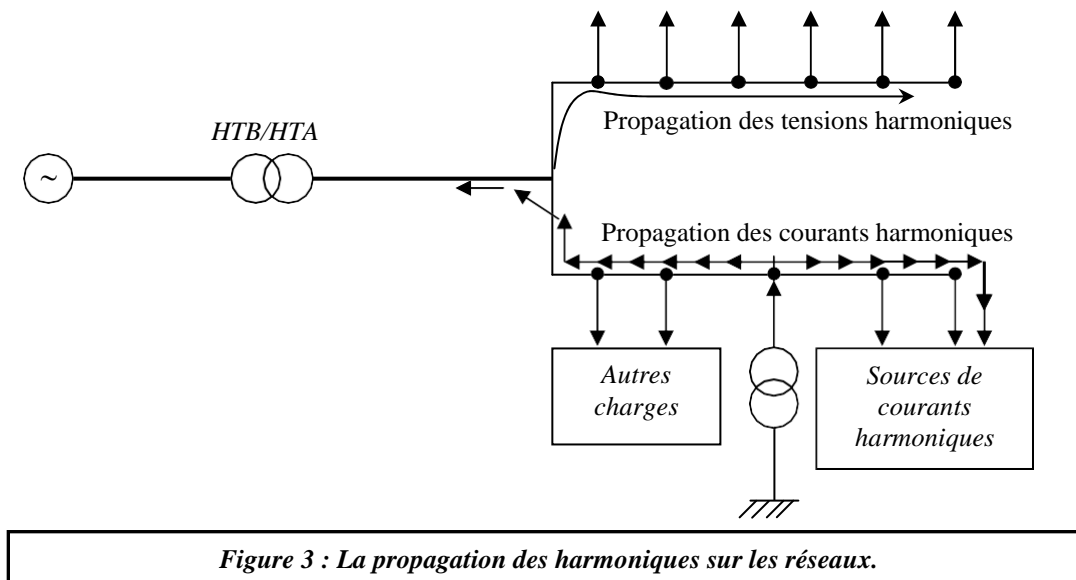
$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi \cdot \cos \gamma \tag{28}$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

## LA PROPAGATION DES HARMONIQUES SUR LES RESEAUX

Soit un transformateur HTB/HTA alimentant deux départs moyenne tension. L'un de ces départs comporte une source harmonique. Le réseau de distribution est composé par des lignes et des transformateurs. Comme l'impédance des charge est nettement grande que celle des lignes, une part importante du courant harmonique tend à circuler en direction des postes sources (les courants harmoniques remontent à la source car ils suivent le parcours le moins impédant). Aussi, le problème de propagation des harmoniques de courant se ramène à l'étude d'un simple diviseur de tension étant donné que le jeu de barre HTA vu de départ propre apparaît comme une source de tension.

La propagation des harmoniques sur le réseau est schématisée dans la figure 3 :



### Norme et réglementation

Dans le but :

- D'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la présence des harmoniques.
- D'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été élaborées par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité- Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International). Il arrive que des entreprises édictent leurs propres règles, notamment EDF en France. Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF sont données dans le tableau ci-dessous:

<i>Rangs impairs</i>	$I_h/I_1(\%)$	<i>Rangs pairs</i>	$I_h/I_1(\%)$
3	4	2	2
5 et 7	5	4	1
9	2	>4	0,5
11 et 13	3		
>13	2		

**Tableau I.2 : Limitation des courants harmoniques édictée par EDF**

Les limitations en tension harmonique que les clients de EDF doivent respecter sont :

- Pour un harmonique pair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 0.6\%$
- Pour un harmonique impair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 1\%$
- Pour le taux de distorsion global de tension :  $THD \leq 1.6\%$ .

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains.

Concernant la puissance réactive, EDF autorise ses clients à en consommer, sans être facturés, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance ( $\cos\varphi \geq 0.928$ ) ou par un angle de phase ( $\varphi \geq 21.8^\circ$ ).

