

Partie 2 : Qualité de l'énergie électrique



Introduction aux notions de la qualité de l'énergie

INTRODUCTION

La qualité de l'énergie électrique implique l'ensemble des partenaires du domaine énergétique, 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 :

- Des impératifs économiques.
- La généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations.
- L'ouverture du marché de l'électricité.

Critères et définitions

Selon les experts de la qualité de l'énergie:

- La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs que sont la **continuité d'alimentation**, la **qualité de l'onde** de tension et la **qualité de service**.

➤ **la continuité de l'alimentation** : est la capacité de réseau à alimenter **en permanence** les points de livraison de ses clients, elle recouvre les coupures ou interruptions du réseau.

- On distingue les coupures brèves (entre 1 seconde et 3 minutes), et des coupures longues (supérieures à 3 minutes) reçue par les clients, ainsi que la durée des coupures longues cumulées (Tec).

Critères et définitions

Selon les experts de la qualité de l'énergie:

- **La qualité de l'onde de tension** désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions impulsionnelles, les variations de fréquence, les papillotements, etc.
- Enfin, **la qualité de service** qui caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau ou son fournisseur. Il s'agit par exemple des délais de (re)mise en service, des délais d'intervention d'urgence, des délais de raccordement, des notifications de coupure programmée, etc.

Critères et définitions

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce chapitre.

Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : *amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie*.

Critères et définitions

Amplitude:

L'amplitude de la tension est **un facteur crucial** pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie.

Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de **$\pm 10\%$ de la tension composée**, conformément à la norme EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique).

Toute variation de la tension au-delà du seuil haut ou bas de la plage nominale de la tension, génère une perturbation de la qualité de l'électricité distribuée.

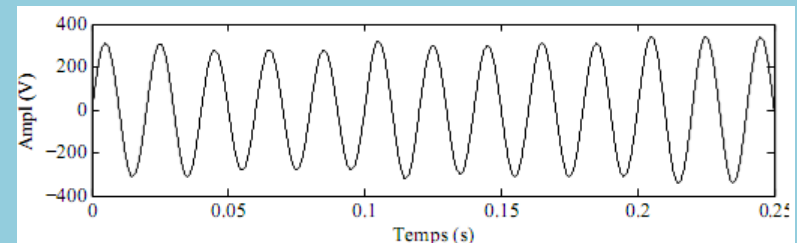
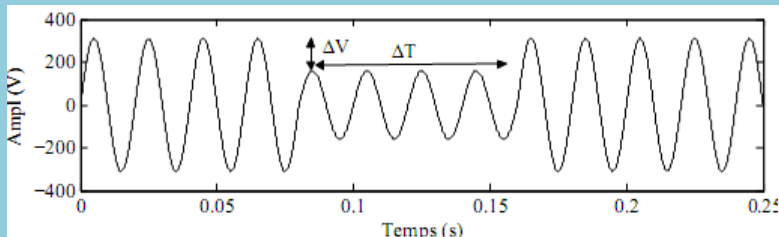
Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions.

Critères et définitions

Amplitude:

En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- **Les creux de tension, coupures et surtensions:** Ces perturbations se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts-circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- **Les variations de tension:** Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.



Critères et définitions

Fréquence:

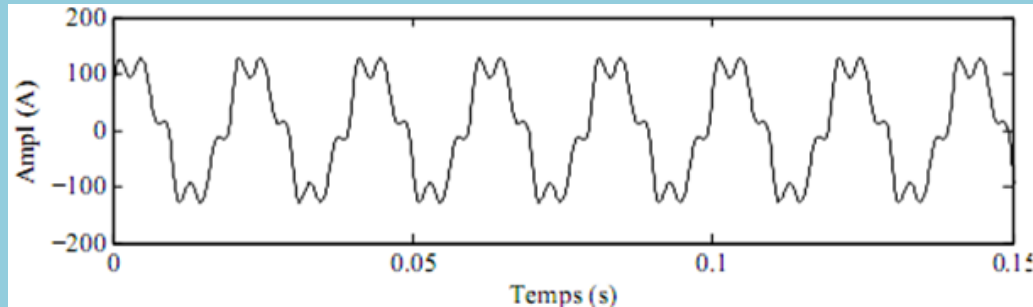
- Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de **50 ou 60 Hz selon le pays**.
- Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production , ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.
- Cependant, ces variations sont en général très faibles (**moins de 1%**) **et ne nuisent pas au bon** fonctionnement des équipements électriques ou électroniques.
- Pour les pays européens dont les réseaux sont interconnectés, la **norme EN 50160** précise que la fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle **50HZ $\pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, et $- 6\% \div 4\%$ durant 100% du temps**.

Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes.

Critères et définitions

Forme d'onde:

- La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences multiples de 50 Hz appelées également harmoniques.



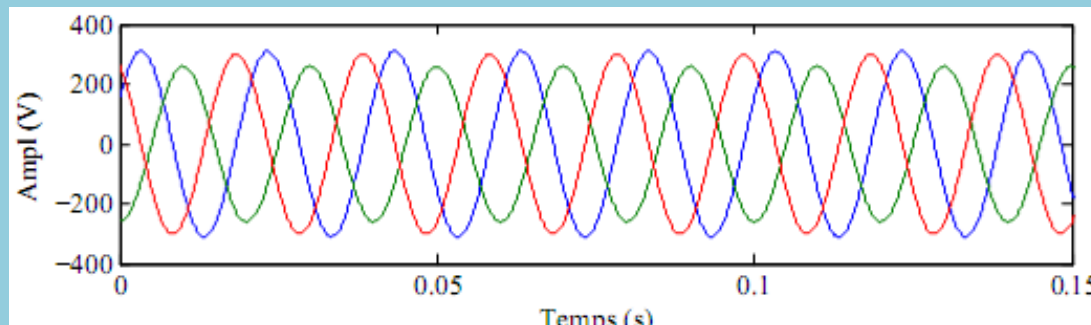
- Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, dénommés bruits.

Critères et définitions

Symétrie:

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par **l'égalité des modules** des trois tensions et celle de leurs **déphasages relatifs**.

La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé **déséquilibre**.



Critères et définitions

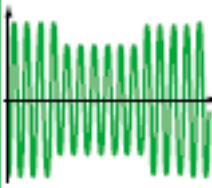
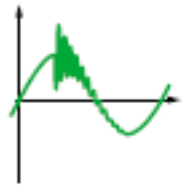
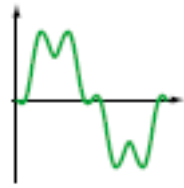
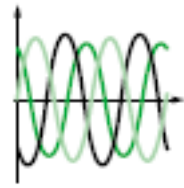
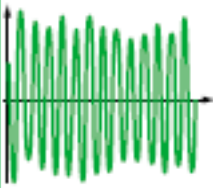
Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges.

Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ».

Tableau récapitulatif

Perturbations	Creux de tension	Surtensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tension
Formes d'onde caractéristiques					
Origine de la perturbation					
■ Réseau					
<input type="checkbox"/> Défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre...					
<input type="checkbox"/> Manœuvres et ferrorésonance					
<input type="checkbox"/> Foudre					
■ Equipements					
<input type="checkbox"/> Moteur asynchrone					
<input type="checkbox"/> Moteur synchrone					
<input type="checkbox"/> Machine à souder					
<input type="checkbox"/> Four à arc					
<input type="checkbox"/> Convertisseur					
<input type="checkbox"/> Charges informatiques					
<input type="checkbox"/> Eclairage					
<input type="checkbox"/> Onduleur					
<input type="checkbox"/> Batterie de condensateurs					
■ : Phénomène occasionnel		■ : Phénomène fréquent			

Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

Les origines de dégradation de la qualité de l'énergie électriques peuvent être classées en trois grandes catégories :

- les défauts au sein des réseaux électriques,
- Introduction des énergies renouvelables,
- la présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

➤ **Défauts dans le réseau :**

Par ailleurs, il faut les différentier en fonction de leur nature:

-Fugitif : nécessitent une coupure très brève du réseau.

Par exemple : balancement des conducteurs sous l'effet du vent, objets divers charriés (transportés) par le vent, brouillard givrant, pluie en zone polluée, branche d'arbre proche d'une ligne, et brûlée par l'arc.

Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

Causes de l'altération du signal



Accidents de la circulation ou de chantiers.



Évènements atmosphériques (foudre, vent violent...).

