

Chapitre 2 Dégradation de la qualité de l'énergie

2.1 Notion de charges linéaires et non linéaires

2.1.1 L'origine des charges déformantes

Dans le passé, la majorité des charges raccordées aux réseaux électriques étaient des **charges linéaires**.

Ces charges absorbent un courant dont la forme est **identique à celle de la tension**, c-à-d quasi sinusoïdale.

Exemple: (figure 2.1)

- ✓ les **convecteurs électriques** ou
- ✓ les **lampes à incandescence**.

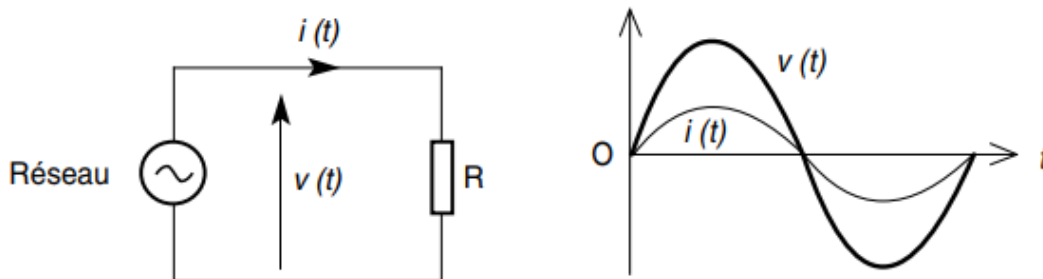


Figure 2.1 – Signaux relatifs à une charge linéaire.

Avec l'évolution technologique et l'introduction massive de **l'électronique intégrée** dans les équipements électriques, la nature des charges a profondément changé.

Les charges modernes absorbent désormais des **courants déformés**, non sinusoïdaux, même lorsque la tension d'alimentation reste sinusoïdale.

Ces courants déformés sont composés de **composantes harmoniques**, dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale du réseau (50 Hz). (Figure 2.2).

Il devient donc indispensable de **distinguer clairement** :

- les **charges linéaires**, qui ne déforment pas ou peu le courant,
- les **charges non linéaires** (ou charges déformantes), qui génèrent des harmoniques.

Cette identification peut se faire:

- soit par la **connaissance de la technologie** de l'équipement,
- soit par la **mesure électrique**, en analysant la forme du courant absorbé.

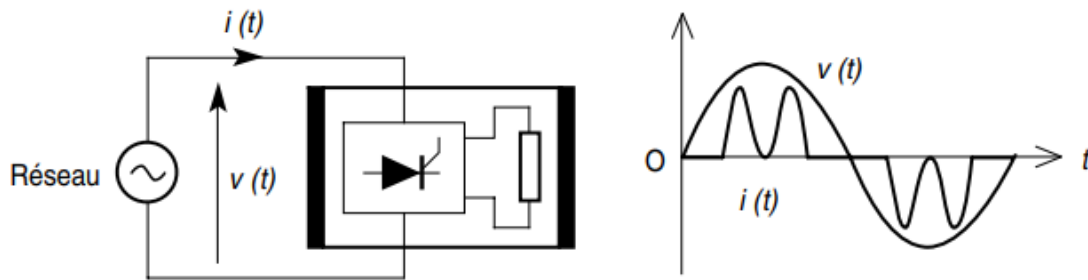


Figure 2.2 – Signaux relatifs à une charge non linéaire.

Limites de la valeur efficace

La **valeur efficace (RMS)** d'un signal n'est plus suffisante, à elle seule, pour caractériser la qualité d'un courant.

Elle traduit uniquement les **effets thermiques** du courant, mais **ne renseigne pas sur sa forme**, qui est devenue un critère essentiel pour l'analyse de la **qualité de l'énergie électrique**, notamment en BT.

Exemples de charges non linéaires (charges polluantes)

Parmi les équipements responsables de la déformation des signaux électriques:

- les **convertisseurs de l'électronique de puissance**,
- les **machines à souder** et les **fours à arc**,
- les **alimentations à découpage** utilisées dans :
 - l'informatique (secteurs tertiaire et industriel),
 - les appareils électroménagers,
- tous les équipements intégrant des **semi-conducteurs**.

Dans le secteur industriel, ces équipements sont **nombreux et répartis sur différents postes**, ce qui rend la pollution harmonique diffuse et parfois difficile à maîtriser.