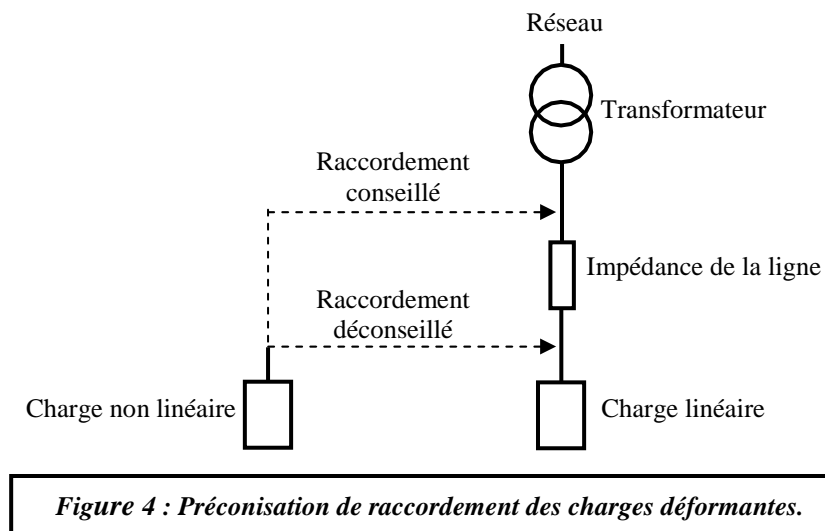
## STRATEGIES DE LIMITATION DES HARMONIQUES

### Stratégies classiques

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

En effet, le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible (transformateur le plus puissant par exemple). Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante, ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques. Aussi, les charges polluantes doivent être raccordées le plus en amont possible de la source afin de bénéficier du niveau le plus élevé de puissance de court-circuit. Fig.4

D'autre part, il faut éviter de raccorder un récepteur sensible à proximité d'une charge déformante .



**Figure 4 : Préconisation de raccordement des charges déformantes.**

- Augmentation de la puissance de court-circuit :  
L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle et d'autant plus réduite si la puissance de court-circuit est grande.
  
- Pont dodécaphasé :  
Le redresseur triphasé en pont ne laisse que les harmoniques  $12k \pm 1$  au primaire du transformateur. Nous obtiendrons le même résultat en utilisant deux transformateurs ayant respectivement pour montage triangle-étoile et étoile-étoile. Cependant, cette solution augmente l'impédance de la ligne et par voie de conséquence la distorsion harmonique de tension. En plus, le nombre des semi-conducteurs utilisés et le

transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.

- L'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique (redresseur MLI), et en jouant aussi sur les stratégies de commande des onduleurs.

### **Filtrage passif**

Le filtrage passif se fait par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance devant l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer, le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique pour le quel le filtre a été dimensionné, sera dévié à travers ce dernier. Le facteur de qualité, le rapport de la résistance ou de la capacitance résonante par rapport à la résistance du filtre, que détermine la précision de l'accorde doit être assez élevé, supérieur à 50, toutefois la bande passante étant inversement proportionnel au facteur de qualité, de forte valeur de ce dernier peut être gênante dans le cas d'un filtre même légèrement désaccordé.

Des filtres passifs dit amortis peuvent aussi être aussi utilisés. Ils sont conçus de telle sorte à filtrer une plage de fréquence, ils sont généralement utilisés avec un faible facteur de résonance car pour ce genre de filtres, ce facteur de qualité est défini comme le rapport de la résistance sur la réactance.

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

- Le filtre résonant (ou filtre de type shunt) ;
- Le filtre amorti.

### **Filtre résonant**

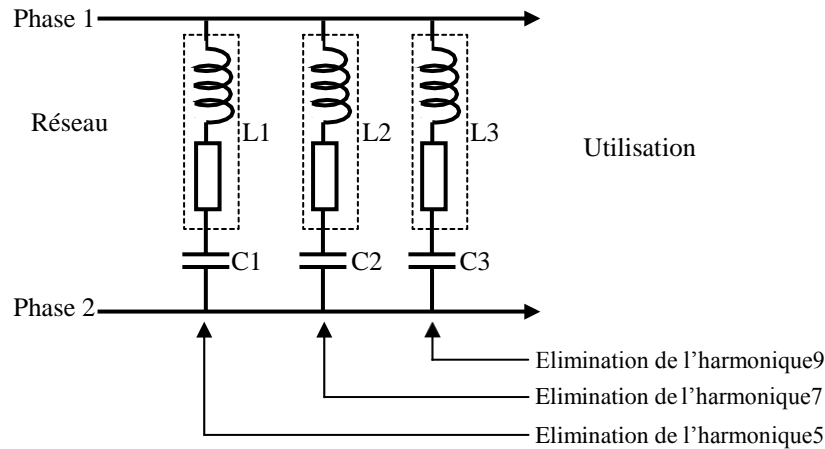
Le filtre résonant (ou filtre shunt) est composé d'une inductance  $L$  en série avec un condensateur  $C$ .

Les valeurs d'inductance  $L$  et de capacité  $C$  sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer (Fig.5).

