Chapitre 3

Origines de la dégradation de la qualité de l'énergie

1-Notion de charges linéaires et non linéaires

1.1 Origine des charges déformantes

Les résistances, inductances et capacités forment, quand elles sont associées, des charges dites « linéaires ». C'est-à-dire que sous tension sinusoïdale, elles consomment des courants de formes sinusoïdales identiques à la tension.

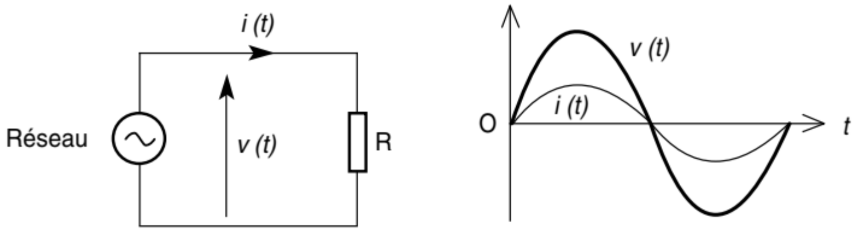


Figure 3.1 Signaux relatifs à une charge linéaire.

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 (50 Hz par exemple).

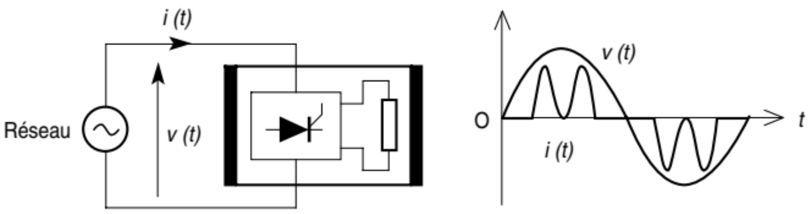


Figure 3.2 Signaux relatifs à une charge non linéaire.

La distinction entre les charges linéaires et les charges non linéaires s'effectuer :
- soit par reconnaissance du type de charge lorsque la technologie intégrée est connue.
- soit par la mesure afin de vérifier les caractéristiques du courant appelé par la charge.

Quelques exemples d'équipements responsables de la déformation des signaux **:**

- ✓ Les convertisseurs de l'électronique de puissance.
- ✓ Les machines à souder, fours à arc.
- ✓ Les 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.

1.2 Une application de charge dite linéaire

Une charge dite linéaire correspond à toute catégorie de charge se retrouvant au travers des récepteurs classiques tels que les convecteurs électriques, les lampes à incandescence ou encore tout récepteurs comportant des éléments résistifs, inductifs ou capacitifs telle que les moteurs électrique. Aussi, la charge linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant de même allure. Il y a ainsi, à tout instant, proportionnalité entre tension et courant.

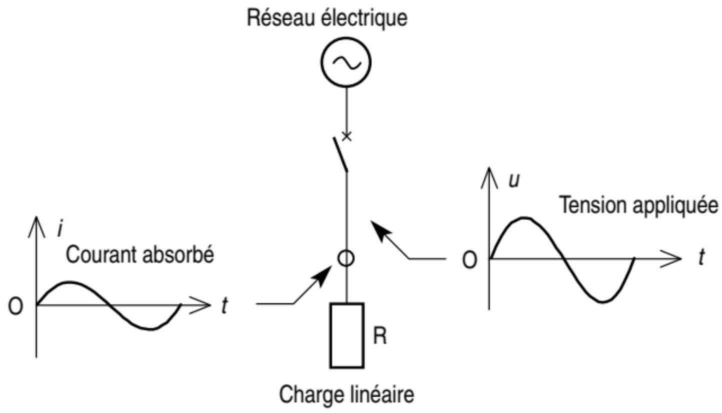


Figure 3.3 Proportionnalité entre tension et courant pour une charge dite linéaire.

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.

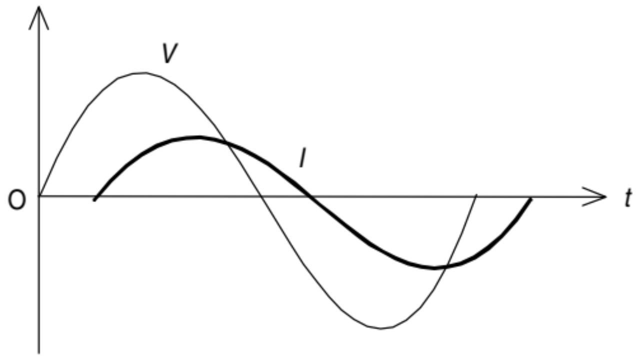


Figure 3.4 Différence de phase entre tension et courant.