*[Une **alimentation à découpage** (SMPS) est un convertisseur de puissance électronique qui régule la tension en hachant rapidement (à haute fréquence) le courant, offrant ainsi un meilleur rendement, un poids et un encombrement réduits par rapport aux alimentations linéaires traditionnelles.*

*Elle transforme une tension (souvent du **230V AC**) en une autre, souvent (**DC**), **plus stable et précise**, grâce à un transistor de commutation et un transformateur haute fréquence, permettant de réduire, d'augmenter ou d'inverser la tension d'entrée.*

***Découpage** : Un transistor hache rapidement ce courant continu en impulsions (train d'ondes carrées) à des fréquences de plusieurs dizaines à centaines de kHz (par exemple, 50 kHz à 1 MHz).]*

2.1.2 Une application de charge dite linéaire

Une **charge linéaire** correspond à un type de récepteur largement connu et utilisé dans les réseaux de distribution électrique. Elle regroupe les équipements classiques tels que :

- les **convecteurs électriques**,
- les **lampes à incandescence**,
- les récepteurs comportant des **éléments purement résistifs**,
- mais également des charges intégrant des **éléments passifs** comme les **inductances** ou les **condensateurs**, à l'image des **moteurs électriques**.

Lorsqu'une charge linéaire est alimentée par une **tension sinusoïdale**, elle absorbe un **courant de même forme**, également sinusoïdal.

Il existe alors, à chaque instant, une **proportionnalité directe entre la tension et le courant**, ce qui constitue la caractéristique fondamentale des charges linéaires. (Fig. 2.4)

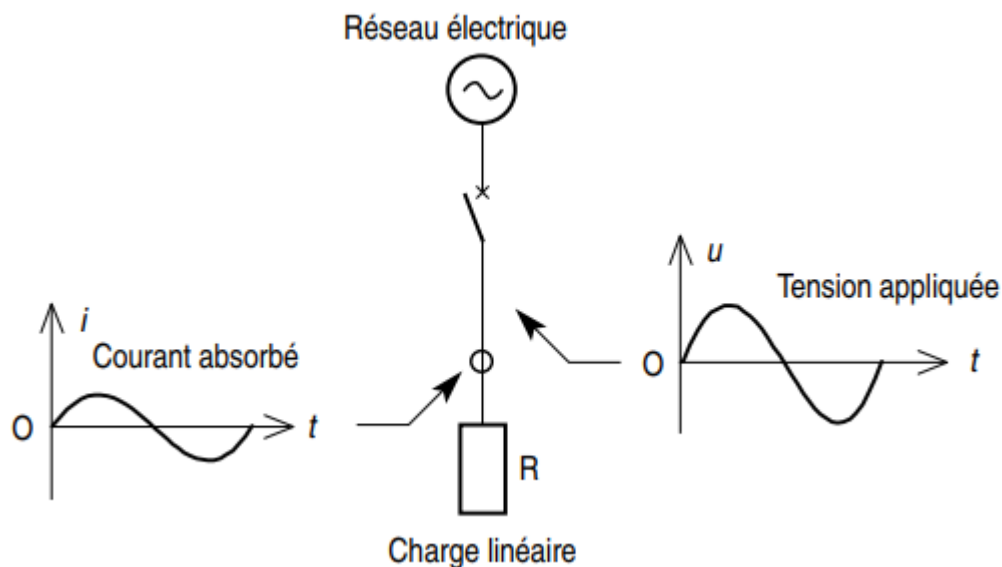


Figure 2.4 – Proportionnalité entre tension et courant pour une charge linéaire.

Puissance et facteur de puissance

Pour une charge linéaire purement résistive, la **puissance absorbée** est simplement le produit instantané de la tension et du courant.

En revanche, lorsque la charge comporte des éléments inductifs ou capacitifs, un **déphasage** apparaît entre la tension et le courant. Ce déphasage est caractérisé par l'angle ϕ . (Fig. 2.5)

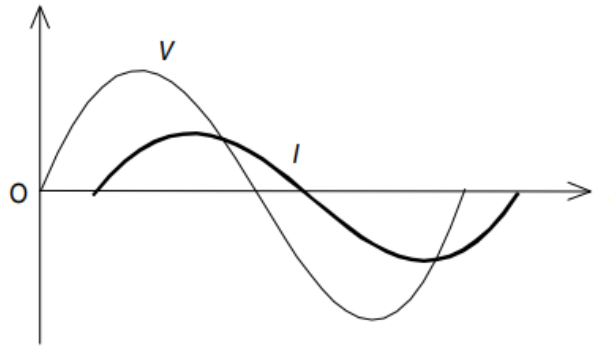


Figure 2.5 – Différence de phase entre tension et courant.

