

# Chapitre I

## Pollution harmonique - Norme

Le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de distribuer une tension sinusoïdale, de fréquence moyenne très précise (50 Hz  $\pm$  1 % en France) et de valeur efficace définie avec une certaine tolérance (400 V triphasé  $\pm$  10 % en France).

En revanche, la forme du courant demandé par l'utilisateur dépend de son application.

### 1 CHARGE LINÉAIRE

Une charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale. Une résistance, une inductance sans fer, un condensateur, une machine électromagnétique non saturée, une lampe à incandescence sont autant d'exemples de charges linéaires. Elle met en jeu exclusivement de la puissance active  $P$  et de la puissance réactive  $Q$ .

La présence de la puissance réactive conduit à une puissance apparente  $S$  supérieure à  $P$ . Les appareillages de distribution (alternateurs, transformateurs et lignes) sont dimensionnés par rapport à la puissance apparente. La présence de la puissance réactive conduit à un surdimensionnement de ces équipements. Le distributeur impose alors une valeur minimale du facteur de puissance, ce qui contraint les industriels à limiter leur consommation de puissance réactive sous peine de pénalité. Cette correction du facteur de puissance se fait par la mise en œuvre de batteries de condensateurs ou de compensateurs statiques ou synchrones.

Tant du point de vue des utilisateurs que du distributeur, la situation est idéale lorsque la puissance réactive est nulle, le facteur de puissance est égal à 1, le courant est alors en phase avec la tension.

### 2 CHARGE NON LINÉAIRE

Une charge non linéaire absorbe un courant non sinusoïdal lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale. On peut citer, à titre d'exemples de charges non linéaires, des machines électromagnétiques saturées, des dispositifs d'électronique de puissance comprenant des redresseurs, lampes à décharge, tubes fluorescents...

La puissance échangée entre le distributeur et l'utilisateur comprend les puissances active  $P$  et réactive  $Q$  véhiculées par le fondamental du courant, auxquelles s'ajoute la puissance déformante  $D$  mise en jeu par la composante harmonique du courant en admettant qu'il n'y ait pas de composante continue. La puissance apparente  $S$  est donc encore plus importante et le facteur de puissance plus défavorable qu'avec une charge linéaire.

De plus, à très forte échelle, l'absorption de courants non sinusoïdaux provoque également des déformations de la tension du secteur non négligeables, préjudiciables à tous.

Pour améliorer le facteur de puissance, l'utilisateur doit donc réduire la puissance déformante  $D$  qu'il rejette sur le réseau. Il peut, pour cela, mettre en place des filtres (passifs ou actifs) qui réduisent ou éliminent un ou plusieurs harmoniques du courant.

Un pré-régulateur PFC (Power Factor Corrector) est un dispositif qui permet d'agir à la fois sur la puissance réactive  $Q$  et la puissance déformante  $D$  pour s'approcher du cas idéal du facteur de puissance unitaire. Il est adapté aux charges comprenant un redresseur en tête avec filtrage capacitif de petite et moyenne puissance (alimentation à découpage).

### 3 LA NORME EN 61000-3-2

Cette norme définit les contraintes harmoniques de courant injecté par un appareillage dans le réseau public d'alimentation basse tension. Elle concerne les dispositifs absorbant une intensité inférieure ou égale à 16 A par phase. Les réseaux concernés sont monophasés (220 V à 240 V) ou triphasés (380 V à 415 V) de fréquence 50 Hz ou 60 Hz.

La norme EN 61000-3-2 répartit ces appareillages en quatre classes :

Classe A : appareils triphasés équilibrés, appareils électroménagers, outillages électriques fixes, gradateurs pour lampes à incandescence, équipements audio,....., et tout autre équipement n'appartenant à aucune des autres classes.

Classe B : outillages électriques portatifs, appareils de soudage à l'arc non professionnels.

Classe C : installations d'éclairage comprenant les variateurs de lumière.

Classe D : appareillages d'une puissance active inférieure ou égale à 600 W. Ordinateurs personnels, moniteurs et téléviseurs par exemple.