1.2.1 Facteur de puissance :

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. Le facteur de puissance k d'un circuit est le rapport entre la puissance active $\boldsymbol{P}$ et la puissance apparente $\boldsymbol{S}$. Celui-ci est toujours inférieur ou égal à 1.

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

1.2.2 Cosφ :

Le déphasage entre la tension et le courant si ceux-ci sont sinusoïdaux est noté φ. φ est pris positif pour les phénomènes inductifs. Ce déphasage donne lieu à l'existence de puissances actives, réactives et apparentes.
Comme seule la puissance active est nécessaire, il convient de lutter contre la puissance réactive afin de réduire la puissance apparente.

1.2.3 La puissance active

La puissance active consommée par un récepteur linéaire en régime sinusoïdal est donnée par les relations suivantes :
En monophasé : $P = U \times I \times \cos\varphi$
En triphasé : $P = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi$

1.2.4 La puissance apparente :

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.

1.3 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. La charge non linéaire soumise à une tension sinusoïdale absorbe un courant dit : déformé. Il y a donc plus proportionnalité entre tension et courant.

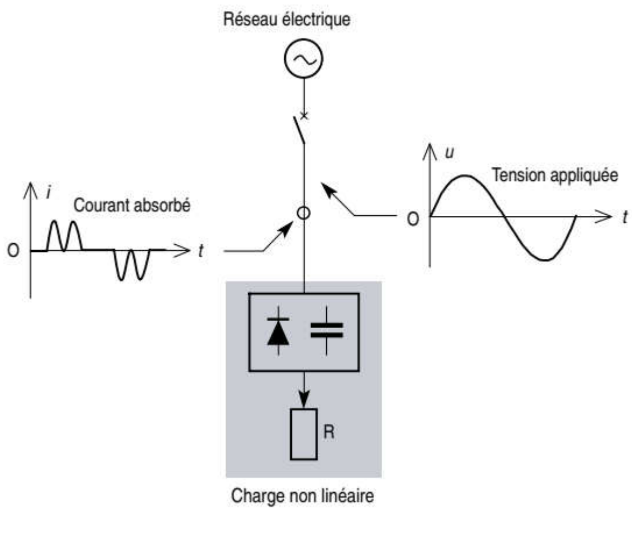
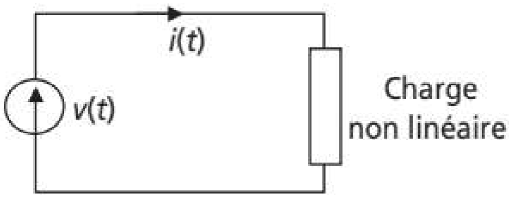


Figure 3.5 Non-linéarité entre tension et courant pour une charge déformante

2- Charge non linéaire et Puissance en régime déformé



Avec : $v(t) = V \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\omega t$

$V = V_{eff}$, $I = I_{eff}$

i étant périodique de période T, de fréquence : $f = 1/T$ (50 Hz en général), on retiendra les formulations de :

Valeur moyenne : $< i > = \frac{1}{T} \int_{(T)} i(t)dt$

Valeur efficace : $I_{eff} = I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(T)} i^2(t)dt}$

Puissance active : $P = < p(t) > = \frac{1}{T} \int_{(T)} i(t) \cdot v(t)dt$ (W)

Puissance apparente : $S = V \cdot I$ (VA)

Puissance réactive : Q (VAR)

Puissance déformante : D (sans unité)

Relation générale valable dans tous les régimes :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Remarques :

- La puissance réactive n'est due qu'au fondamental du courant *i*.
- Si le courant et la tension sont en phase, la puissance réactive Q est nulle.
- Si le courant est sinusoïdal pur, la puissance déformante D est nulle et on retrouve les propriétés des Régimes sinusoïdaux.