Le **facteur de puissance (k)** est défini comme :

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

- P est la **puissance active**,
- S est la **puissance apparente**.

Le facteur de puissance est toujours **inférieur ou égal à 1**.

La puissance apparente étant calculée de la façon suivante :

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

Q: la puissance réactive

Pour des signaux **purement sinusoïdaux**, on utilise la notation **cosφ**.

Exemple: un **moteur asynchrone** de 3 kW présente généralement un cosφ d'environ **0,82**.

Expressions de la puissance active :

En régime sinusoïdal, la puissance active consommée par une charge linéaire est donnée par :

- $P = U \times I \times \cos\phi$ en monophasé.
- $P = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos\phi$ en triphasé.

Résumé: La notion de **charge linéaire** :

- s'applique aussi bien aux charges **purement résistives** qu'aux charges comportant des **composants passifs** (inductances et condensateurs),
- repose sur la **proportionnalité entre la tension et le courant**,
- conduit à des signaux sinusoïdaux ne générant **pas d'harmoniques**.

2.1.3 Une application de charge dite non linéaire:

Une **charge non linéaire** est constituée principalement de **composants à semi-conducteurs**, qui sont les éléments de base des dispositifs de l'**électronique de puissance** et de l'électronique moderne.

Ces composants modifient profondément le comportement électrique des charges raccordées au réseau.

Lorsqu'une charge non linéaire est alimentée par une **tension sinusoïdale**, elle absorbe un **courant déformé**, c.-à-d **non sinusoïdal**.

Il n'existe alors plus de proportionnalité instantanée entre la tension et le courant, ce qui constitue la différence fondamentale avec une charge linéaire. (**Figure 2.6**).

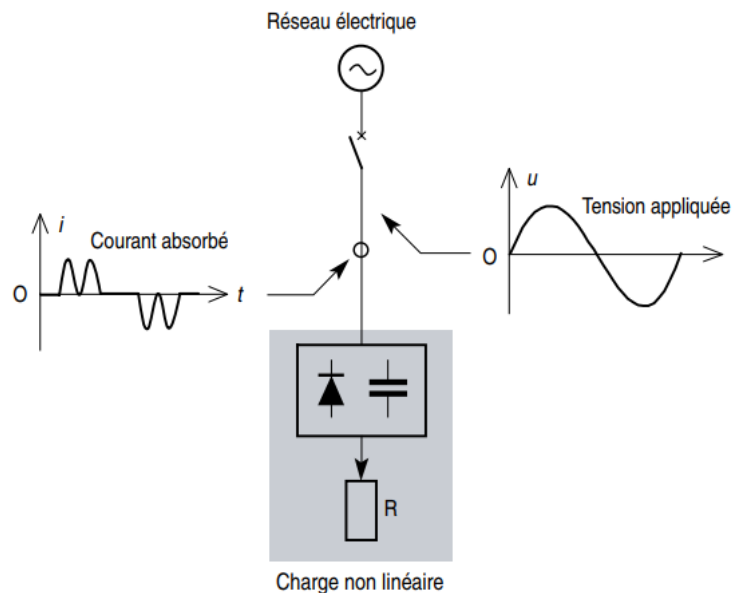


Figure 2.6 – Non-linéarité entre tension et courant pour une charge déformante.

Facteur de puissance en présence de signaux déformés

Dans le cas de signaux non sinusoïdaux, la notion classique de $\cos\phi$ n'est plus suffisante pour caractériser le comportement énergétique de la charge.

On introduit alors le **facteur de puissance global FP** (PF *Power Factor* en anglais), défini par :

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

En présence d'harmoniques, la puissance apparente s'écrit :

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

où :

- P est la **puissance active**,
- Q est la **puissance réactive**,
- D est la **puissance déformante**, liée à la distorsion harmonique.

La **puissance déformante D** traduit l'impact des harmoniques sur l'installation.

Sa présence entraîne une **dégradation supplémentaire du facteur de puissance**, même si le déphasage entre tension et courant fondamentaux est faible.