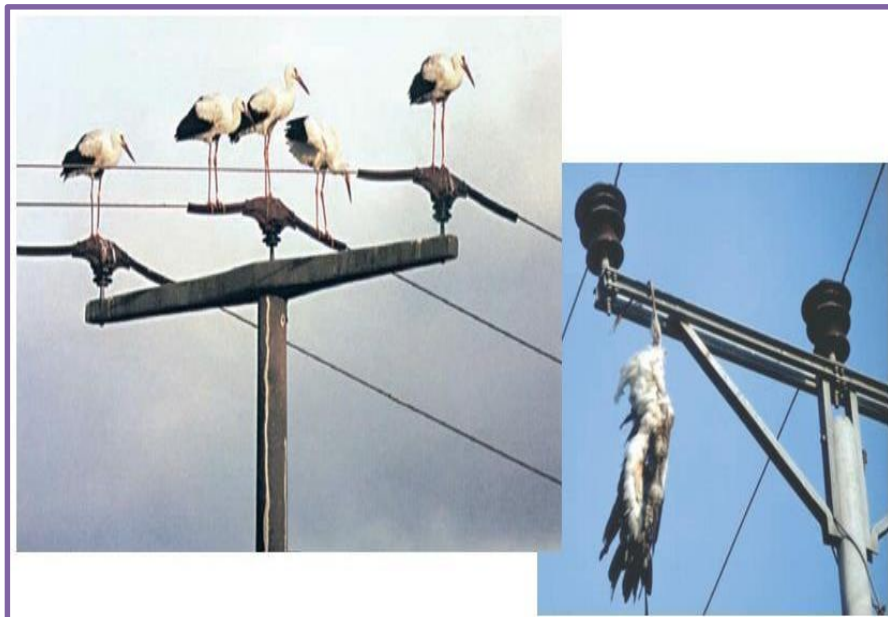
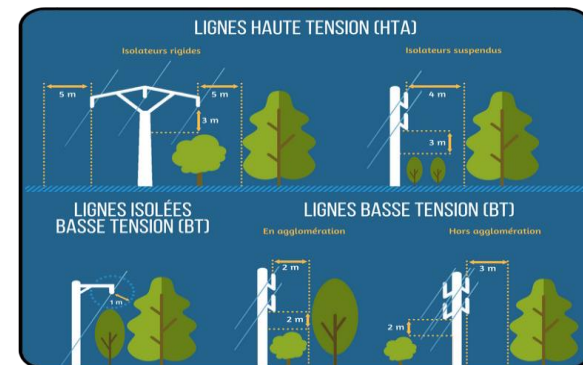


Perturbations issues d'installations des clients raccordés.



Défaut d'élagage, pannes ou défaillances techniques...

► Ces phénomènes se propagent sur le réseau et altèrent la qualité du signal fourni à la clientèle.



Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

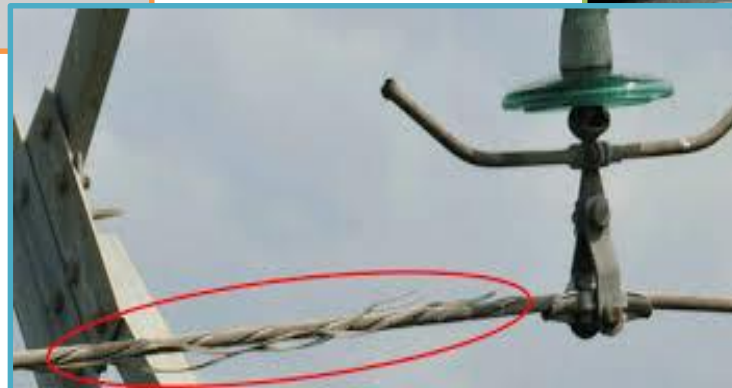
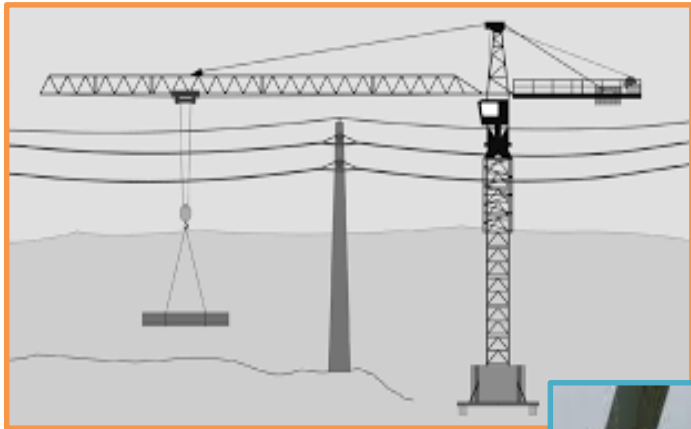
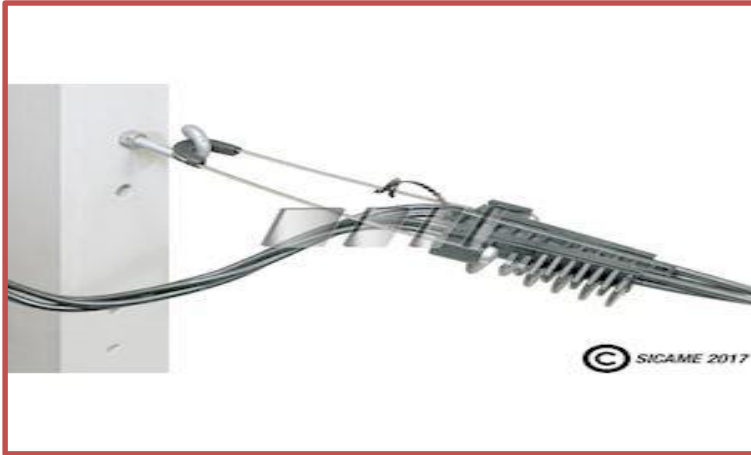
- **Permanent** : nécessitent une intervention humaine pour remettre en route le réseau. Par exemple :

rupture d'un câble ou de sa pince d'ancrage, et chute sur le sol, chute d'un arbre, ou d'une grue sur la ligne, acte de malveillance conduisant, par exemple, à la ruine d'un pylône, détoration d'un brin de conducteur, qui s'approche d'une autre masse métallique.

- **Auto-extincteur** : disparaissent spontanément et rapidement.

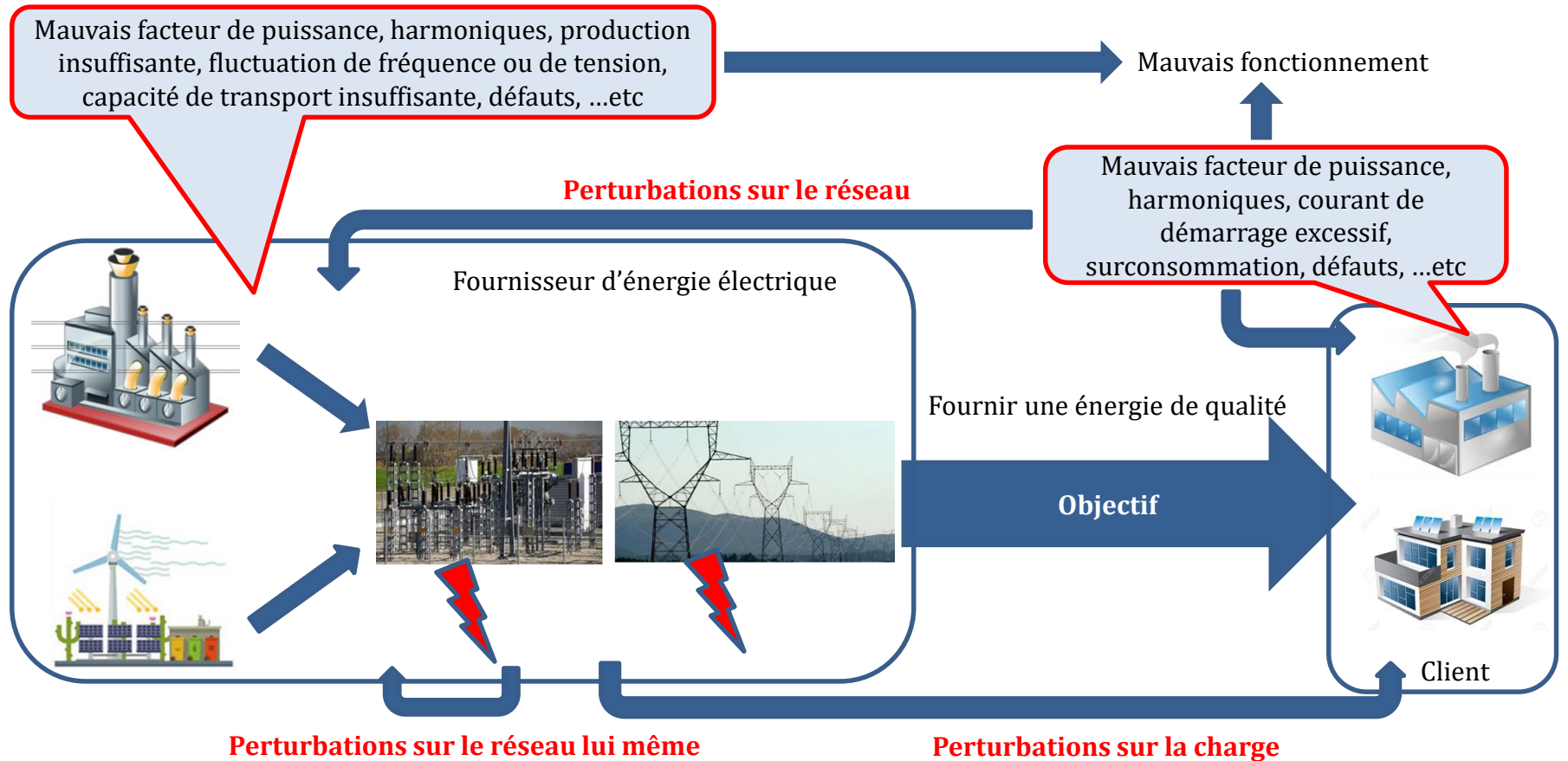
- **Semi-permanent** : nécessitent une coupure, de l'ordre de quelques dizaines de secondes, pour disparaître.

Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

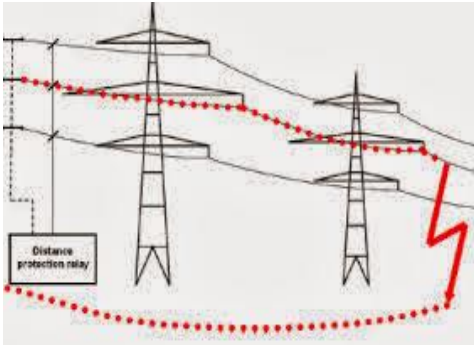


Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

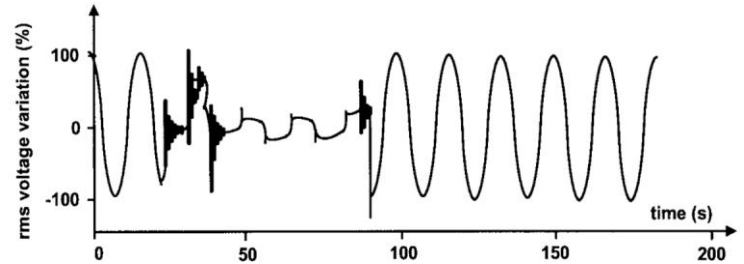
Effets réciproques, Réseau-Charge



Origines de dégradation de la qualité de l'énergie



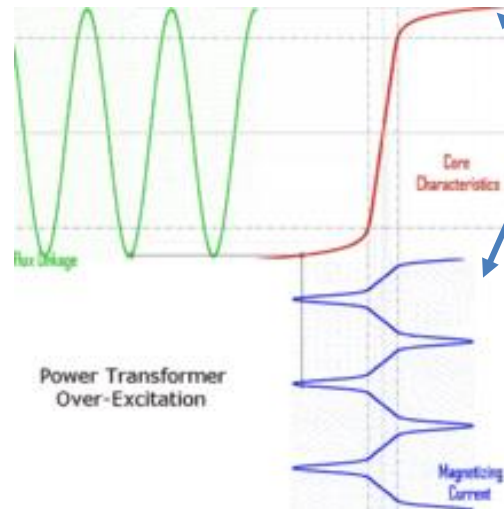
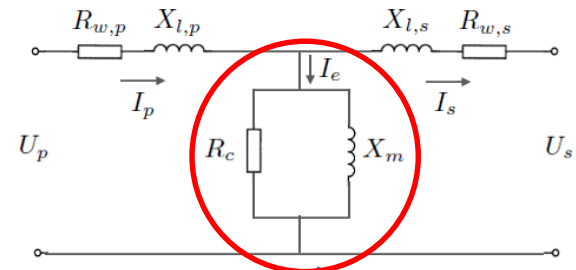
Défaut monophasé dans le réseau



Creux de tension causées par un défaut monophasé



Transformateurs de puissance



Courbe de magnétisation

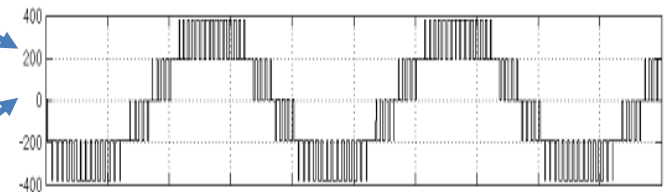
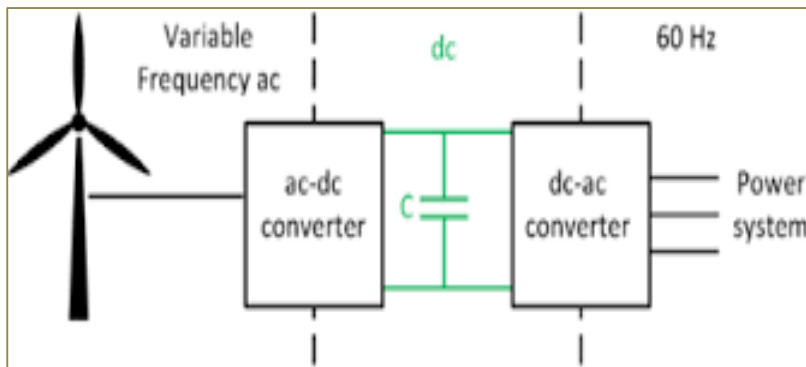
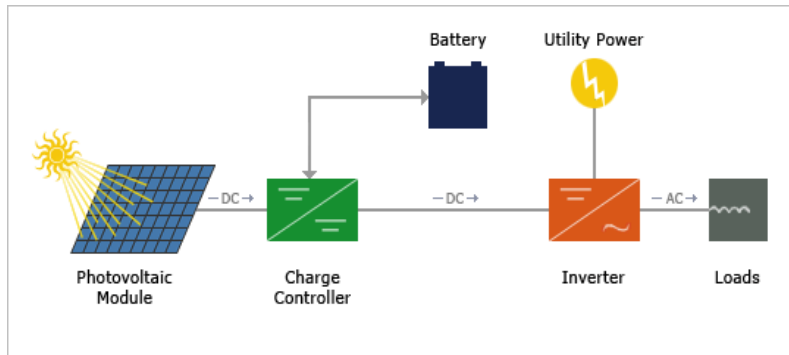
Courant de magnétisation Riche en harmoniques 3, 9, ...

Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

➤ Introduction des énergies renouvelables:

Chaines de conversion d'énergies renouvelables:

Les convertisseurs statiques utilisés dans cette chaîne sont source de pollution harmonique



Tension à la sortie du convertisseur (onduleur en général)

Contenu harmonique 5, 7, 11,...

Origines de dégradation de la qualité de l'énergie

➤ Notion de charges linéaires et non linéaires:

Hier, la majorité des charges utilisées sur le réseau électrique étaient des charges dites linéaires.

La charge linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, appellent un courant de forme identique à la tension, comme les convecteurs électriques ou encore les lampes à incandescence (figure a).

Il y a ainsi, à tout instant, proportionnalité entre tension et courant (figure b).

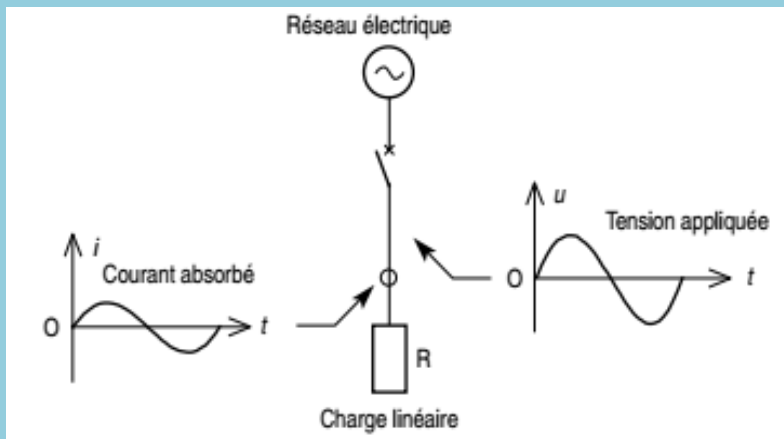


Figure a– Signaux relatifs à une charge linéaire

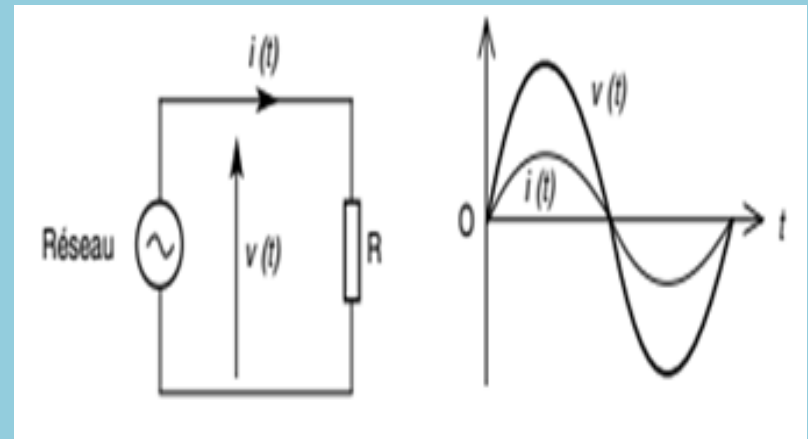


Figure b– Proportionnalité entre tension et courant

Notion de charges linéaires et non linéaires

Une application de charge dite linéaire

La puissance absorbée correspondante à ces deux grandeurs électriques, tension et courant, est le simple produit de ces composantes pour une charge dite linéaire associant de simples éléments purement résistifs.

Un déphasage existe lorsque l'on observe entre deux signaux sur un même circuit, un décalage de l'un par rapport à l'autre dans le temps (voir figure).