En régime permanent les limites supérieures à ne pas dépasser sont données par le tableau suivant ( $F_p$  est le facteur de puissance) :

| Rang de l'harmonique | Classe A<br>En (A)  | Classe B<br>En (A)   | Classe C<br>En (%) | Classe D<br>(mA/W) |
|----------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| $n = 3$              | 2,3                 | 3,45                 | $30 F_p$           | 3,4                |
| 5                    | 1,14                | 1,71                 | 10                 | 1,9                |
| 7                    | 0,77                | 1,15                 | 7                  | 1,0                |
| 9                    | 0,4                 | 0,6                  | 5                  | 0,5                |
| 11                   | 0,33                | 0,5                  | 3                  | 0,35               |
| 13                   | 0,21                | 0,315                | 3                  | 0,3                |
| 15 à 39              | $0,15 \frac{15}{n}$ | $0,225 \frac{15}{n}$ | 3                  | $\frac{3,85}{n}$   |
| 2                    | 1,08                | 1,62                 | 2                  |                    |
| 4                    | 0,43                | 0,645                |                    |                    |
| 6                    | 0,3                 | 0,45                 |                    |                    |
| 8 à 40               | $0,23 \frac{8}{n}$  | $0,345 \frac{8}{n}$  |                    |                    |

**Tableau n°1** : Extrait de la norme EN 61000-3-2

Pour la classe B, les valeurs limites sont celles de la classe A multipliées par 1,5.

Pour la classe C, la valeur efficace de l'harmonique est exprimée en % de la valeur efficace de la composante fondamentale du courant absorbé.

En régime transitoire :

- Les courants harmoniques de durée inférieure à 10 secondes, lors de la mise sous tension ou de l'arrêt d'un appareil par exemple, ne sont pas pris en compte ;
- Les limites données en régime permanent sont applicables lors de régimes transitoires apparaissant pendant le fonctionnement.

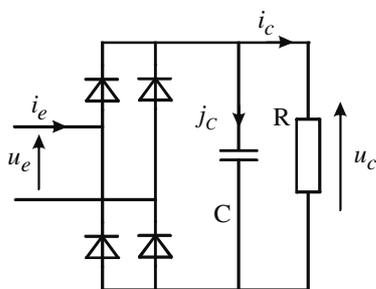
## 4 REDRESSEMENT MONOPHASÉ EN PONT TOUT DIODES, FILTRAGE CAPACITIF

L'exemple ci-dessous illustre la problématique décrite ci-dessus.

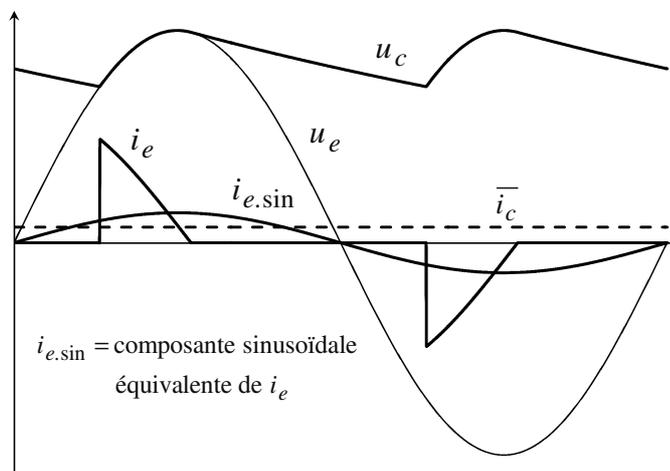
Avec la généralisation des dispositifs électroniques, la tension sinusoïdale est très fréquemment convertie en tension continue. Cette conversion est souvent réalisée par un redresseur à diodes avec filtrage capacitif. Ce schéma est très présent dans nos applications : on le trouve comme premier étage de la plupart des alimentations à découpage (alimentation d'ordinateurs, de chargeurs, ...).

### 4.1 Oscillogrammes

Le schéma du redresseur monophasé en pont tout diodes, avec un filtrage capacitif est donné sur la figure I.1. La résistance R représente la charge pour un point de fonctionnement donné. La figure I.2 regroupe les évolutions des grandeurs électriques dans le cas d'une source dont l'impédance interne n'est pas négligeable.



**Figure I.1** : Schéma du redresseur étudié



**Figure I.2** : Allures des grandeurs électriques.

On constate que le courant en ligne  $i_e$  n'existe qu'au moment où le condensateur se charge, ce qui conduit à une valeur de crête de ce courant qui peut être très importante par rapport au courant moyen dans la charge.