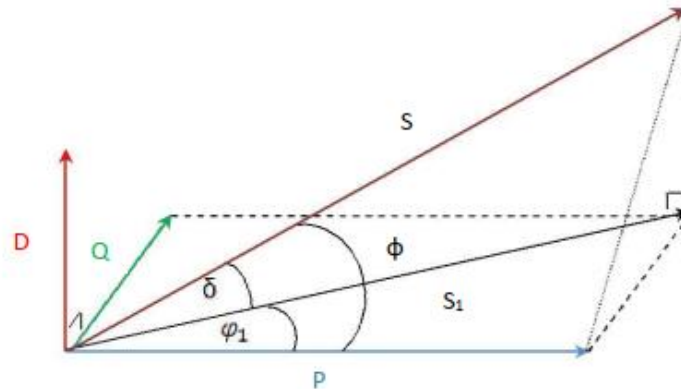


Figure II.11 : Diagramme de Fresnel des puissances

DPF (Displacement Power Factor) et distinction avec le facteur de puissance:

Afin d'éviter toute confusion entre :

- le $\cos\phi$ utilisé en régime sinusoïdal,
- et le **facteur de puissance global FP** en régime déformé,

les appareils de mesure utilisent le terme **DPF**.

Le **DPF** correspond au **cosinus du déphasage entre les composantes fondamentales** de la tension et du courant.

Il représente donc le **déphasage réel U-I**, indépendamment de la distorsion harmonique.

Il est important de noter que :

- la **compensation d'énergie réactive** agit uniquement sur le déphasage (fondamentales),
- elle n'élimine pas les harmoniques.

Ainsi :

- **DPF = FP** uniquement lorsque les signaux sont **non déformés**,

- en présence d'harmoniques, **FP** < **DPF**.

Le facteur de déplacement DPF (Displacement Power Factor) représente le facteur de puissance mettant en évidence seulement le fondamental du courant et celui de la tension.

$$FP = DPF \times \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

1) Décomposition d'une onde déformée

considérons deux sources de tension e_1 et e_2 raccordées en série (Fig.2a). La tension e_1 a une valeur crête de 100 V et une fréquence de 60 Hz. La tension e_2 a une valeur crête de 20 V et une fréquence de 180 Hz. Il s'ensuit que e_1 est la fondamentale et e_2 le troisième harmonique. Les deux formes d'onde sont parfaitement sinusoïdales et on suppose qu'elles passent par zéro en même temps (Fig.2b). Comme les sources sont en série, la tension e_3 aux bornes a, b est égale à la somme des tensions instantanées produites par chaque source. On constate que la tension e_3 a une forme d'onde aplatie.

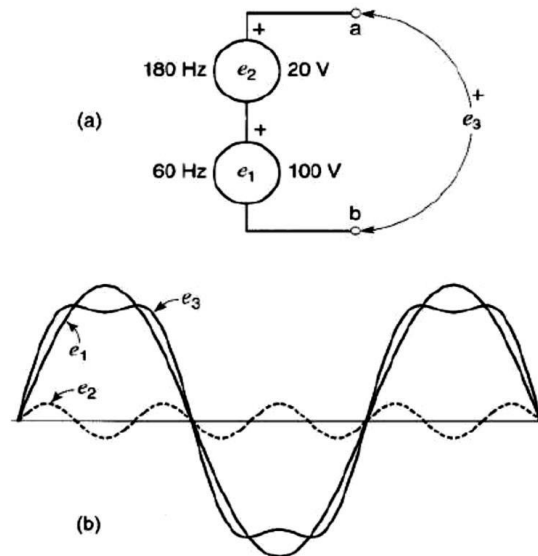


Figure II.2 : a. Deux sources sinusoïdales de 60 Hz et 180 Hz raccordées en série, b. La tension e_3 résultante est distorsionnée.

On peut représenter une tension distorsionnée au moyen d'un diagramme vectoriel. Il suffit d'indiquer la fréquence, l'amplitude et la valeur initiale de chacune de ses composantes. Par exemple, le diagramme vectoriel de la Fig.3a indique :

- 1) une tension fondamentale EF de 100 V crête, 60 Hz avec un angle initial 0° ; ce vecteur tourne à raison de 60 tours par seconde dans le sens antihoraire.
- 2) un 5e harmonique EH de 20 V crête, 300 Hz, avec un angle initial de 60° ; ce vecteur tourne 5 fois plus vite que la fondamentale.

