

## La pollution harmonique

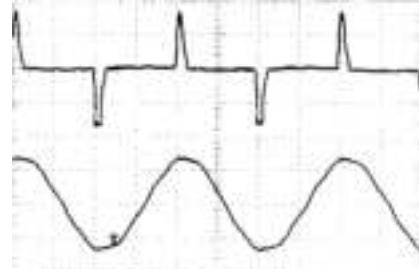
### 1. Charges linéaires et non linéaires

Une charge est dite "linéaire" si le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur ne génère pas d'harmoniques.

Les charges non linéaires appellent du réseau un courant non purement sinusoïdal. Seul le fondamental à 50 Hz de ce courant déformé contribue, avec la tension, à l'apport de la puissance active consommée par l'équipement.

Les charges non linéaires génèrent des harmoniques

Les harmoniques de courant n'apportent pas cette puissance (car leurs fréquences sont différentes de 50 Hz) **mais** contribuent malheureusement à augmenter inutilement l'intensité efficace du courant véhiculée par les câbles d'alimentation



### 2. Décomposition en séries de Fourier d'un signal périodique

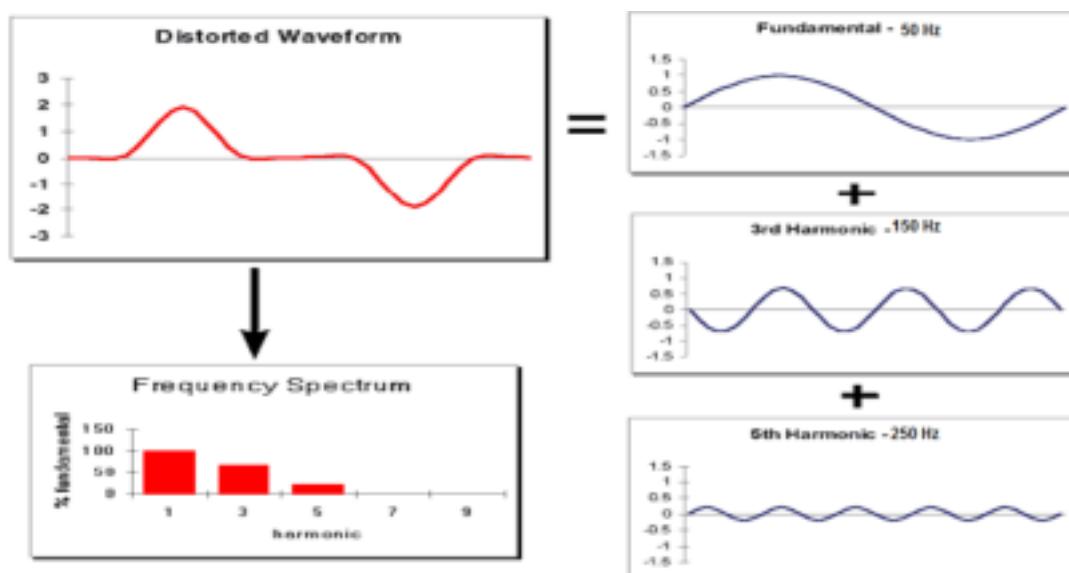
Un signal périodique de période  $T$  ou de fréquence  $f$  peut se mettre sous la forme d'une somme de :

- un terme constant qui correspond à la composante continue (c'est-à-dire la valeur moyenne dans le temps)
- un terme sinusoïdal de fréquence  $f$  (c'est le fondamental ou harmonique de rang 1)
- un terme sinusoïdal de fréquence  $2f$  (harmonique de rang 2)
- un terme sinusoïdal de fréquence  $3f$  (harmonique de rang 3)
- etc ...

$$i(t) = \langle i \rangle + \hat{I}_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n \geq 2} \hat{I}_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$

$$v(t) = \langle v \rangle + \hat{V}_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{n \geq 2} \hat{V}_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$$

Le fondamental a la même période  $T$  que le signal décomposé ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ )



### 3. Notions de tensions et courants harmoniques

#### 3.1. Valeur efficace (True RMS)

Par définition, la valeur efficace d'un courant périodique  $i(t)$  est :  $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{(T)} i^2(t) dt} = \sqrt{\langle i^2(t) \rangle}$

On montre que

$$I = \sqrt{\langle i \rangle^2 + I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2}$$

De même

$$V = \sqrt{\langle v \rangle^2 + V_1^2 + \sum_{n \geq 2} V_n^2}$$

#### 3.2. Valeur efficace des harmoniques

Il s'agit de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques

On montre que

$$I_H = \sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}$$

et

$$V_H = \sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}$$

#### 3.3. Total Harmonic Distortion, THD (Taux de distorsion harmonique)

Les courants harmoniques circulant à travers les impédances du système électrique provoquent des baisses de tension harmonique, observées sous forme de distorsion harmonique en tension.

L'une des solutions destinées à déceler la présence d'harmoniques est le calcul du THD, taux de distorsion harmonique.

Définition du taux de distorsion harmonique:  $THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}}$

Ce qui nous donne

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1}$$

et

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1}$$

Remarque 1: Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

Remarque 2: Il existe une autre définition du taux de distorsion se rapportant à la valeur efficace du signal dans sa globalité

$$THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace du signal}}$$

, soit pour la tension et le courant :  $THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{\sqrt{\sum_{n \geq 1} V_n^2}}$        $THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n \geq 1} I_n^2}}$

L'important est de rester cohérent dans ses calculs...

## 4. Puissances en présence d'harmoniques

### 4.1. Puissances actives, réactives et apparentes.

- La puissance active  $P$  consommée par la charge est la moyenne sur une période de la puissance instantanée :

$$P = \frac{1}{T} \int_{(T)} v(t) i(t) dt$$

On montre que :

$$\begin{aligned} P &= \langle v \rangle \langle i \rangle \\ &+ V_1 I_1 \cos(\varphi_1) \\ &+ V_2 I_2 \cos(\varphi_2) \\ &+ V_3 I_3 \cos(\varphi_3) \\ &+ \dots \end{aligned}$$

contribution des composantes continues

contribution des fondamentales

contribution des harmoniques de rang 2

contribution des harmoniques de rang 3

+ ....

- La puissance réactive  $Q$  consommée par la charge vaut

$$Q = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) + \sum_{n \geq 2} \frac{V_n I_n}{n} \sin(\varphi_n)$$

- La puissance apparente de la charge est par définition :  $S = V I$

### 4.2. Puissance déformante

En présence d'harmoniques,  $S^2 \neq P^2 + Q^2$

On introduit la notion de puissance déformante  $D$  telle que

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

### 4.3. Facteur de puissance

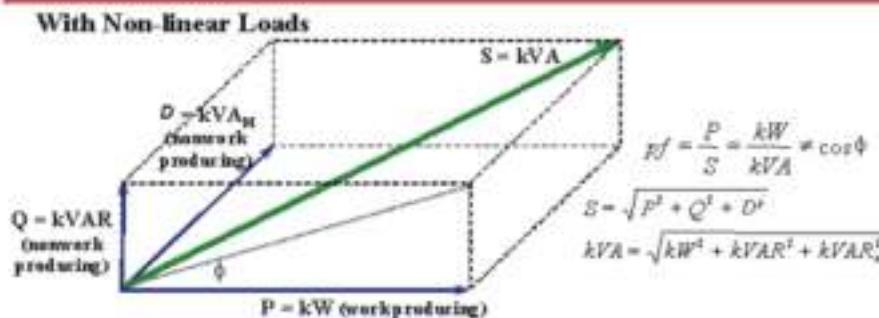
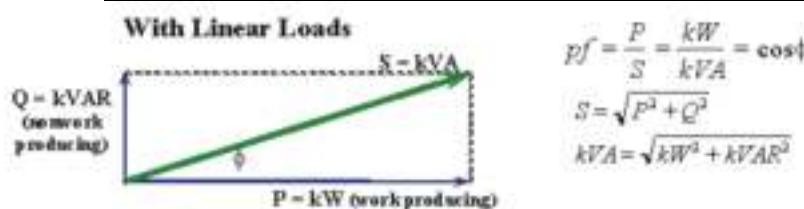
Par définition, le facteur de puissance vaut :