- La notion de **Cosφ** n'est plus applicable dans le cas de signaux déformés. On parle alors de facteur de puissance F_P (PF pour *Power Factor* dans la littérature anglaise :

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

2.1 Puissance déformante *D*

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. Et ceci en raison de la présence d'harmoniques issus des charges non linéaires.
- Afin de lever l'ambiguïté entre le **Cosφ**, dans le cas de signaux sinusoïdaux, et le facteur de puissance dans le cas de signaux déformés, les appareils de mesure de puissance et d'analyse d'énergie utilisent

le terme déplacement du facteur de puissance ***DPF*** (Displacement Power Factor) pour désigner le **Cosφ** en régime perturbé. Le ***DPF*** est ainsi égal au facteur de puissance **Fp** uniquement pour les signaux non déformés. En d'autres termes, le ***DPF*** représente le cosinus du déphasage entre les fondamentales de la tension et du courant. Le ***DPF*** constitue alors la véritable représentation du déphasage entre les signaux U et I.

3- Notions d'harmoniques de courant

3.1 Décomposition du courant en série de Fourier

La décomposition en Série de Fourier d'une grandeur périodique revient à dire que celle-ci se décompose toujours en une somme infinie de composantes sinusoïdales. C'est typiquement le cas des courants absorbés par les charges non linéaires pour lesquelles la décomposition harmonique est la base de nombreuses considérations.

L'onde périodique de période T (de pulsation $\omega = 2\pi/T$) est décomposée en une somme d'ondes sinusoïdales de fréquences différentes et associée à une sinusoïde à fréquence industrielle (50 Hz par exemple, appelée fondamentale.

La fréquence de chacune d'entre elles est un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal.

D'autre part, **le rang** de l'harmonique est le rapport de sa fréquence à celle du fondamental **:**

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Avec :

f_n : fréquence de l'harmonique n

f_1 : fréquence du fondamental.

Une fonction périodique f(t) de période T, satisfaisant les conditions de Dirichlet **:**

Soit f(t) une fonction continue par morceaux périodique de période T, Alors la série de Fourier converge normalement et f(t) est développable en une série de Fourier sous une des écritures suivantes :

$$\boxed{f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{+\infty}\left(a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t\right)}$$

Qu'on peut écrire aussi sous la forme :

$$\boxed{f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{+\infty}\left[c_n \cos\left(n\omega t - \varphi_n\right)\right]}$$

Ce développement unique est appelé développement en série de Fourier (D.S.F.) de la fonction f

Avec ;

$f(t)$ est une fonction périodique de fréquence f_o, pulsation $\omega_0 = 2n f_o$ et période $T = 1/f_o = 2\pi/\omega_o$

$C_1 \sin(\omega_0 t - \psi_1)$ représente la composante fondamentale.

$C_h \sin(h\omega_0 t - \psi_h)$ représente la $h^{ème}$ harmonique d'amplitude C_n , de fréquence nf_0, et une phase ψ_n

Le terme C_0 désigne la composante continue, c'est-à-dire la valeur moyenne du signal.

Les coefficients de la série de Fourier sont donnés par :

➢ Signification du terme constant :

Le terme constant représente la **valeur moyenne de f** :

$$c_0 = \frac{a_0}{2} = \langle f \rangle = \frac{1}{T}\int_0^T f(t)dt.$$

(Ce qui représente l'amplitude de la ***composante continue*** du signal f(t)).

➢ Calculs des coefficients de Fourier :

Pour tout $n \geq 0$, on a : $a_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t).\cos(n\omega t).dt$ et $b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t).\sin(n\omega t).dt$

$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$: *amplitude de l'harmonique de rang n*.

φ_n phase à l'origine des temps telle que : $\tan(\varphi_n) = \frac{b_n}{a_n}$.

☞ Les bornes d'intégration peuvent être modifiées à condition d'intégrer sur tout intervalle de longueur T.

Par changement de variable **:** $x = \omega t$

Les coefficients de Fourier peuvent s'écrire sous la forme :

$$a_o = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\,dx$$

$$a_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\cos(nx)\,dx$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\sin(nx)\,dx$$

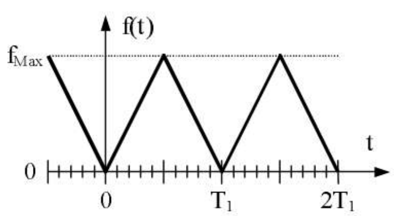
Remarques importantes :

➤ Si la fonction f est paire, tous les coefficients b_n sont nuls ($b_n=0$).

$$a_n = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} f(t).\cos(n\omega t).dt$$