Un filtre shunt efficace doit posséder un grand facteur de qualité  $Q$ . Celui-ci s'exprime par la relation suivante :  $Q = Z / r$ , avec  $r \ll x$  soit :  $Q = x / r$  puisque  $Z = \sqrt{r^2 + x^2}$ .

L'ordre de grandeur de ce facteur est de 75.



**Figure 5 : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.**

### Filtre amorti

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance.

Il est moins sélectif, atténuant les harmoniques supérieurs ou voisins de son rang d'accord. La figure (7) représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence.

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

Pour des installations utilisant le filtrage harmonique, on peut concevoir de mettre en œuvre un filtre résonant pour les rang 5 et 7, associé à un filtre amortie accordé pour h égale à 13.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Equipements volumineux,
- Problème de résonances avec l'impédance du réseau,
- Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de varier.
- Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.

Ces inconvénients et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont permis d'envisager de nouvelles solutions aux perturbations du réseaux électrique.

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs.

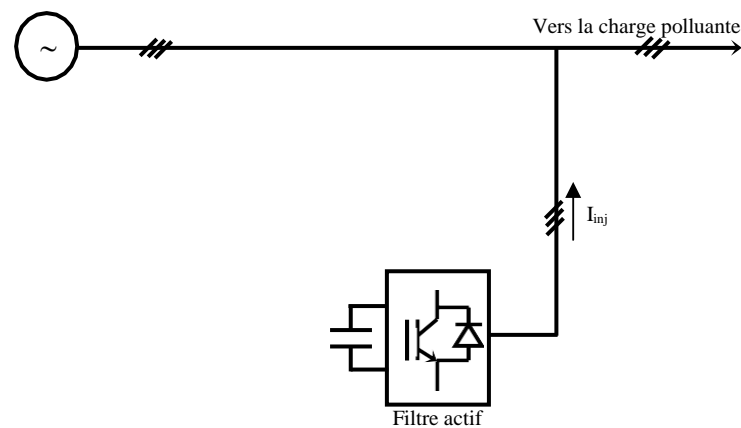
Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique [47].

Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs - passifs.

### Le filtre actif parallèle (F.A.P)

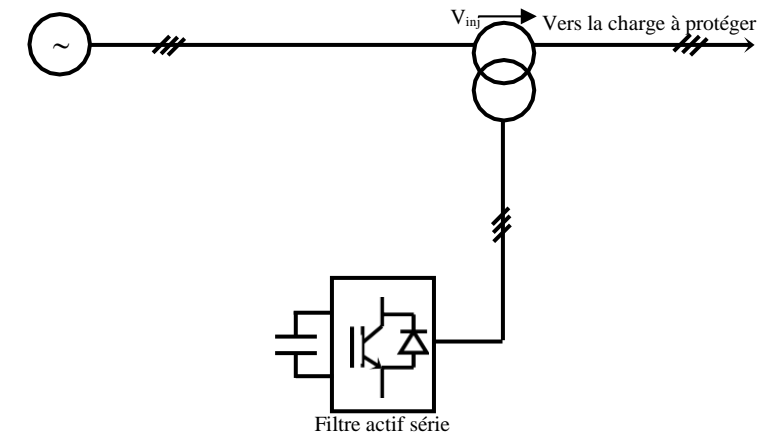
Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la FigI.8, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [13, 46, 61]. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du *filtre actif parallèle (F.A.P)* consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.



**Le filtre actif parallèle**

**Filtre actif parallèle :** Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig.(I.9), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des

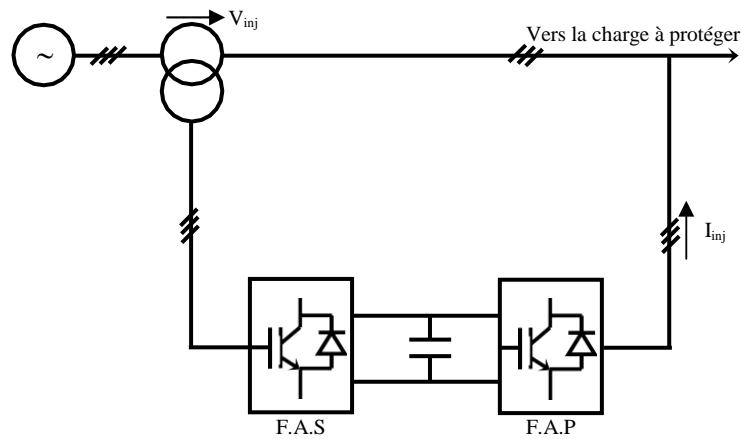
courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.



**Figure 9 : Filtre actif série**

**La combinaison parallèle-série actif (UPQC)**

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*, résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Fig(I.10). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [24, 58].