La forme d'onde distorsionnée composée de la fondamentale et l'harmonique s'exprime par l'équation :

$$E = 100 \sin \theta + 20 \sin (5\theta + 60^\circ) \text{ où}$$

$$\theta = 360 ft = 360 \times 60 \times t \text{ (angles en degrés)}$$

La forme d'onde durant un cycle est montrée à la Fig.3b.

En plus de l'amplitude et de la fréquence, la forme d'onde dépend aussi de l'angle initial des composantes harmoniques. Par exemple, si l'angle initial du vecteur à 300 Hz est de 180° au lieu de 60° , l'onde résultante a la forme montrée à la Fig.4.

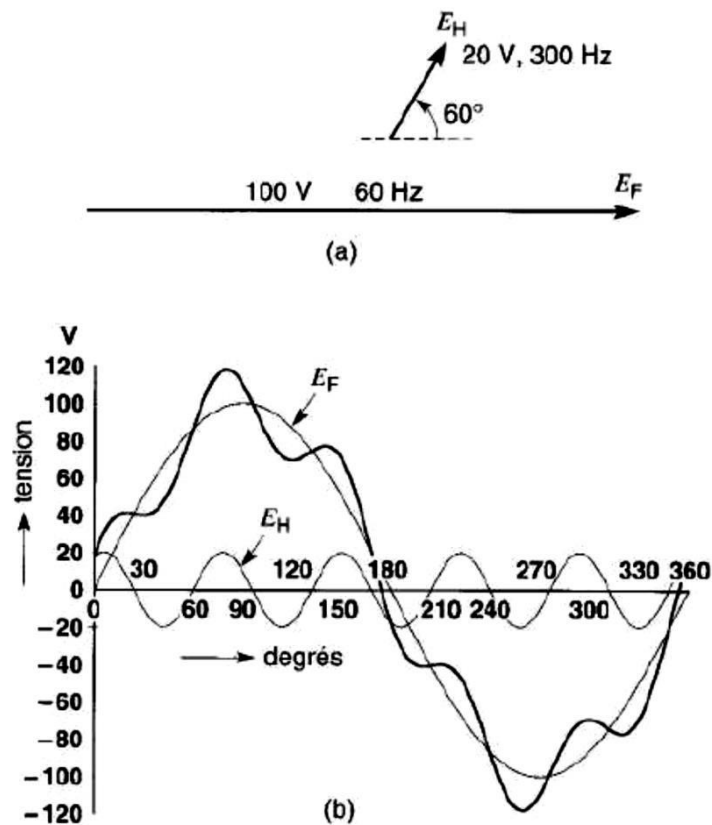


Figure 3 a) Représentation vectorielle (phasorielle) de la fondamentale et d'une harmonique tournant à des vitesses différentes.

b) Forme d'onde de la tension résultante obtenue par la superposition de la fondamentale et de l'harmonique.

Explication :

(a) Représentation vectorielle (phasors)

On a deux composantes :

- la **fondamentale** $E_F = 100$ V à **60 Hz**
- une **harmonique** $E_H = 20$ V à **300 Hz**

Comme $300 = 5 \times 60$, c'est donc **l'harmonique de rang 5**.

Le vecteur de l'harmonique est incliné de **60°** au départ $\rightarrow$ cette **phase initiale** va influencer la forme finale du signal.

- ✓ Chaque vecteur tourne :
- le fondamental à la vitesse normale,
- l'harmonique **5 fois plus vite**.

À chaque instant, on additionne leurs projections $\rightarrow$ cela donne la tension instantanée.

(b) Forme d'onde obtenue

On voit trois courbes :

- la sinusoïde principale $\rightarrow E_F$
- la petite oscillation rapide $\rightarrow E_H$
- la courbe résultante $\rightarrow$ **somme des deux = onde déformée**

☞ l'harmonique vient **gonfler, écraser ou déplacer** certaines parties de la sinusoïde.

Résultat : la tension n'est plus un beau sinus.

Idée essentielle à retenir

Une onde distordue =

$\rightarrow$ somme d'un sinus fondamental

+ plusieurs petits sinus de fréquences multiples

+ chacun avec sa propre phase.

Même une harmonique relativement petite (20 V contre 100 V) modifie fortement la forme.

Pourquoi la phase est importante ?

Si l'angle n'était pas 60° :

- la bosse ne serait pas au même endroit,
- la déformation changerait complètement.

Donc : **amplitude** + **fréquence** + **phase** déterminent la forme finale.