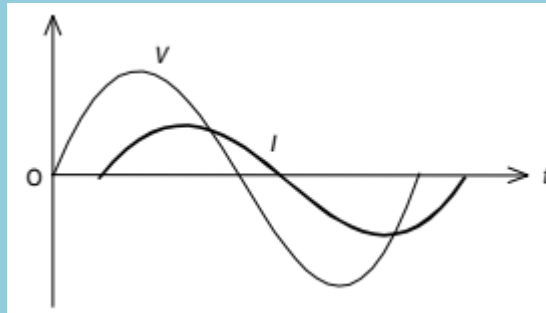


Figure – Différence de phase entre tension et courant.

La différence de phase constatée fait alors référence au facteur de puissance intervenant dans le calcul de la puissance absorbée du récepteur en plus des composantes tension et courant.

Notion de charges linéaires et non linéaires

Une application de charge dite linéaire

- Le facteur de puissance k d'un circuit est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Celui-ci est toujours inférieur ou égal à 1.
 - La puissance apparente étant calculée de la façon suivante : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ où P représente la puissance active et Q la puissance réactive.
 - **On parle de $\cos \varphi$ pour des signaux purement sinusoïdaux.** Par exemple un moteur asynchrone d'une puissance de 3 kW présente un $\cos \varphi$ d'environ 0,82.
 - La puissance active consommée par un récepteur linéaire en régime sinusoïdal est donnée par les relations suivantes :
 - $P = U * I * \cos \varphi$ en monophasé.
 - $P = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi$ en triphasé.
- Pour un facteur de puissance pouvant être unitaire (dans le cas de charge purement résistive) ou inférieure à 1 (dans le cas de charge inductive telle qu'un moteur asynchrone), **la notion de charges linéaires** :
- est donc valable pour des charges comprenant non seulement des éléments résistifs mais aussi des composants passifs tels que les inductances ou les condensateurs,
 - conserve proportionnalité entre tension et courant.

Notion de charges linéaires et non linéaires

L'origine des charges déformantes (charges non linéaires)

Aujourd'hui, avec l'apport de l'électronique intégrée dans de nombreux dispositifs électriques, les charges produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale.

Ces courants sont alors composés d'harmoniques, multiples de la fréquence du fondamental de 50 Hz (voir figure ci dessous).

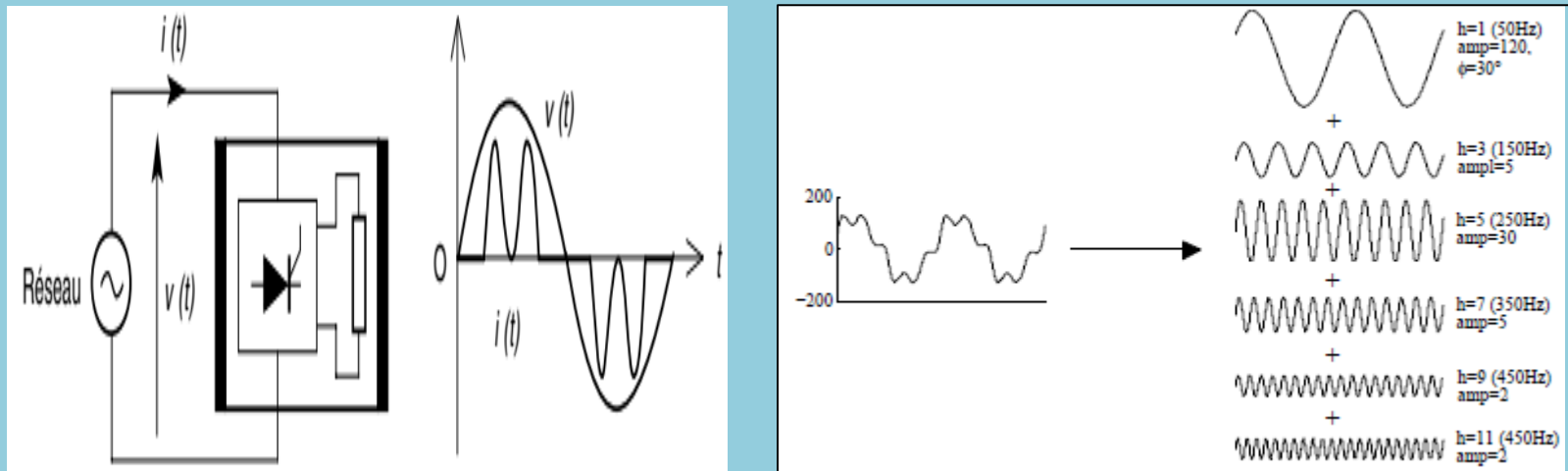


Figure – Signaux relatifs à une charge non linéaire.

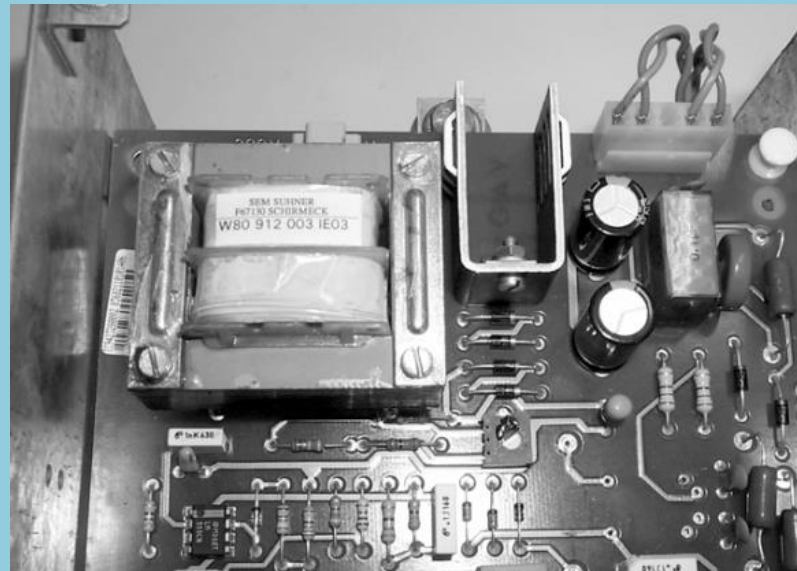
Notion de charges linéaires et non linéaires

L'origine des charges déformantes (charges non linéaires)

On peut citer quelques exemples d'équipements responsables de la déformation des signaux :

- les convertisseurs de l'électronique de puissance,
 - les machines à souder, fours à arc,
 - la généralisation des alimentations à découpage dans l'informatique des secteurs tertiaire et industriel aussi bien que dans les appareils électroménagers,
 - tous les équipements comportant des dispositifs à semi-conducteurs.
- Les équipements pollueurs sont nombreux dans le secteur industriel et répartis sur différents postes d'équipements électriques (voir figure).

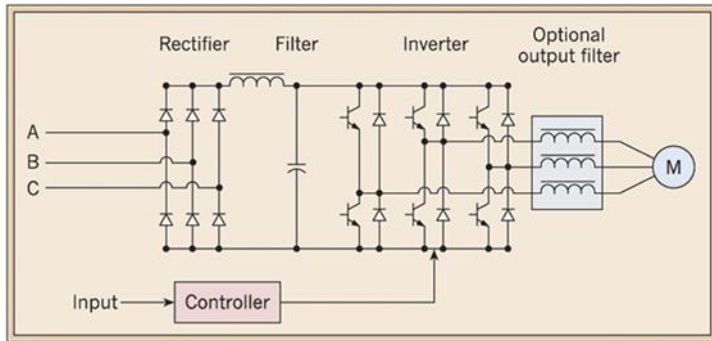
Figure – L'électronique intégrée au cœur d'une armoire d'équipement électrique.



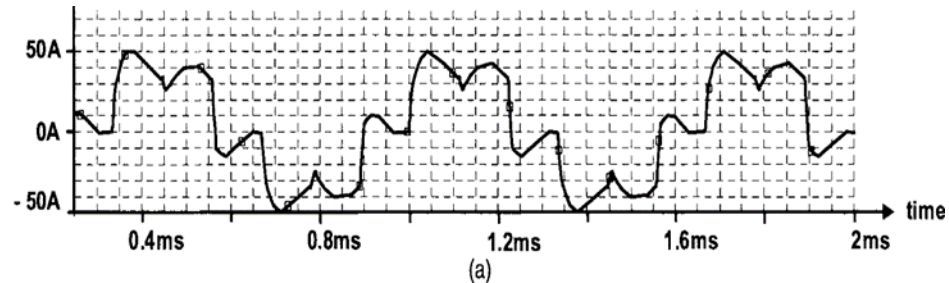
Notion de charges linéaires et non linéaires

Alimentation via des convertisseurs statiques :

Les alimentations EP absorbent des courants harmoniques



Variateur de vitesse (Variable Speed Drive, VSD)

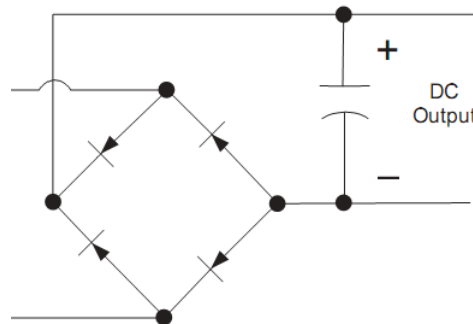


Courant absorbé par un moteur à courant continu type brushless à travers un variateur de vitesse.