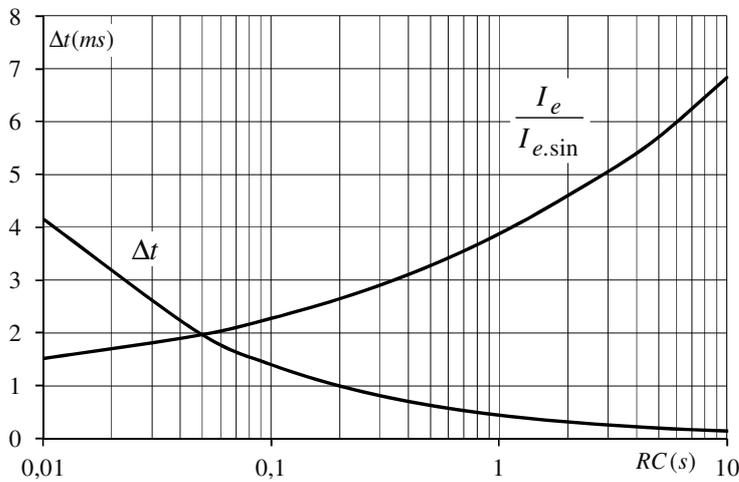
Toute l'énergie demandée par la charge est apportée pendant l'existence du courant en ligne : sur une demi-période, la valeur moyenne de  $i_e$  est égale à celle du courant dans la résistance.

Plus le filtrage est efficace (constante de temps  $RC$  très grande par rapport à la période), plus la durée d'existence  $\Delta t$  de  $i_e$  est faible, et donc, pour garder la même valeur moyenne, la valeur de crête de  $i_e$  se trouve accrue.

## 4.2 Contraintes pour le réseau

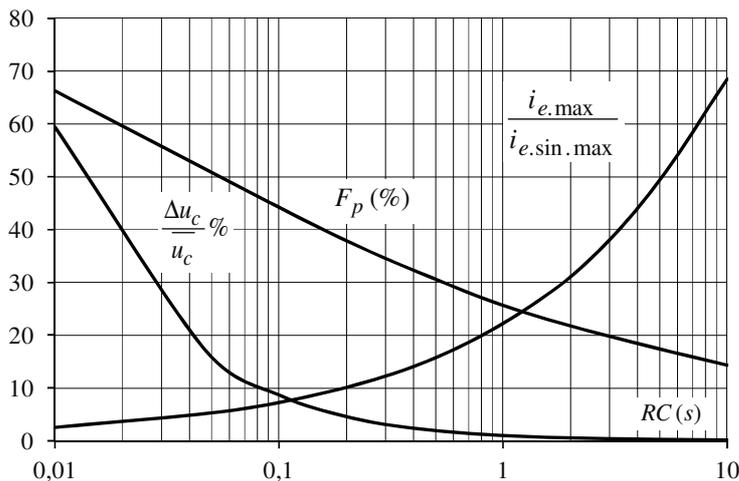
Pour caractériser les contraintes liées à ce courant  $i_e$  pour le réseau, on peut le comparer au courant  $i_{e,\sin}$  qui serait le courant équivalent sinusoïdal en phase avec la tension du réseau ( $F_P = 1$ ) et qui véhiculerait la même puissance active  $P$ .

Dans le cas d'une source dont l'impédance interne est négligeable pour les différentes puissances mises en jeu, on donne les allures des différentes grandeurs caractérisant les contraintes pour la source par les courbes suivantes :



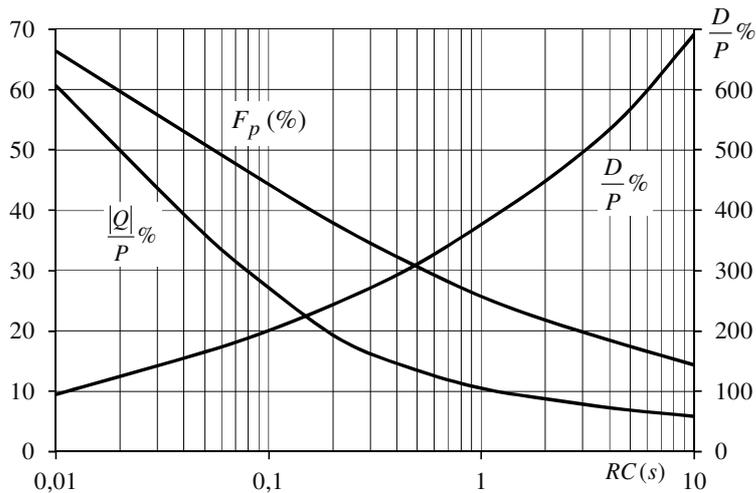
**Figure I.3 :**

Allures du rapport  $\frac{I_e}{I_{e,\sin}}$  et de la durée de conduction des diodes  $\Delta t$  en fonction de  $RC$ .