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

Ce qu'il faut retenir :

Dans un milieu purement sinusoïdal :  $PF = \cos(\varphi)$

Dans un milieu harmonique :  $PF < \cos(\varphi)$



## 5. Cas d'un dipôle non linéaire alimenté par une tension alternative sinusoïdale

### 5.1. Expression de la tension et du courant

On suppose le courant alternatif :  $\langle i \rangle = 0$

On a donc  $I = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2} = I_1 \sqrt{1 + \sum_{n \geq 2} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2} = I_1 \sqrt{1 + THD_I^2}$

Une tension alternative purement sinusoïdale se résume à son fondamental (rang 1).

Donc  $V = V_1 \quad (V_n = 0 \quad \text{pour} \quad n \geq 2)$

### 5.2. Expression des puissances

Les expressions de la tension et du courant permettent de simplifier celles des puissances

- Puissance active  $P = V I_1 \cos(\varphi_1)$
- Puissance réactive  $Q = V I_1 \sin(\varphi_1)$
- Puissance apparente  $S = V I = V I_1 \sqrt{1 + THD_I^2}$
- Puissance déformante  $D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2) = V^2 I_1^2 THD_I^2$   
 $D = V I_1 THD_I = V I_H$

#### Remarques:

- Les harmoniques du courant (rang  $\geq 2$ ) ne jouent aucun rôle dans la puissance active
- Les harmoniques du courant (rang  $\geq 2$ ) ne jouent aucun rôle dans la puissance réactive
- La puissance déformante est directement liée à la présence des harmoniques de courant (rang  $\geq 2$ ).

### 5.3. Expression du facteur de puissance

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V I_1 \cos(\varphi_1)}{\sqrt{V^2 I_1^2 \cos^2(\varphi_1) + V^2 I_1^2 \sin^2(\varphi_1) + V^2 I_1^2 THD_I^2}} = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + THD_I^2}}$$

#### Remarques:

- Quand le taux de distorsion harmonique du courant ( $THDi$ ) augmente, le facteur de puissance diminue.
- Le terme  $\cos \varphi_1$  est aussi appelé facteur de déplacement ( $DPF$  : Displacement Power Factor).  
 On a :  $PF < DPF$

THDi	Facteur de puissance PF (pour DPF = 1)
0 % (charge linéaire)	1
10 %	0,995
20 %	0,981
50 %	0,894
100 %	0,707
150 %	0,555
200 %	0,447

## 6. Problèmes créés par les harmoniques

### 6.1. Les effets

#### Effets immédiats : pertes par effet Joule

- Dégradation du facteur de puissance
- Réduction de la puissance des moteurs (couple négatif)
- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs
- Augmentation du bruit dans les moteurs
- Erreur d'enregistrement dans les compteurs
- Surdimensionnement des câbles
- Réduction de la capacité du réseau
- Mauvais fonctionnement des contacteurs
- Perturbation des systèmes électroniques

#### Effets à moyen et long terme

- Réduction de la durée de vie des moteurs
- Détérioration des batteries de condensateurs
- Réduction de la durée de vie des transformateurs
- Vieillissement accéléré des isolants et des diélectriques
- Pertes fer (Iron losses), pertes créées par le champ magnétique + pertes dues aux courants de Foucault, entraînant un déclassement des transformateurs et des moteurs

## 6.2. Les principaux remèdes envisagés

### Solutions générales

- Abaisser les impédances harmoniques
- Agir sur la structure de l'installation

## 7. Aspects normatifs

### 7.1. Principales normes

Plusieurs normes existent pour cadrer ce sujet et parmi les plus importantes :

- **CEI 61000-1-1** : Pour définir les harmoniques.
- **CEI 61000-2-1 à 5** : Pour les réseaux basse fréquence et transmission.
- **CEI 61000-3-2 à 6** : Pour les limites d'émission de courant harmonique.
- **CEI 61000-4-1 à 15** : Pour les essais et les immunisations des matériels.
- **EN 50160** : Pour les caractéristiques de la fourniture de la tension par les réseaux publics.
- **Le guide UTE C15-105** : Pour le dimensionnement des câbles en présence d'harmoniques.