Courants riches en harmonique 5, 7, 11, 13. THD autour de 30%



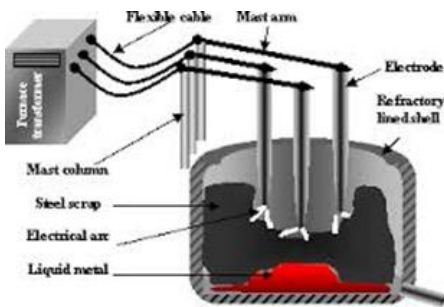
Alimentation d'un ordinateur



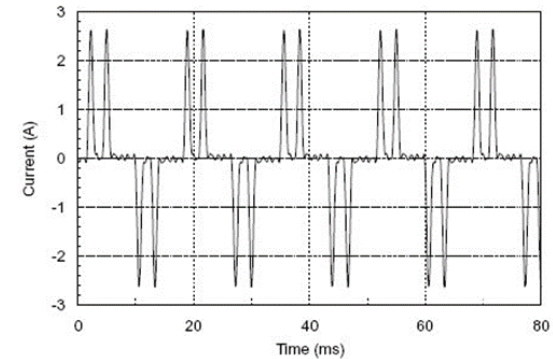
Courant absorbé par un ordinateur

Courants riches en harmonique 3, 5, 7, 9. THD dépasse les 100%

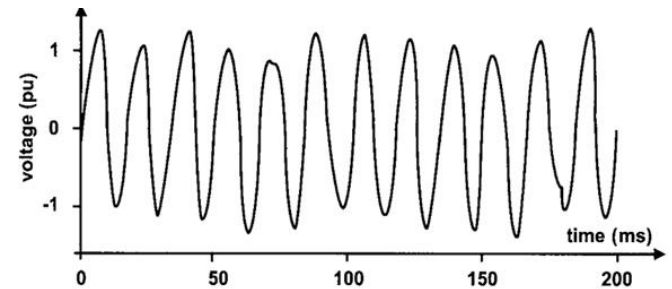
Notion de charges linéaires et non linéaires



Forte variations du courant absorbé



Four à arc



Fluctuation de tension causées par un four à arc

Notion de charges linéaires et non linéaires

Une application de charge dite non linéaire

La charge dite non linéaire correspond à un type de charge composée d'éléments semi-conducteurs, constituants essentiels des dispositifs de l'électronique.

Aussi, la charge non linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant dit déformé. Il n'y a donc plus proportionnalité entre tension et courant (voir figure).

La notion de $\cos \varphi$ n'est plus applicable dans le cas de signaux déformés. On parle alors de **facteur de puissance F_p (Power Factor)** :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

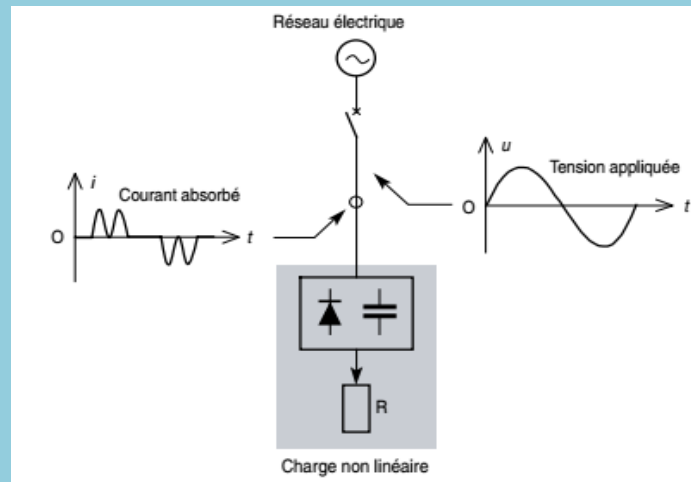


Figure – Non-linéarité entre tension et courant pour une charge déformante.

Notion de charges linéaires et non linéaires

En développant cette notion de facteur de puissance, on voit apparaître un nouveau terme D dans l'expression suivante, matérialisant la puissance déformante :

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

Cette puissance déformante D **traduit les effets de la distorsion harmonique** sur l'installation considérée. La **dégradation de la valeur du facteur de puissance** est donc augmentée, sur ce type d'installation, comparativement à une installation ne comportant que des charges linéaires. Afin de lever l'ambiguïté entre le $\cos\phi$, dans le cas de signaux sinusoïdaux, et le facteur de puissance k , dans le cas de signaux déformés, les appareils de mesure de puissance et d'analyse d'énergie utilisent le terme DPF (*Displacement Power Factor* pour déplacement du facteur de puissance) pour désigner le $\cos\phi$ en régime perturbé.

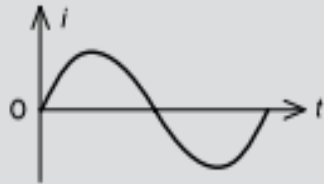
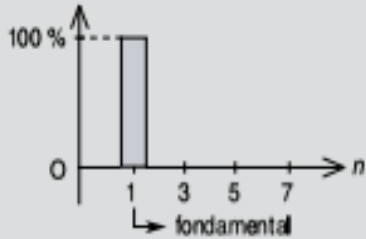
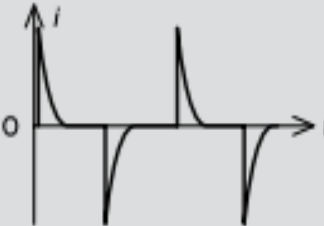
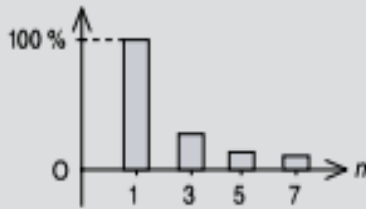
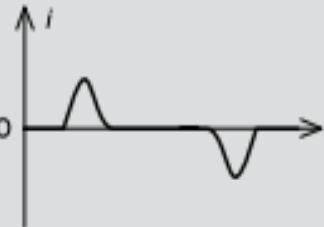
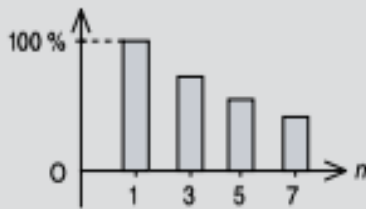
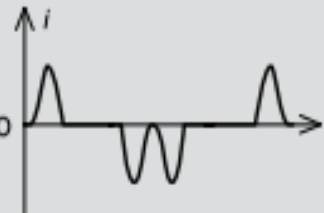
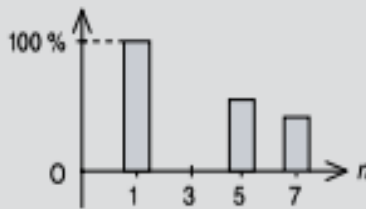
Principaux équipements pollueurs

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

Tableau1: Equipements pollueurs

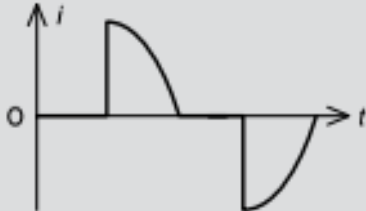
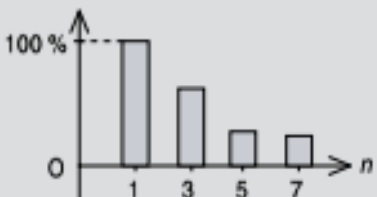

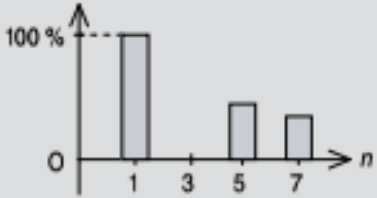
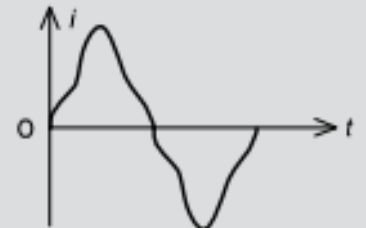
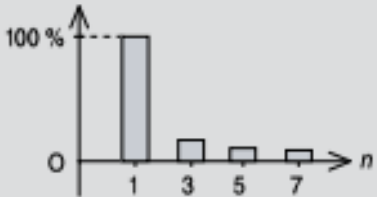
Principaux équipements pollueurs

Tableau 2.1 – Principaux types de charges avec les allures de courants absorbés.

Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Récepteur résistif.	Fours industriels à résistances réglées par commande à trains d'ondes. Lampe à incandescence, convecteurs, chauffe-eau.		
Éclairage.	Tubes fluorescents. Lampes à vapeur HP.		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage, alimentation à découpage.	Micro-informatique. Télévisions. Lampes à ballast électronique.		
Redresseur triphasé à diodes avec filtrage.	Variation de vitesse des moteurs asynchrones.		

Principaux équipements pollueurs

**Tableau 2.1 – Principaux types de charges avec les allures de courants absorbés.
(Suite)**

Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commande par angle de phase).	Régulation de puissance de fours à résistances. Modulation de puissance des lampes halogènes.		
Redresseur triphasé à thyristors.	Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones. Electrolyseurs.		
Moteur asynchrone	Machines outils. Appareils électroménagers. Ascenseurs.		