Exemple ☞

Fonction paire : $\forall t,\ f(t) = f(-t)$

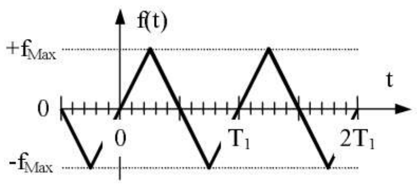


➤ Si la fonction est impaire, tous les coefficients A_h sont nuls,(***$a_0 = 0$ et $a_n=0$ pour $n\neq 0$***)

$$\boxed{b_n = \frac{4}{T}\int_0^{T/2} f(t).\sin(n\omega t).dt}$$

Exemple

Fonction impaire : $\forall t\ ,\ f(t) = -f(-t)$

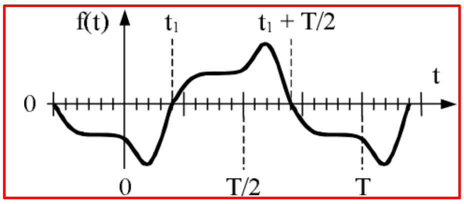


➤ Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

$$\forall t\ ,\ f(t+T/2) = -f(t) \Rightarrow \begin{cases} a_0 = 0 \\ a_{2(p+1)} = 0 \\ b_{2(p+1)} = 0 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} a_{2p+1} = \frac{4}{T}\int_{t_1}^{t_1+T/2} f(t)\ \cos\left[(2p+1)\,\omega t\right]\ dt \\ b_{2p+1} = \frac{4}{T}\int_{t_1}^{t_1+T/2} f(t)\ \sin\left[(2p+1)\,\omega t\right]\ dt \end{cases} \quad (p \in \mathbb{N})$$

Graphiquement, en faisant glisser d'une demi-période la partie de la fonction comprise entre t_1 et $t_1 + T/2$, on observe une symétrie par rapport à l'axe des temps.

Exemple



3.2 Représentation spectrale

Les coefficients C_n représentent les valeurs maximales des sinusoïdes de fréquences *f, 2f, 3f,* etc., qui forment la décomposition harmonique du signal. La signification de ces amplitudes étant claire, il est possible de représenter cette décomposition sous la forme d'un graphe donnant les valeurs efficaces des composantes en fonction de la fréquence, on parle alors de spectre.

$I_2, I_3, I_4, I_5,$ …sont les valeurs efficaces des courants harmoniques des rangs 2, 3, 4, 5, …du courant i(t) développé en série de Fourier par **:**

$$\boxed{i(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + I_3 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(3\omega t + \varphi_3) + \ldots}$$

Pour chaque courant harmonique de rang n, la valeur efficace est donnée par :

$$I_n = \frac{C_n}{\sqrt{2}}$$

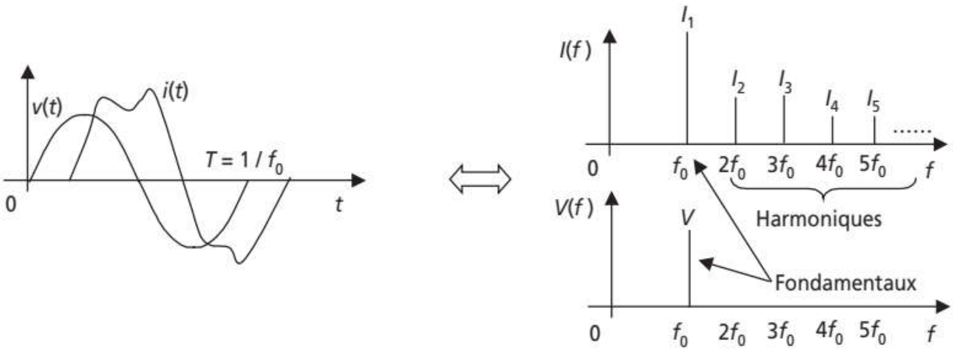
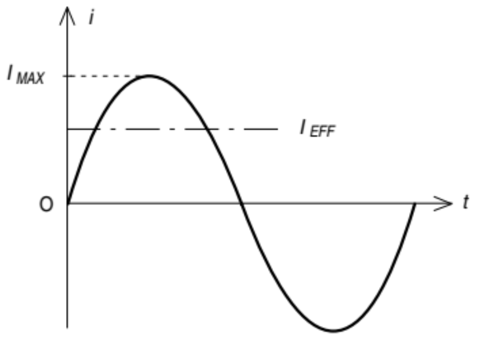
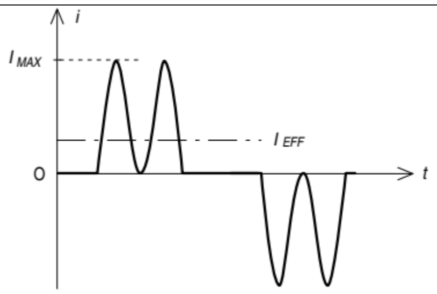


Figure 3.6 Représentation spectrale d'un signal périodique

3.3 Le facteur de crête

Le rapport entre la valeur crête (I_{MAX}) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace de ce même signal.