**Figure I.4 :**

Allures du facteur de puissance  $F_P$ , du rapport  $\frac{i_{e,\max}}{i_{e,\sin,\max}}$  et du taux d'ondulation de la tension de sortie  $\frac{\Delta u_c}{u_c}$  en fonction de  $RC$ .

**Figure 1.5 :**

Allures des puissances  $|Q|$  et  $D$  relatives à  $P$  et du facteur de puissance  $F_p$  en fonction de  $RC$ .

Ainsi, plus  $RC$  augmente, plus la durée de conduction des diodes  $\Delta t$  est courte, plus le courant en ligne est impulsionnel. La puissance déformante augmente considérablement, et malgré une diminution de la puissance réactive  $Q$  (le déphasage entre le fondamental de courant et la tension tend à s'annuler), le facteur de puissance se dégrade.

Le tableau ci-dessous rassemble les données caractérisant les contraintes imposées à la source pour deux valeurs de  $RC$  très différentes.

| RC  | $\frac{\Delta u_c}{u_c}$ | $\frac{i_{e,max}}{i_{e,sin,max}}$ | $\frac{I_e}{I_{e,sin}}$ | $\frac{ Q }{P}$ | $\frac{D}{P}$ | $F_p$ |
|-----|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|-------|
| 0,1 | 8,7 %                    | 7,3                               | 2,3                     | 0,27            | 2,0           | 0,44  |
| 10  | 0,1 %                    | 67,6                              | 6,8                     | 0,06            | 6,9           | 0,14  |

**Tableau n°2 :** Contraintes imposées à la source pour un filtrage capacitif

L'exemple numérique suivant, tiré des données du tableau précédent, permet de fixer les ordres de grandeurs, pour  $U = 230\text{ V}$  et  $P = 150\text{ W}$ .

| RC    | $Q$     | $D$      | $F_p$ | $I_e$  | $I_{e,sin}$ | $i_{e,max}$ | $i_{e,sin,max}$ |
|-------|---------|----------|-------|--------|-------------|-------------|-----------------|
| 0,1 s | -40 var | 294 vad  | 0,44  | 1,44 A | 0,65 A      | 6,7 A       | 0,92 A          |
| 10 s  | -9 var  | 1035 vad | 0,14  | 4,5 A  | 0,65 A      | 62 A        | 0,92 A          |

**Tableau n°3 :** Exemple numérique pour un filtrage capacitif

Ces valeurs sont à modérer dans le cas d'une source dont l'impédance n'est pas négligeable. Les contraintes pour le réseau et les composants (diodes et condensateur) resteront malgré tout très fortes.

L'analyse harmonique de cet exemple donne les résultats suivants avec  $RC = 0,1 \text{ s}$  :

|          | $I_f$  | $I_{h3}$       | $I_{h5}$     | $I_{h7}$    | $I_{h9}$    | $I_{h11}$   | $I_{h13}$   | $I_{h15}$   |
|----------|--------|----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Valeurs  | 0,67 A | 0,64 A         | 0,59 A       | 0,51 A      | 0,42A       | 0,33 A      | 0,25 A      | 0,18 A      |
| Classe A |        | 2,3 A          | 1,14 A       | 0,77 A      | 0,4 A       | 0,33 A      | 0,21 A      | 0,15 A      |
| Classe B |        | 3,45 A         | 1,71 A       | 1,15 A      | 0,6 A       | 0,5 A       | 0,315 A     | 0,23 A      |
| Classe C |        | 98 %<br>13,2 % | 88 %<br>10 % | 76 %<br>7 % | 63 %<br>5 % | 49 %<br>3 % | 37 %<br>3 % | 27 %<br>3 % |
| Classe D |        | 0,51 A         | 0,15 A       | 0,08 A      | 0,5 A       | 0,05 A      | 0,05 A      | 0,03 A      |

**Tableau n°4** : Filtrage capacitif : correspondance à la norme EN 61000-3-2

Les valeurs en italiques indiquent les valeurs maximales admissibles par la norme EN 61000-3-2. Pour un réseau monophasé 230 V, cette norme concerne les charges de puissance apparente inférieure ou égale à  $S = 3680 \text{ VA}$ . Dans cette étude la puissance apparente est de  $S = 330 \text{ VA}$ . Pour la classe A, le tableau 4 montre que les valeurs efficaces des harmoniques 9, 13 et 15 sont supérieures aux valeurs imposées par la norme (cases grisées). Pour la classe B la norme est respectée. En revanche, le dispositif ne convient pas pour les classes C et D.