Caractérisation des déformations de l'onde

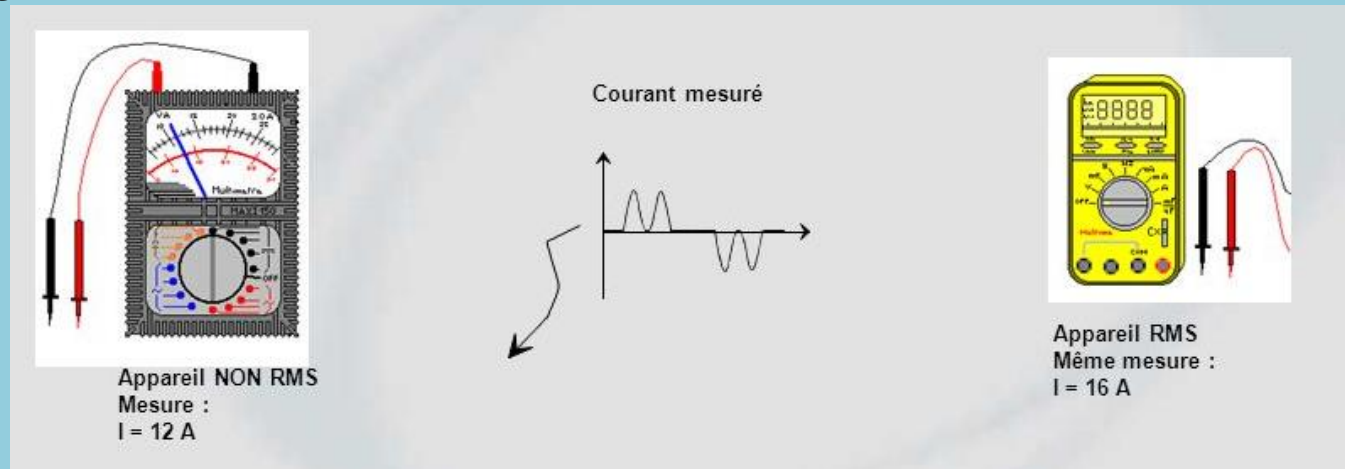
Mesure du courant efficace et les appareils RMS

La mesure du courant efficace et les appareils RMS

P24

Avec l'apport des charges non linéaires, le courant ne conserve plus un aspect purement sinusoïdal, Il est déformé par la commutation de composants à base de semi-conducteurs intrinsèques à la constitution du matériel qui autorise le passage du courant qu'à des instants donnés sur une période complète. Il va donc être essentiel de pouvoir mesurer la valeur efficace du signal quelle que soit la forme de celui-ci dans une installation électrique.

Les appareils numériques dits RMS (*Root Mean Square*) et TRMS (*True Root Mean Square*) réalisent la mesure efficace d'un signal quelle que soit sa forme, sinusoïdal ou bien déformé.



La valeur réelle efficace est bien largement supérieure à la valeur mesurée par l'appareil qui n'est pas de technologie RMS. Les écarts peuvent être de l'ordre de 50 %.

Mesure du courant efficace et les appareils RMS

La mesure du courant efficace et les appareils RMS P24

Un signal déformé se décompose en une somme de signaux harmoniques associés au fondamental à 50 Hz (figure 2.17).

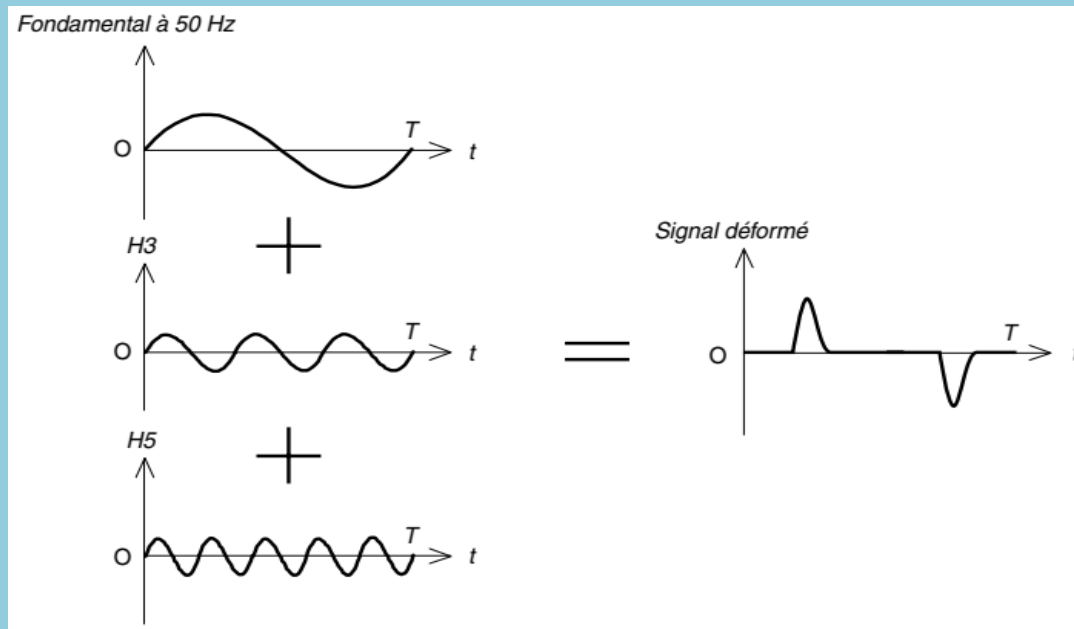


Figure 2.17 – Somme harmonique.

$$I_{R.M.S.} = \sqrt{I^2 \text{ fondamentale} + I_{h_3}^2 + I_{h_5}^2 + I_{h_7}^2 + \dots}$$

Où I_h représente le courant harmonique.

Les harmoniques de rang élevé ne présentent qu'une valeur efficace souvent négligeable, devant le courant total.

Facteur de crête

Le facteur de crête:

Autre facteur déterminant pour identifier un signal déformé, c'est le facteur de crête. Nous savons qu'il existe un rapport entre la valeur crête (I_{MAX}) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace de ce même signal (figure 2.18) :

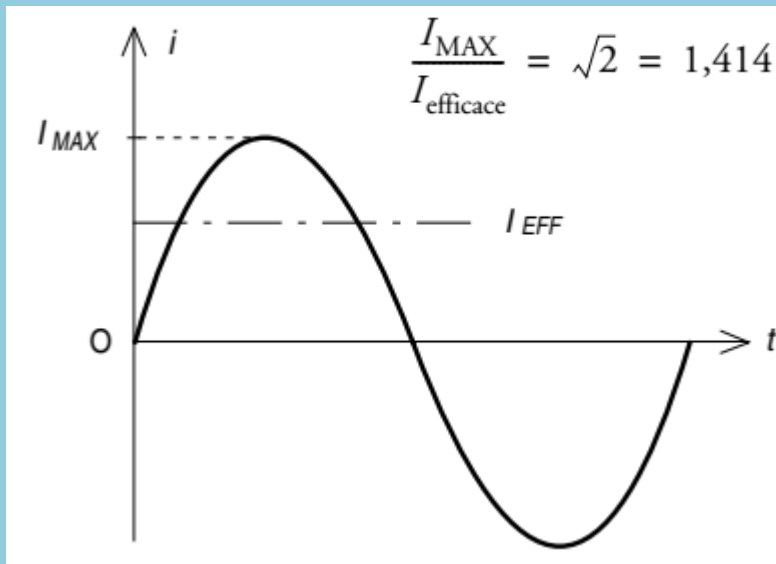


Figure 2.18 – Signal sinusoïdal

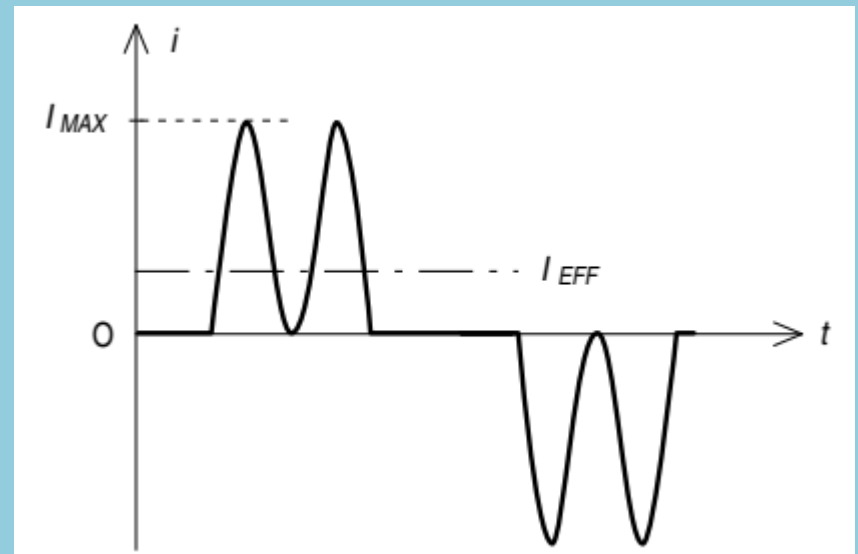


Figure 2.19 – Signal déformé

Lorsque le courant est déformé, le facteur de crête atteint des valeurs supérieures à et traduit la non-linéarité du circuit en question (figure 2.19).