Courant	Forme d'onde	Facteur de crête (fc)
Courant sinusoïdale		$\frac{I_{\mathrm{MAX}}}{I_{\mathrm{efficace}}} = \sqrt{2} = 1{,}414$
Courant déformé		$Fc = \frac{valeur_{\text{crête}}}{valeur_{\text{efficace}}}$

3.4 Calcul de la valeur efficace du courant déformé

Le calcul de la valeur efficace du courant déformé s'obtient donc en effectuant la somme quadratique des courants :

$$I_{R.M.S} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{(I_{Fondamental}^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \cdots}$$

3.5 Le taux individuel d'harmonique du rang *n*

Le taux de distorsion individuel d'harmonique de rang n est le rapport entre la valeur efficace I_n de l'harmonique considérée (n) par rapport à la valeur efficace du fondamentale I_1 :

$$\tau_n = \frac{I_n}{I_1}$$

3.5 Le taux de distorsion harmonique THD

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. 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 I_1 :

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_n^2}}{I_1}$$

$$THD = \frac{1}{I_1}\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

Le courant I_{rms} peut se calculer en fonction de THD :

$$I_{rms} = I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = I_1\sqrt{1 + THD^2}$$

3.6 Expression des puissances en fonction des éléments de la décomposition en série de Fourier

a) Pour un courant déformé et une tension non déformés (de formes sinusoïdales)

- La puissance active est donnée par la formule : $P = \langle p(t) \rangle = \frac{1}{T}\int_{(T)} i(t)\cdot v(t)\mathrm{d}t = V \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$

- La puissance réactive est définie aussi à partir du fondamental de courant :

$$Q = V \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1.$$

- Pour déterminer la relation générale des puissances, on écrit que :

$$S^2 = V^2 \cdot I^2 = V^2 \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2$$

C'est-à-dire :

$$S^2 = V^2 \cdot I_1^2 + V^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = \underbrace{\left(V \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1\right)^2}_{P^2} + \underbrace{\left(V \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1\right)^2}_{Q^2} + \underbrace{V^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}_{D^2}$$

On identifie ainsi la relation exprimant la puissance déformante :

$$D = V\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

$$D = V \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = V \times \sqrt{I^2 - I_1^2} = V \times I_1 \times THD$$

b) Pour un courant et une tension déformés

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cos(h\omega_0 t + \emptyset_h)$$
$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \cos(h\omega_0 t + \theta_h)$$

Avec : I_h est la valeur efficace de l'harmonique h du courant.
V_h est la valeur efficace de l'harmonique h de la tension.
ϕ_h est la phase de l'harmonique h du courant.
θ_h est la phase de l'harmonique h de la tension.
ω_0 est la pulsation fondamentale, $\omega_0=2\pi f_0$

- La puissance active est donnée par la formule :

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt \\ &= \frac{1}{2}\sum_{h=1}^{\infty}\left(\sqrt{2}V_h\right)\left(\sqrt{2}I_h\right)\cos(\theta_h - \emptyset_h) \\ &= \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \emptyset_h) \end{aligned}$$

- La puissance réactive est définie aussi à partir du fondamental de courant :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{2}\sum_{h=1}^{\infty}\left(\sqrt{2}V_h\right)\left(\sqrt{2}I_h\right)\sin(\theta_h - \emptyset_h) \\ &= \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \emptyset_h) \end{aligned}$$

- La puissance apparente :

$$S = V.I$$

$$= \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 . I_h^2}$$

$$= V_1 . I_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}$$

$$= S_1 \sqrt{1 + THD_V^2} \sqrt{1 + THD_I^2}$$

Avec $\boldsymbol{S_1}$ est la puissance apparente à la fréquence fondamentale

- La puissance déformée :

$$D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2)$$

- Le Facteur de Puissance :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_1} . \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}\sqrt{1 + THD_I^2}} = Fp_{disp} . Fp_{dist}$$

$$Fp_{disp} = \frac{P}{S_1}$$

$$Fp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}\sqrt{1 + THD_I^2}} = \frac{V_1}{V} . \frac{I_1}{I} = \frac{S_1}{S}$$