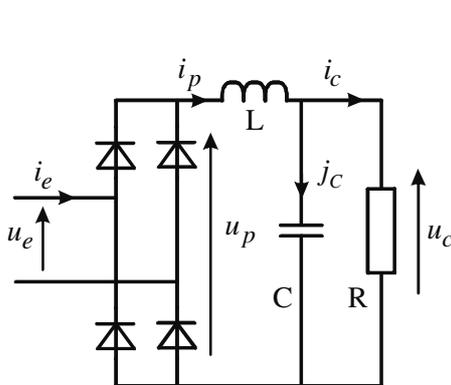
### 4.3 Amélioration par un filtrage inductif et capacitif

Pour réduire les contraintes supportées par la source tout en ayant une tension de sortie faiblement ondulée, il faut placer en sortie du pont un filtre LC. On cherche à déterminer les conditions pour que la tension en sortie du redresseur soit formée de deux alternances sinusoïdales (conduction ininterrompue du redresseur).

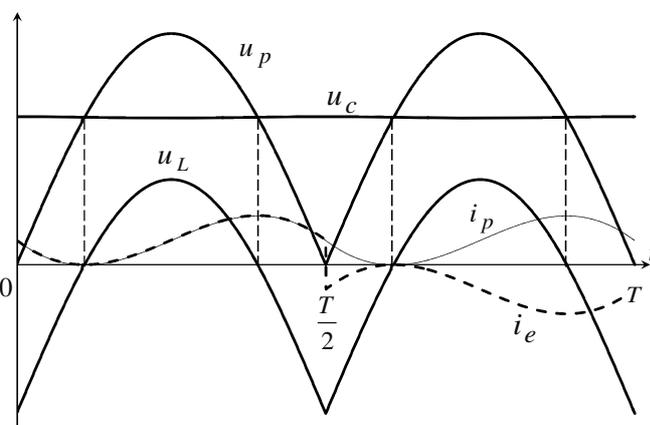
On se place dans l'hypothèse où la tension en sortie du filtre LC est quasi-continue  $u_c \approx \overline{u_c}$ .

$$u_L = u_p - \overline{u_c} = U_e \sqrt{2} |\sin \theta| - \frac{2U_e \sqrt{2}}{\pi} = L\omega \frac{di}{d\theta}$$

$u_L$  est une composante alternative puisque  $\overline{u_L} = 0$  en régime permanent.



**Figure I.6** : Redresseur avec un filtre LC



**Figure I.7** : Allures des grandeurs électriques en conditions limites

$$i_a = \frac{U_e \sqrt{2}}{L\omega} \left[ -\cos \theta - \frac{2}{\pi} \theta \right] + K \text{ pour } 0 \leq \theta \leq \pi \text{ avec } K \text{ une constante.}$$

La période de  $i_a$  est  $\pi$  (c'est la même que celle de  $u_p$ ). Par définition, la valeur moyenne de cette composante alternative est nulle. On peut donc exprimer la constante  $K$  :

$$\bar{i}_a = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \left( \frac{U_e \sqrt{2}}{L\omega} \left[ -\cos \theta - \frac{2}{\pi} \theta \right] + K \right) d\theta = -\frac{U_e \sqrt{2}}{L\omega} + K = 0$$

$$\text{D'où } K = \frac{U_e \sqrt{2}}{L\omega} \text{ et donc } i_a = \frac{U_e \sqrt{2}}{L\omega} \left[ 1 - \cos \theta - \frac{2}{\pi} \theta \right]$$

Les extrêmes de  $i_a$  se produisent lorsque  $u_L$  s'annule ( $di/dt = 0$ ) c'est-à-dire quand  $u_p = \bar{u}_c$ . Cette égalité se vérifie pour  $\theta_1 = \theta_{\min}$  et  $\theta_2 = \theta_{\max} = \pi - \theta_{\min}$ .