Facteur de crête

Le facteur de crête:

Pour un même courant efficace les formes d'ondes peuvent être très différentes. Le facteur de crête F_c permet de caractériser la forme du courant et d'apprécier qualitativement la déformation de celui-ci :

$$F_c = \frac{\text{valeur}_{\text{crête}}}{\text{valeur}_{\text{efficace}}}$$

Facteurs de crête courants :

- charge linéaire : soit 1,414 ➡ Absence d'harmonique
- matériel informatique : 2 à 3 ➡ Présence d'harmoniques
- variateur de vitesse : environ 2 ➡ Présence d'harmoniques

Taux d'harmonique individuel et global:

Le taux d'harmonique individuel:

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

- Ce taux est une valeur particulière pour un harmonique donné, où A_n représente la valeur efficace de l'harmonique au rang considéré et A_1 la valeur efficace du fondamental.

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

Le taux d'harmonique global:

- Afin d'avoir une représentation globale de la déformation d'un signal, il a été nécessaire de définir un taux de distorsion harmonique, qui lui, tient compte de l'ensemble des harmoniques du signal analysé : le THD (*Total Harmonic Distorsion*).

- Plus le signal est déformé, plus le taux de distorsion harmonique est important, ce qui signifie que le niveau de richesse du signal en harmoniques est conséquent.

Taux d'harmonique individuel et global:

Le taux d'harmonique global:

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

avec A_1 : valeur efficace du fondamental.

$$THD - F = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}$$

On définit également le taux d'harmonique par rapport à la valeur efficace du signal, qui est le quotient :

avec X : valeur efficace du signal

$$THD - G = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{X}$$

Nota

Dans les relations précédentes, on tient compte des harmoniques de rangs pairs et impairs. Sachant que pour un signal symétrique, par rapport à l'axe des temps, seuls les harmoniques de rangs impairs seront pris en compte. On prend l'hypothèse de ne pas avoir de composante continue dans le signal.

Effets de dégradation de la qualité de l'énergie

Effets de la dégradation de la qualité de l'énergie

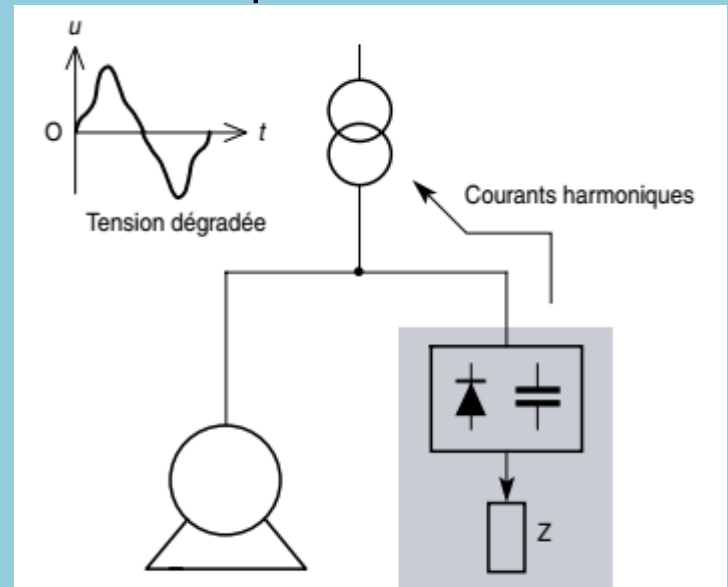
D'une façon générale, les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance, suivant la loi d'Ohm, à des tensions harmoniques, qui vont s'ajouter, ou se déduire, de la tension fondamentale générée par le réseau.

La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale et de plus cette tension est commune à tous les autres récepteurs du réseau.

La pollution alors présente sur le réseau de distribution est préjudiciable (nuisible) pour le bon fonctionnement de tous les récepteurs raccordés sur ce même réseau (voir figure).

NB: le taux global d'harmonique en tension ne doit pas dépasser 8 % dans une installation de distribution basse tension.

Figure – Charge déformante générant des courants harmoniques sur le réseau électrique.



Effets de la dégradation de la qualité de l'énergie

On peut considérer que les perturbations provoquées par les harmoniques se manifestent de deux façons sur les appareils et les équipements électriques :

- **les effets instantanés**, qui concernent les pertes par effet Joule, déformation de l'onde et aux phénomènes de résonance, déclenchements intempestifs de disjoncteurs et de relais d'automatisme, la destruction de matériels (condensateurs par exemple).

ou encore la perturbation des dispositifs de régulation et des équipements informatiques ; mais c'est aussi la diminution du facteur de puissance de l'installation.

- **les effets à long terme** qui génèrent des échauffements dans les condensateurs et les conducteurs et provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et dans les transformateurs. Les problèmes rencontrés sont essentiellement de nature thermique et affectent alors la durée de vie des équipements concernés.

Effets de la dégradation de la qualité de l'énergie

Récapitulatif des effets produits sur certains équipements

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

Normes et réglementation

Normes

IEC 61000-2-2 :

Fixe les niveaux de compatibilité des tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Cette norme limite à 8% le THD jusqu'au 40 ème rang.

Objectif: protection des équipements raccordés au réseau.

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Mon multiple de 3		Multiple de 3			
Rang	Taux max. admissible (%)	Rang	Taux max. admissible (%)	Rang	Taux max. admissible (%)
<i>h</i>		<i>h</i>		<i>h</i>	
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		$0.2 + 1.3 \times 25/h$			

IEC 61000-3-2 et IEC 61000-3-4

Définissent les limites des émissions des courants harmoniques pour les équipement 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.

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. admissible (A)	Rang	Courant max. admissible (A)
<i>h</i>		<i>h</i>	
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		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$		

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

<i>h</i>	Taux max. admissible (%)	<i>h</i>	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

Limites des émissions des courants harmoniques selon la norme IEC 61000-3-4

Normes

Normes IEEE Standard 519-92

Fixe les limites des taux de distorsions individuel et total des courants pour les charges non linéaire au PCC. Ces limites dépendent de la capacité du réseau (I_{sc}) et du courant de charge I_L

Fixe les limites des taux de distorsions individuel et total des tensions dans le réseau de distribution

	Harmonic voltage distortion (% at PCC)		
	2.3 to 69 kV	69 to 138 kV	>138 kV
Maximum for individual harmonics	3.0	1.5	1.0
Total harmonic distortion (THD _v)	5.0	2.5	1.5

I_{sc}/I_L	Maximum harmonic current distortion at PCC (% of fundamental)					THD _i
	Harmonic order (odd harmonics) ^a					
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
<20 ^b	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20–50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50–100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100–1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Amélioration de la qualité de l'énergie



Amélioration de la qualité de l'énergie

VOIR LE CHAPITRE 2DE LA THESE P33

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] ;

Amélioration de la qualité de l'énergie

- Compensation

Cette deuxième stratégie sert à atténuer 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 et 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 donne naissance à une solution moderne qui est le filtrage actif.

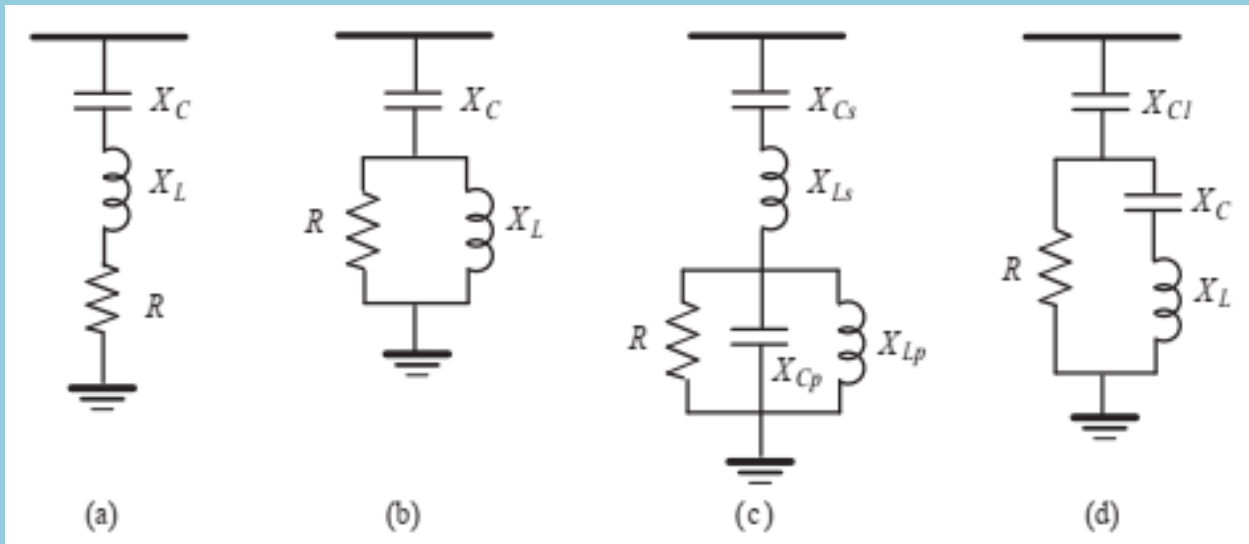
- Filtrage passif

- *Utilise le principe de résonances pour piéger l'harmonique ou les harmoniques indésirable(s)*
- Un filtre passif est une combinaison entre des réactances capacitatives et inductives dont les valeurs sont calculée en fonction de la fréquence de résonance souhaitée;