### 7.2. Extrait de la norme CEI 61000-2-2 :

Cette norme définit les niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence sur les réseaux publics d'alimentation basse tension

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Nou multiples de 3		Multiples de 3		Rang n	% du fondamental
Rang n	% du fondamental	Rang n	% du fondamental	Rang n	% du fondamental
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 + 0,5 × 25/n	/	/	/	/

Niveaux tolérables pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension 50 Hz (selon IEC61000-2-2)

### 7.3. Prise en compte des courants harmoniques par la norme NF C 15-105 (extraits)

Le dimensionnement des câbles en fonction du pourcentage d'harmoniques (TH%) est réalisé suivant la norme NF C 15-100 éditée par l'UTE C 15-105 (433.3 & 433.4) en tenant compte du calcul de la section du neutre, suivant le taux d'harmoniques.

Taux d'harmoniques	Effets prévisibles
THDU < 5 % et THDI < 10 %	Néant
5 % < THDU < 8 % ou 10 % < THDI < 50 %	Pollution significative, effets nuisibles possibles
THDU > 8 % et THDI > 50 %	Pollution forte, dysfonctionnement probables
Taux d'harmoniques de rang 3 en courant > 15 %	Courant non négligeable dans le neutre

Analyse prévisionnelle du taux de distorsion harmonique en courant

	$0 < TH \leq 15 \%$	$15 \% < TH \leq 33 \%^{(1)}$	$TH > 33 \%^{(2)}$
Circuits monophasés	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$
Circuits triphasés+neutre Câbles multipolaires $S_{\text{phase}} \leq 16 \text{ mm}^2$ Cu ou 25 mm <sup>2</sup> Alu	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$ Facteur 0,84	$S_{\text{phase}} = S_{\text{neutre}}$ $S_{\text{neutre}}$ déterminante $I_{\text{Bneutre}} = 1,45 \cdot I_{\text{Bphase}}$ Facteur 0,84
Circuits triphasés+neutre Câbles multipolaires $S_{\text{phase}} > 16 \text{ mm}^2$ Cu ou 25 mm <sup>2</sup> Alu	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}/2$ admis Neutre protégé	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$ Facteur 0,84	$S_{\text{phase}} = S_{\text{neutre}}$ $S_{\text{neutre}}$ déterminante $I_{\text{Bneutre}} = 1,45 \cdot I_{\text{Bphase}}$ Facteur 0,84
Circuits triphasés+neutre Câbles unipolaires $S_{\text{phase}} > 16 \text{ mm}^2$ Cu ou 25 mm <sup>2</sup> Alu	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}/2$ admis Neutre protégé	$S_{\text{neutre}} = S_{\text{phase}}$ Facteur 0,84	$S_{\text{neutre}} > S_{\text{phase}}$ $I_{\text{Bneutre}} = 1,45 \cdot I_{\text{Bphase}}$ Facteur 0,84

(1) circuits d'éclairage alimentant des lampes à décharge dont les tubes fluorescents dans des bureaux, ateliers, grandes surfaces, etc.  
 (2) circuits dédiés à la bureautique, l'informatique, appareils électroniques dans des immeubles de bureaux, centres de calcul, banques, salles de marché, magasins spécialisés, etc.

Choix de la section du neutre selon NF C 15-105

Très largement inspiré de la référence ci-dessous :

Harmoniques-cours : Centre de formation du Lycée St Gatien  
<http://www.google.fr/url?url=http://lewebpedagogique.com/btselec/files/2010/09/Harmoniques-cours.docx>