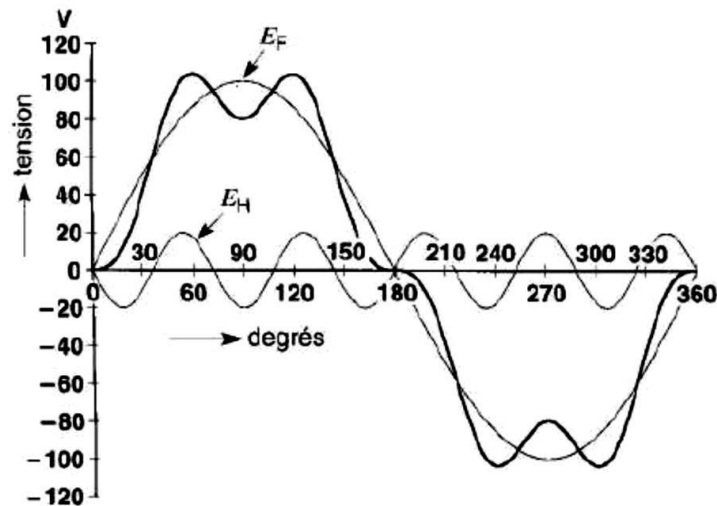


Figure II.4 : Forme d'onde de la tension résultante lorsque l'angle de phase initial du 5^e harmonique est égal à 180° .

Une tension (ou un courant) non sinusoïdale peut s'écrire comme :

- une composante **fondamentale** (fréquence du réseau),
- des **harmoniques** (multiples de cette fréquence).

2) Valeur efficace totale

La valeur efficace totale est la **somme quadratique** des composantes.

$$E = \sqrt{E_F^2 + E_H^2}$$

avec :

- E : valeur efficace du signal déformé
- E_F : valeur efficace de la fondamentale
- E_H : valeur efficace **globale** de toutes les harmoniques réunies.

3) Valeur efficace de l'ensemble des harmoniques

Elle est obtenue aussi par une somme quadratique :

$$E_H = \sqrt{E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 + \dots + E_n^2}$$

où $E_2, E_3, \dots, E_n$ sont les valeurs efficaces de chaque rang.

4) Formule complète (en remplaçant E_H)

En combinant les deux relations :

$$E = \sqrt{E_F^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}$$

5) Même chose pour le courant

Exactement la même écriture :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

Valeurs efficaces d'une onde déformée

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 de entre la valeur crête (I_{MAX}) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace de ce même signal (figure 2.18) :

$$\frac{I_{MAX}}{I_{efficace}} = \sqrt{2} = 1,414$$

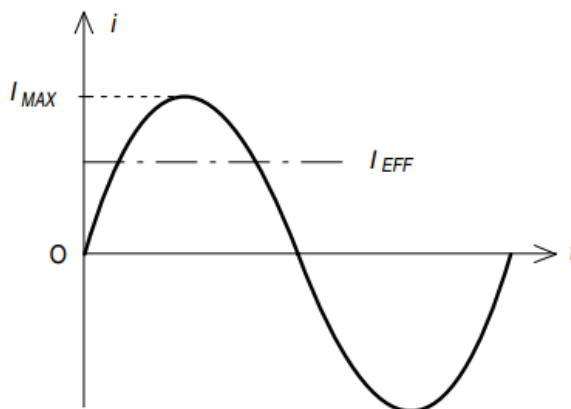


Figure 2.18 – Signal sinusoïdal.

Lorsque le courant est déformé, le facteur de crête atteint des valeurs supérieures à $\sqrt{2}$ et traduit la non-linéarité du circuit en question (figure 2.19) :

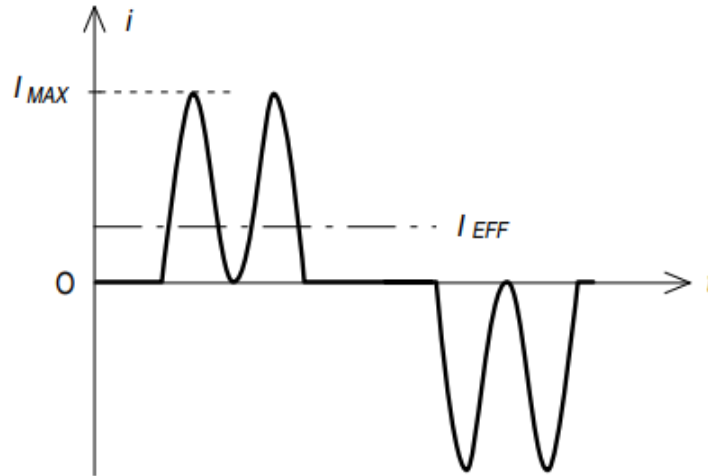


Figure 2.19 – Signal déformé.