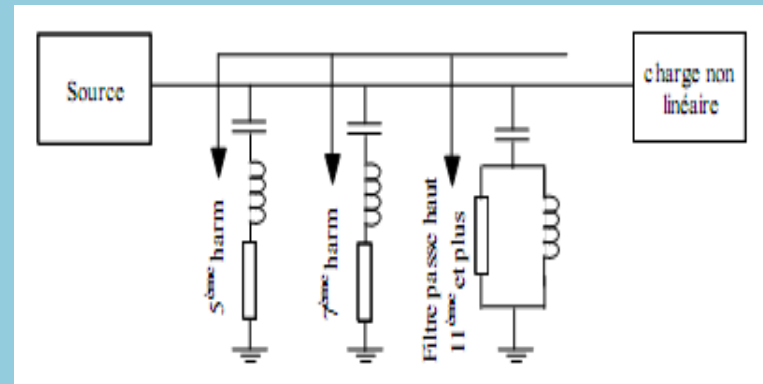
Amélioration de la qualité de l'énergie

Filtrage passif:

- Il y a plusieurs types de filtres passifs: résonant simple (a), passe haut (filtre amorti) (b), double résonant (c), filtre de type C (d)...



- En pratique, ces filtres sont installés en dérivation avec les charges polluantes;
- Plusieurs types de filtres sont souvent nécessaires pour un filtrage optimale (exemple, 2 filtre résonants (5^{ème} et 7^{ème} harmonique) et un filtre passe haut (à partir du 11^{ème}),



Amélioration de la qualité de l'énergie

Filtrage passif:

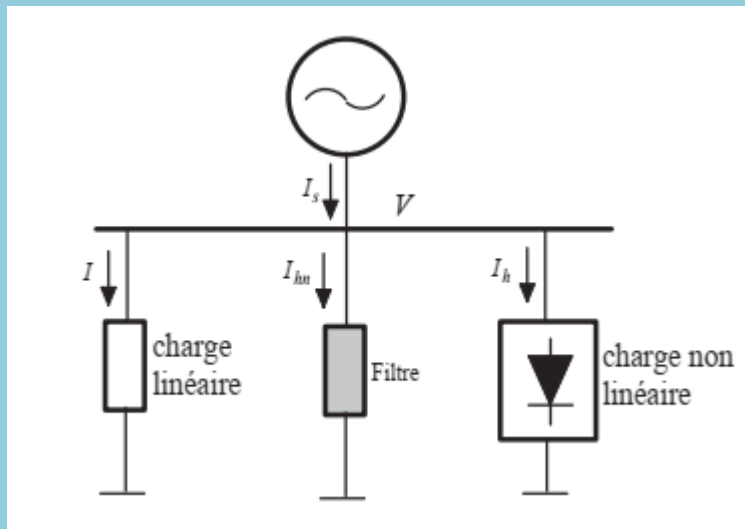
- **Filtre résonant** : : Accordé à une fréquence spécifique, et donc capable de piéger 'éliminer' un seul harmonique ;
- **Filtre passe haut** : Accordé à une fréquence à partir de laquelle il doit piéger tous les harmoniques supérieurs, donc capable d'éliminer plusieurs harmoniques ;
- **Filtre à double résonance** : Accordé à deux fréquences distinctes pour pouvoir éliminer deux harmoniques ;
- **Filtre type C** : C'est une filtre passe haut également mais avec des caractéristiques meilleurs (compensation de la puissance réactive, et moins de pertes).

Amélioration de la qualité de l'énergie

Le principe d'un filtrage passif d'harmonique (ou de filtrage d'harmonique en général) est illustré sur la figure ; Il s'agit d'insertion en dérivation avec la charge polluante d'un filtre calculé de sorte à constituer un piège aux harmoniques générés par la charge non linéaire, pour que le courant côté source reste le plus proche possible de la forme sinusoïdale.

- En effet, pour une charge non linéaire qui absorbe un courant constitué du rang 1 plus les rangs 5, 7, si le filtre en question est calculé pour piéger l'harmonique 5, le courant côté source sera alors constitué des rangs 1 et 7.
- Si ce filtre est calculé pour piéger les rangs 5 et 7, alors le courant de source sera uniquement constitué du rang fondamental et par conséquent, sinusoïdal.

Figure - Principe de filtrage passif d'harmoniques



Amélioration de la qualité de l'énergie

Filtrage actif:

- *Un filtre actif consiste à générer les harmoniques absorbés par une charge non linéaire, et les injecter au réseau afin que le courant côté réseau reste sinusoïdale.*

Un filtre actif est constitué de deux parties principale:

- Une partie puissance: souvent un onduleur de tension connecté au PCC avec un bus continu capacitif,
- Une partie commande: qui consiste à calculer en temps réel le courant harmonique de la charge non linéaire et de forcer l'onduleur à l'injecter en opposition de phase au réseau afin que la somme $i_F + i_L$ soit toujours sinusoïdale,

$$i_L = i_1 + i_h \quad i_F = -i_L$$

$$\Rightarrow i_s = i_L + i_F = i_1$$

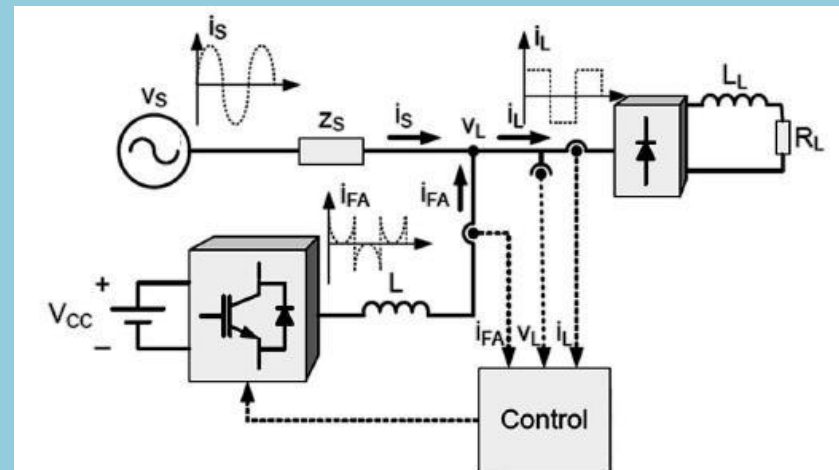
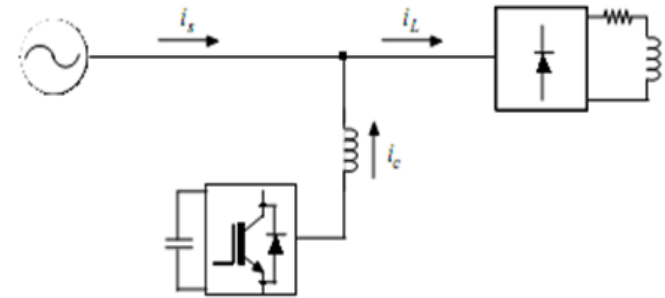


Figure 1: Basic diagram of a shunt active power filter

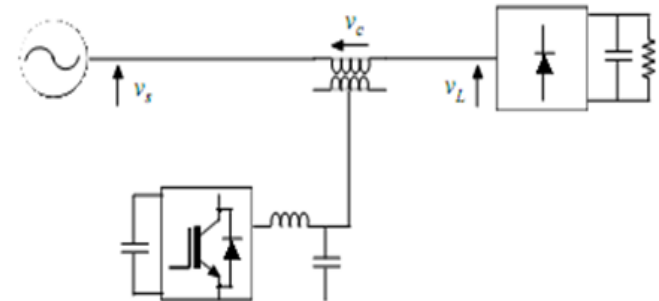
Amélioration de la qualité de l'énergie

Filtrage actif:

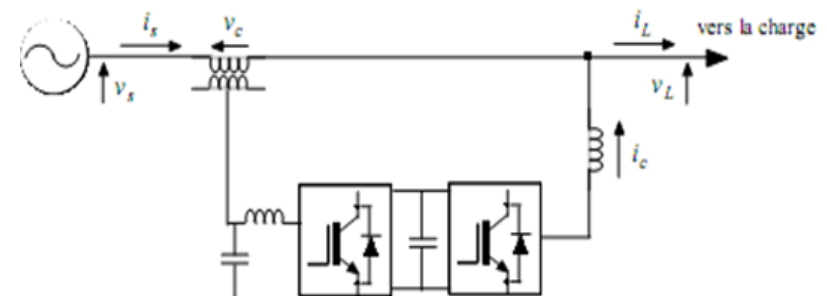
- ❑ **Filtre série:** la meilleure solution pour le filtrage d'harmoniques de courant et la compensation de la puissance réactive,
- ❑ **Filtre parallèle:** pour le filtrage des harmoniques de tension. Il joue le rôle d'un isolateur d'harmonique
- ❑ **Filtre universel (UPQC):** rarement utilisé (cher et compliqué), il joue les deux rôles



(a) Filtrage actif shunt (parallèle).



(b) Filtrage actif série.



(c) Filtrage actif universel (UPQC).