Avec ;

Fp_{disp} : Déplacement de facteur de puissance ***DPF*** (Displacement Power Factor)

Fp_{dist} : Le facteur de puissance de distorsion

4- Harmoniques dans les systèmes d'alimentation- Leurs causes

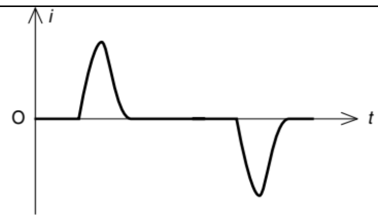
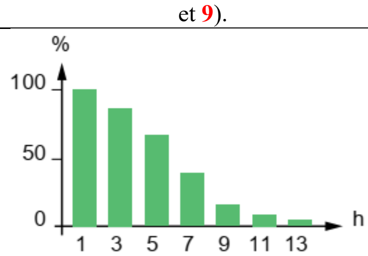
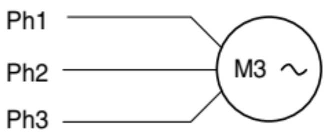
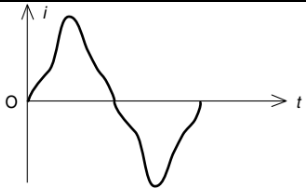
La génération de courants harmoniques, sur les réseaux d'alimentation électrique, est due à de nombreux types d'équipements, dont on peut dresser une liste non exhaustive et que l'on retrouve dans les matériels suivants **:**

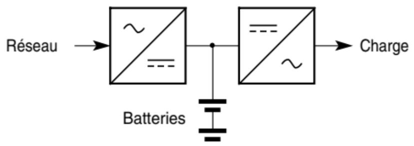
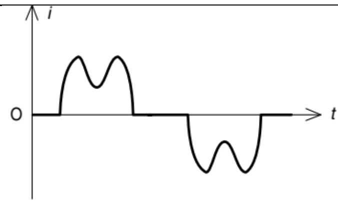
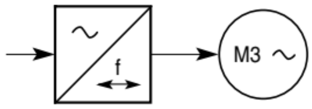
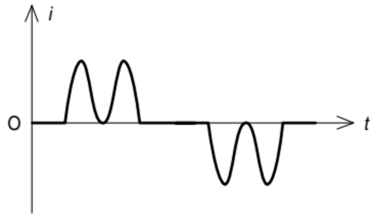
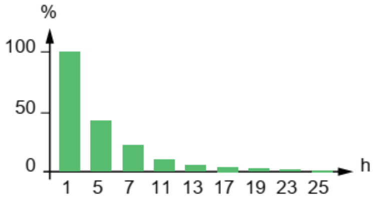
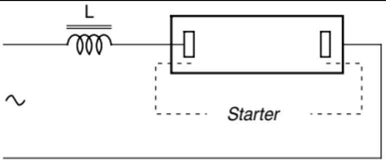
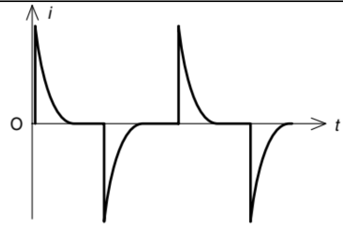
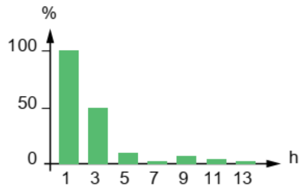
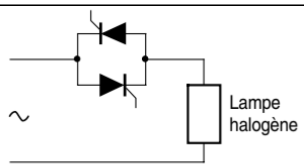
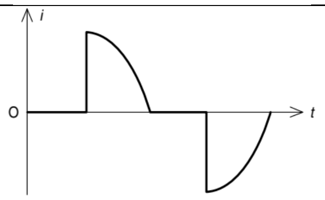
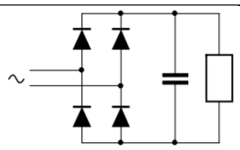
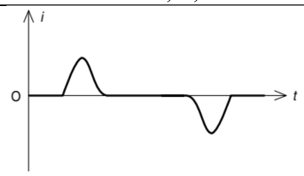
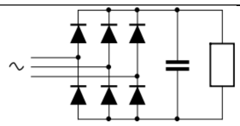
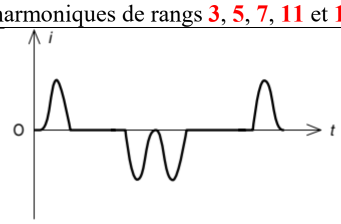
Types d'équipements générant des courants harmoniques	Dans quelles familles de matériels les trouve-t-on ?
Moteurs asynchrones monophasés et triphasés	Matériel électroménager Climatisation Outillage et machines-outils Équipements industriels
Redresseurs monophasés	Micro-ordinateurs Imprimantes et périphériques d'ordinateurs Variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs

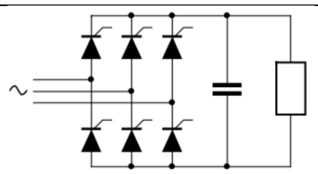
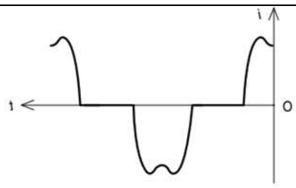
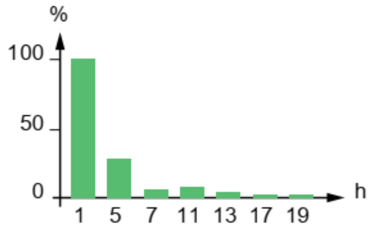
	Ballasts électroniques Téléviseurs
Gradateur à angle de phase	Modulation d'éclairage des lampes Commande de four électrique Régulation de puissance Démarreurs progressifs de moteurs
Redresseurs triphasés à base de semi-conducteurs	Variation de vitesse de moteurs (pompes, convoyeurs, etc.) Fours à induction Électrolyseurs
Appareils d'éclairage	Lampes à fluorescence Lampes à vapeur haute pression Lampes fluo compactes
Appareils à arc électrique	Fours Poste de soudure

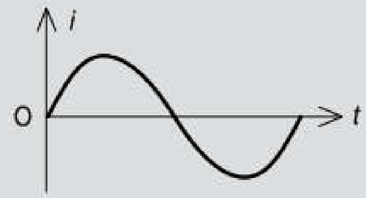
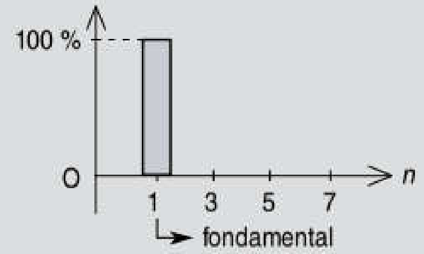
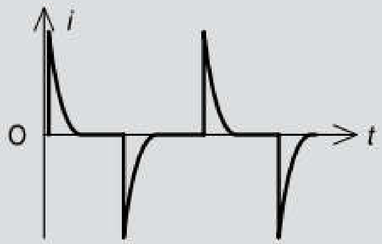
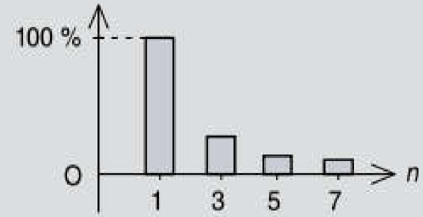
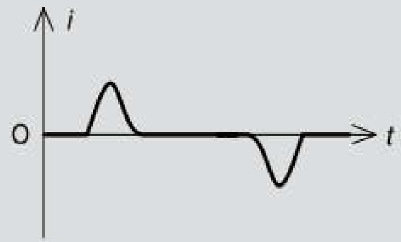
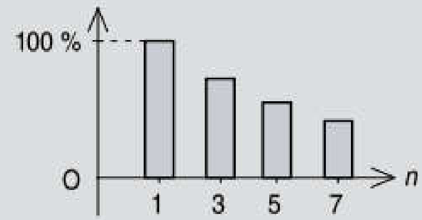
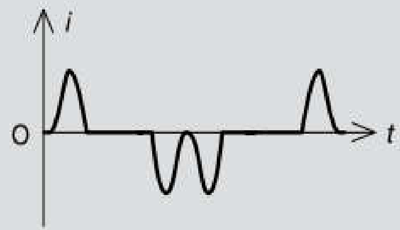
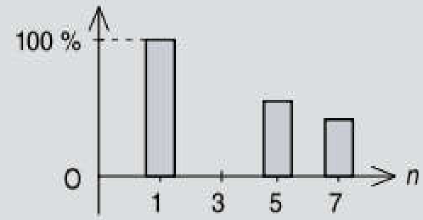
4.1 Résumé des principaux types de charges :