$$\text{Avec : } U_e \sqrt{2} \sin \theta_{\min} = \frac{2U_e \sqrt{2}}{\pi}$$

$$\text{soit : } \arcsin \theta_{\min} = \frac{2}{\pi} \quad 0 < \theta_{\min} < \frac{\pi}{2} \quad \text{soit : } \theta_{\min} = 39,5^\circ$$

$$\theta_{\max} = \pi - \theta_{\min} \quad \text{soit : } \theta_{\max} = 129,5^\circ$$

La valeur minimale de  $i_a$  est donc :

$$i_{a.\min} = \frac{U_e \sqrt{2}}{L\omega} \left[ 1 - \cos \theta_{\min} - \frac{2}{\pi} \theta_{\min} \right] = -0,30 \frac{U_e}{L\omega}$$

$$\text{pour } f = 50\text{Hz} : i_{a.\min} = -0,95 \times 10^{-4} \frac{U}{L} = -0,095 \frac{U}{L} \text{ (L en mH)}$$

Pour obtenir une conduction ininterrompue du redresseur, il faut que la composante continue de  $i$ , donc du courant dans la charge, soit supérieure en valeur absolue à  $i_{a.\min}$ .

En reprenant une puissance  $P = 150$  W et un taux d'ondulation de la tension de sortie de 8,7 % (correspondant au cas où  $RC = 0,1$  s dans l'exemple précédent) on obtient en se plaçant dans le cas d'une conduction ininterrompue les résultats suivants :

| $\frac{\Delta u_c}{u_c}$ | $Q$    | $D$     | $F_p$ | $I_e$  | $I_{e.\sin}$ | $i_{e.\max}$ | $i_{e.\sin.\max}$ |
|--------------------------|--------|---------|-------|--------|--------------|--------------|-------------------|
| 8,7%                     | 11 var | 121 vad | 0,78  | 0,84 A | 0,65 A       | 1,3 A        | 0,92 A            |

**Tableau n°5 :** Contraintes imposées à la source pour un filtrage inductif et capacitif

L'analyse harmonique de cet exemple donne les résultats suivants avec  $LC\omega^2 = 4$

|          | $I_f$ | $I_{h3}$         | $I_{h5}$       | $I_{h7}$      | $I_{h9}$     | $I_{h11}$    | $I_{h13}$    |
|----------|-------|------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
|          | 0,75  | 0,28             | 0,14           | 0,10          | 0,07         | 0,06         | 0,05         |
| Classe A |       | 2,3 A            | 1,14 A         | 0,77 A        | 0,4 A        | 0,33 A       | 0,21 A       |
| Classe B |       | 3,45 A           | 1,71 A         | 1,15 A        | 0,6 A        | 0,5 A        | 0,315 A      |
| Classe C |       | 37,3 %<br>23,4 % | 18,6 %<br>10 % | 13,3 %<br>7 % | 9,3 %<br>5 % | 8,0 %<br>3 % | 6,7 %<br>3 % |
| Classe D |       | 3,4 A            | 1,9 A          | 1,0 A         | 0,5 A        | 0,35 A       | 0,30 A       |

**Tableau n°6 :** Filtrage LC : correspondance à la norme EN 61000-3-2

Dans cette étude la puissance apparente est de  $S = 193$  VA. Les résultats de l'analyse harmonique montrent une nette amélioration de la qualité du courant absorbé : la norme EN 61000-3-2 est respectée pour les classes A, B et D. En revanche, elle ne l'est pas pour la classe C.

#### 4.4 Conséquences sur la tension du réseau

La modélisation d'un réseau électrique réel fait apparaître l'association en série d'une source de tension sinusoïdale parfaite avec une impédance de nature inductive et résistive.

La circulation de courants non sinusoïdaux provoque, dans cette impédance, une chute de tension non sinusoïdale.

La généralisation des applications mentionnées précédemment fait que l'énergie est toujours demandée autour des extremums et est importante. Cette énergie crée donc une tension non sinusoïdale aux bornes de l'impédance du réseau, ce qui provoque une déformation très visible de la tension réseau disponible pour l'ensemble des utilisateurs.

#### 4.5 Distribution triphasée alimentant des charges monophasées non linéaires

L'alimentation des appareils tels que les ordinateurs et de nombreux équipements monophasés se fait entre phase et neutre. En admettant que chaque phase alimente le même nombre d'appareils consommant le même courant, le courant dans le neutre ne sera pas nul contrairement au cas d'une charge linéaire équilibrée faisant circuler des courants sinusoïdaux.