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 :

$$F_c = \frac{\text{valeur}_{\text{crête}}}{\text{valeur}_{\text{efficace}}} \quad F_c = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{rms}}}$$

Facteurs de crête courants :

- charge linéaire : $\sqrt{2}$ soit 1,414 → Absence d'harmonique
- matériel informatique : 2 à 3 → Présence d'harmoniques
- variateur de vitesse : environ 2 → Présence d'harmoniques

Et rappeler que pour un sinus : $F_c = \sqrt{2} \approx 1,414$

Spectre d'harmonique (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme

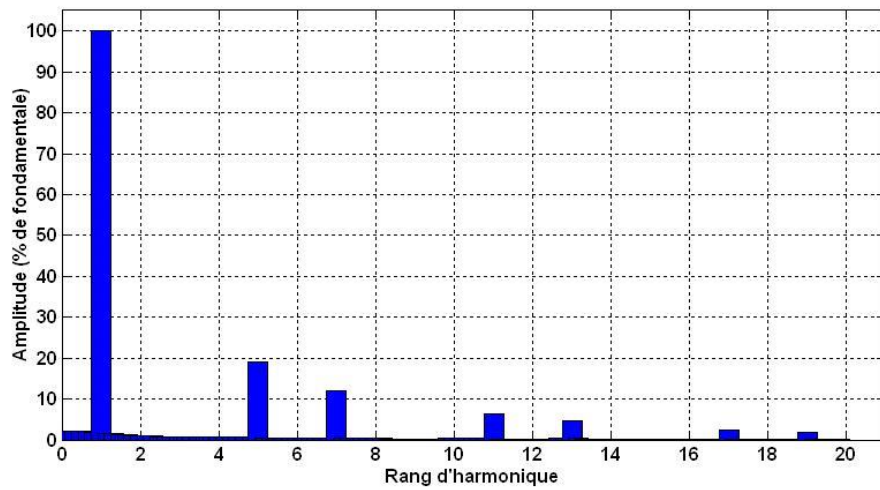


figure II.10 : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante

. Phénomènes de la QEE

.1 Déséquilibre (asymétrie)

Un système triphasé est dit **symétrique** lorsque :

- les amplitudes des trois tensions (ou courants) sont égales ;
- les impédances des phases ont le même module ;
- le déphasage entre deux vecteurs successifs est égal à 120° ($2\pi/3$).

Toute déviation par rapport à ces conditions caractérise un **déséquilibre**.
Il constitue un indicateur important de la qualité de l'énergie électrique.

.2 Distorsion harmonique

Les formes d'onde de tension ou de courant peuvent s'écarter d'une sinusoïde idéale sous l'effet de charges non linéaires.

La présence de composantes fréquentielles multiples de la fondamentale est appelée **distorsion harmonique**.

Cette pollution peut engendrer :

- pertes supplémentaires,
- échauffements,
- dysfonctionnements des équipements.

.3 Fluctuations de tension

Les fluctuations correspondent à des variations de la valeur efficace autour de la tension nominale, généralement dans l'intervalle $\pm 10 \%$ (correspond aux limites usuelles de fourniture en BT (EN 50160))

On distingue :

- les variations graduelles ;
- les variations aléatoires ou cycliques.

.4 Papillotement (Flicker)

Le flicker correspond aux fluctuations de tension qui provoquent une variation visible de l'éclairage pour l'œil humain.

Pour le quantifier, on utilise deux indicateurs normalisés par l'International Electrotechnical Commission (IEC).

.5 Creux de tension

Un creux de tension est une diminution de l'amplitude entre **10 % et 90 %** de la valeur nominale, pour une durée comprise entre **10 ms et 1 min**.

Remarque :

Si la tension descend en dessous de **10 %**, on parle plutôt de **coupure brève**.

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves.

.6 Transitoires

Les surtensions sont des élévations de la tension au-dessus de **1,1 pu**, pouvant atteindre ou dépasser **1,8 pu**.

Elles sont statistiquement moins fréquentes que les creux de tension.