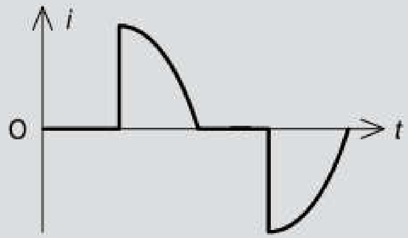
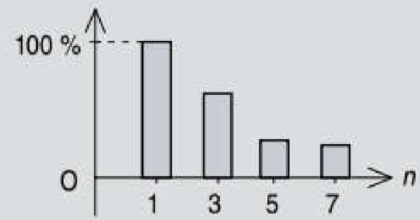
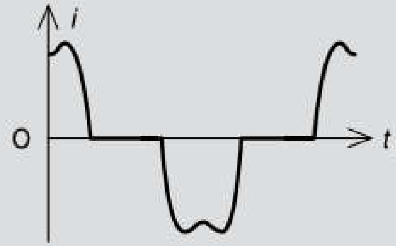
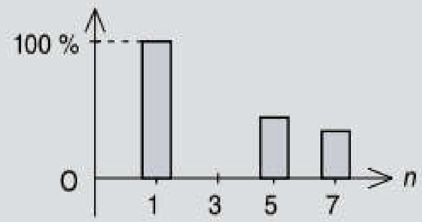
Les allures de courant appelées par les charges déformantes sont éloignées de l'allure sinusoïdale et peuvent prendre des formes très diverses. Un résumé des principaux types de charges associées à l'allure des courants correspondant appelés sur le réseau est fourni dans ci-dessous pour des applications de type domestiques, tertiaires et industrielles :

 Equipements informatiques	 Riche en harmoniques de rangs impairs : (rangs 3, 5, 7 et 9).	La plupart des équipements informatiques sont dotés d'une alimentation à découpage. Grâce à la commutation en interne de ses composants d'électronique de puissance, l'alimentation ne laisse passer le courant que de manière impulsionnelle.
		THD= 115%
 Moteur asynchrone	 plus les moteurs sont de fortes puissances, moins les harmoniques sont présents.	Les moteurs asynchrones produisent des courants harmoniques en raison des imperfections dues aux dissymétries de leur bobinage. Les taux de distorsion mesurés sont en général faibles.

 Onduleur de tension	 Des harmoniques de rang impair avec un fort taux de distorsion	Les dispositifs récents d'onduleur de tension appelés ASI (Alimentation statique ininterruptible) fournissent une tension quasi sinusoïdale grâce à la technique MLI.
 Variateur de vitesse à fréquence variable	 	Le moteur est alimenté par une onde de courant d'amplitude et de fréquence variables issues du variateur de vitesse. harmoniques de rangs impairs (rangs 5, 7, 9…). THD= 44%
 Eclairage fluorescent	 	L'éclairage fluorescent, doté de ballast, absorbe un courant qui n'est pas d'allure sinusoïdal. Harmoniques de rangs impairs : 3, 5, 7, 9… THD= 44%
 Variateur de lumière pour lampe halogène	 Harmoniques de rangs impairs : 3, 5, 7, 9…	La commande de lampes halogènes est réalisée à partir de gradateurs utilisant des thyristors afin d'assurer la modulation de puissance fournie à la lampe. Ce montage est aussi utilisé pour moduler l'énergie électrique de fours ou encore pour réaliser la commande des démarreurs de moteurs électriques (démarreur progressif)
 Redresseur monophasé avec filtrage	 harmoniques de rangs 3, 5, 7, 11 et 13	Le redresseur monophasé à filtre capacitif permet de convertir la tension alternative du réseau en une tension redressée et filtrée. Ce montage produit un fort taux de distorsion harmonique essentiellement pour les rangs 3 et 5.
 Redresseur triphasé avec filtrage	 Courant riche d'harmoniques de rangs 3, 5, 7, 11 et 13	Le redresseur à diodes avec filtrage capacitif constitue bien souvent le montage d'entrée du variateur de vitesse pour moteur asynchrone.

 Redresseur triphasé à thyristors.	 	Le redresseur triphasé à thyristors réalise la modulation de puissance de la charge (vitesse variable des moteurs à courant continu ou des moteurs synchrones, électrolyseurs, etc.) en faisant varier la tension continue appliquée à ses bornes à l'aide des thyristors. Les rangs harmoniques essentiellement présents sont les rangs **5**, **7**, **11** et **13** THD= 28%

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

Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	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.