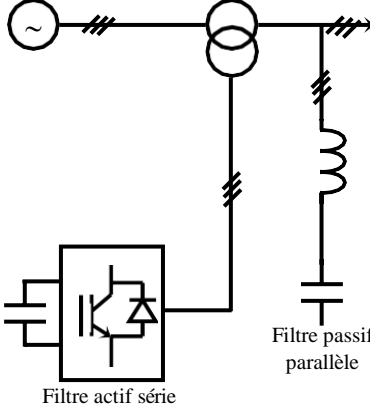
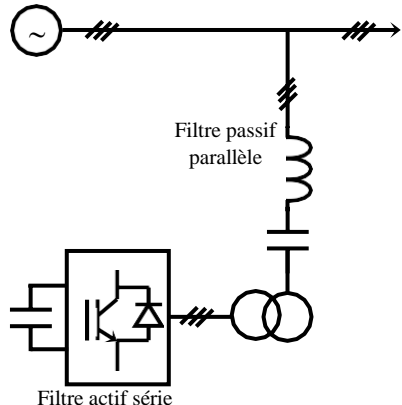
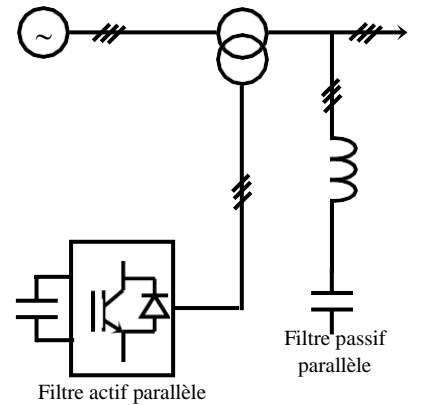
**La combinaison parallèle-série actif (UPQC)**

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*

<i>Filtre actif série avec des filtres passifs parallèle.</i>	<i>Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèle.</i>	<i>Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.</i>
 <p data-bbox="188 1249 545 1462">Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.</p>	 <p data-bbox="571 1249 970 1541">Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le travers est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.</p>	 <p data-bbox="997 1249 1417 1720">Il a le rôle de compenser des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type déjà été appliqué à la compensation des courants harmonique émis par un cycloconvertisseur de forte puissance.</p>
<p><b>Tableau 3: Autres configurations du filtre.</b></p>		

Des trois solutions possibles présentées (filtres passifs, actifs et hybrides), on ne s'intéresse dans cette étude qu'au filtre actif, et en particulier, au filtre actif parallèle. Ce choix a été arrêté par le fait que le filtre actif est un dispositif bien connu, très développé et déjà commercialisé. On le considère donc comme un outil support pour nos travaux, à

savoir pouvoir synthétiser et tester des structures de contrôle avancées qui seront présentées dans le chapitre suivant.

Les filtres actifs parallèles de puissance sont composés d'un onduleur connecté au réseau à travers d'un filtre de nature inductive. Ils sont connectés avec ou sans transformateur en parallèle avec le réseau comme le montre la Figure (11) :

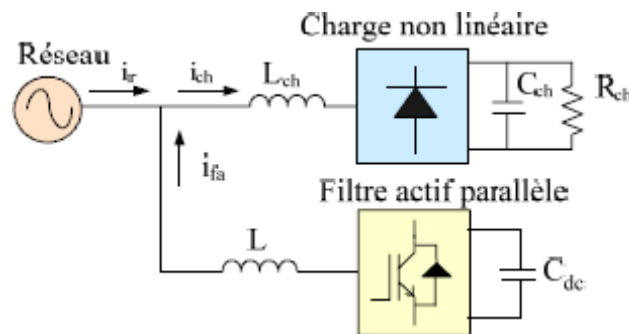


Figure 11 : Schéma bloc monophasé d'un filtre actif parallèle

Les filtres actifs parallèles, à part pour compenser certains harmoniques, ont aussi d'autres possibles fonctionnalités :

- Contrôle de la puissance réactive
- Equilibrage des charges
- Réduction du flicker
- Redresseur à prélèvement sinusoïdal

## Conclusion

Les mesures effectuées ces dernières années montrent que la pollution harmonique s'accroît régulièrement sur l'ensemble des réseaux. Face à cela, une politique de maîtrise de la

pollution harmonique doit être menée aussi bien du côté des distributeurs d'électricité que de celui des fabricants de matériel ou des utilisateurs industriels.

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, les courants harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller de l'échauffement et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en terme d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les *filtres actifs parallèles* et *séries*, et leurs combinaisons, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

---