

## Table des matières

<b>1 Les harmoniques</b>	<b>1</b>
1.1 problèmes liés à la circulation de courants non sinusoïdaux	1
1.1.1 Courant sans harmoniques	1
1.2 Étude harmonique du courant produit par un gradateur	2
1.2.1 Rappels de fonctionnement	2
1.2.2 Mesurage des harmoniques	3
1.2.3 Valeur <b>efficace</b> du courant ( <b>rms</b> )	3
1.2.4 Conclusion de l'essai	4
1.3 Exemple de surcharge du conducteur neutre	4
1.3.1 Considérons le schéma suivant	4
1.3.2 Réglage des gradateur	4
1.3.3 Valeur prise par le courant dans le conducteur Neutre	5
1.3.4 Puissances déformantes	6
1.3.5 Analyse des mesurages effectués sur les tableaux	6
1.3.6 Triangle des puissances	7
1.3.7 Mesurage des puissances	7
1.3.8 Vérifions la cohérence des grandeurs mesurées	8
1.3.9 Facteur de puissance	8
1.3.10 Mesurage du THDi	9
1.3.11 Charges polluantes	10
1.3.12 Effets indésirables des harmoniques sur les installations	10
1.3.13 Remèdes	10
1.3.14 Normes	10

## 1 Les harmoniques

### 1.1 problèmes liés à la circulation de courants non sinusoïdaux

Un courant non sinusoïdal est comparable dans sa forme au son joué par un instrument de musique: il n'est pas une entité unique mais il est formé d'une multitudes de **composantes sinusoïdales**, de fréquence multiple du signal fondamental (50 Hz pour le réseau français), et d'amplitudes qui décroissent avec leur fréquence. Ces composantes sont appelées **harmoniques**.

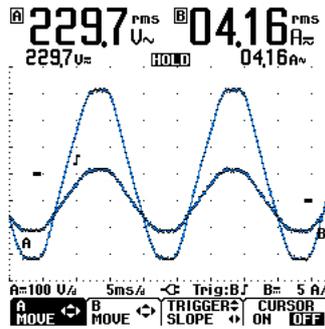
Les harmoniques de fréquences proches du fondamental sont à surveiller, car ce sont elles qui sont susceptibles de perturber les installations car leur amplitude peut, dans certains cas, prendre des valeurs élevées.

Il est aujourd'hui possible de mesurer le taux d'harmoniques dans une installation.

#### 1.1.1 Courant sans harmoniques

Les **récepteurs résistifs** ne génèrent pas d'harmoniques: éclairage incandescent, four résistif, convecteurs, etc.

Ces récepteurs présentent une tension et un courant comparables à ceux de la figure 1.

Figure 1:  $u(t)$  et  $i(t)$ 

Le spectre des harmoniques générés par ce courant montre que, seul le fondamental existe: les chiffres visibles en bas du graphique indiquent le "rang" des harmoniques, c'est à dire leur fréquence, qui est un multiple entier de la fréquence du **fondamental**. Les harmoniques de fréquence supérieure à  $50f$ , par leur faible amplitude, ont peu d'impact sur l'installation.

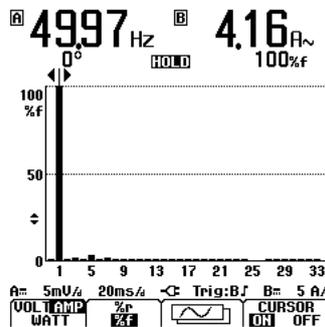


Figure 2: Spectre harmonique d'un circuit résistif

## 1.2 Étude harmonique du courant produit par un gradateur

### 1.2.1 Rappels de fonctionnement

La **figure 1** présente la tension  $u(t)$  et le courant  $i(t)$  délivrés par un gradateur qui alimente deux projecteurs d'une puissance unitaire de **500W**. Les trois formes d'onde ont été mesurées pour trois valeurs de l'angle d'amorçage des thyristors (ou triac). Les grandeurs  $u(t)$  et  $i(t)$  diminuent lorsque l'angle de conduction  $\alpha$  augmente. Les gradateurs sont communément utilisés comme:

- variateur d'intensité lumineuse (incandescence)
- variateur de vitesse pour moteur monophasé
- démarreur pour moteur asynchrone triphasé

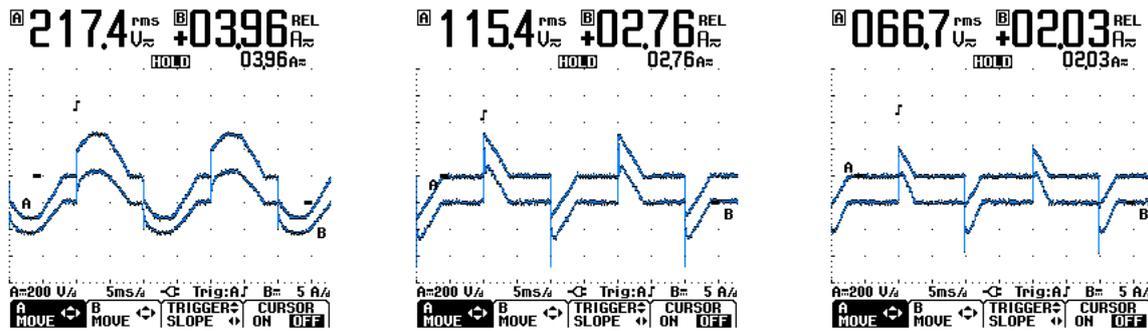


Figure 3: Mesurage Scopmeter Fluke

### 1.2.2 Mesurage des harmoniques

Considérons l'oscillogramme figure 4 tiré de la figure 1:

Le courant présente un spectre qui présente de nombreuses harmoniques: on remarque qu'il n'y a pas d'harmoniques de rang pair. La valeur des trois premières harmoniques est:

- Fondamental:  $I_f = 2,1A$
- rang 3 (150 Hz):  $I_{3f} = 1,5A$
- rang 5 (250 Hz):  $I_{5f} = 0,7A$
- rang 7 (350 Hz):  $I_{7f} = 0,4A$

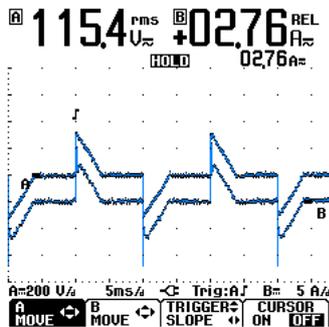
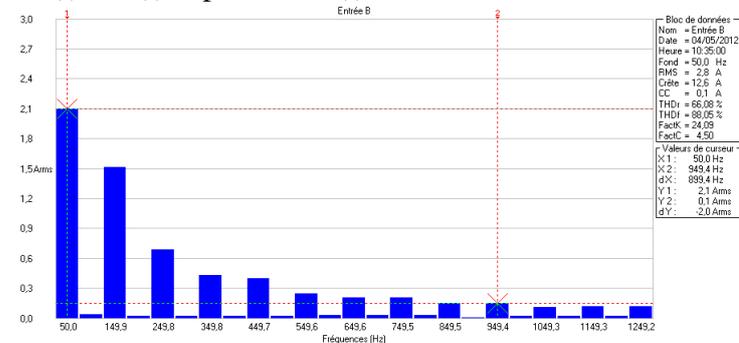


Figure 4:  $i(t)$  et  $u(t)$ - Spectre de  $i(t)$



### 1.2.3 Valeur efficace du courant (rms)

Lors de la mesure, l'appareil choisit ne doit pas se borner à mesurer l'amplitude du fondamental, mais il doit prendre en compte l'ensemble des courants qui apparaissent dans le spectre harmonique, c'est à dire:

$$I_{rms} = \sqrt{I_f^2 + I_{3f}^2 + I_{5f}^2 + \dots + I_{nf}^2} \quad \text{avec } n: \text{rang de l'harmonique}$$

Lorsque les grandeurs mesurées sont **sinusoïdales** les appareils **r.m.s** remplissent correctement ce rôle. Dès lors que l'onde mesurée n'est plus sinusoïdale, il faut utiliser des appareils capable de calculer en temps réel les variations de la grandeur mesurée: c'est le rôle des appareils **T.R.M.S** : (True r.m.s = efficace vraie).

La relation appliquée à notre exemple donne le résultat suivant:

$I_{rms} = \sqrt{2,1^2 + 1,5^2 + 0,7^2 + 0,4^2} = 2,7A$  c'est à dire la valeur donnée par l'appareil.  
on constate que les premières harmoniques donnent une bonne approximation de la valeur efficace du courant.

### 1.2.4 Conclusion de l'essai

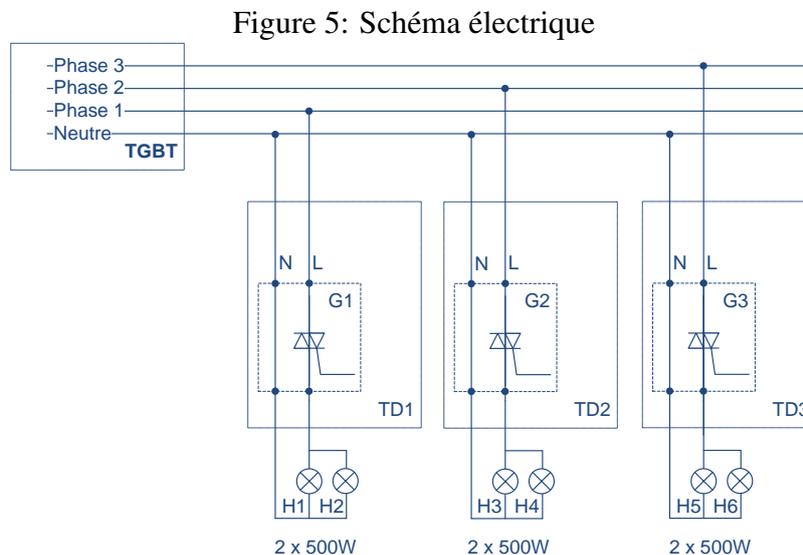
Les courants harmoniques augmentent de manière significative la valeur du courant efficace dans le circuit.

## 1.3 Exemple de surcharge du conducteur neutre

### 1.3.1 Considérons le schéma suivant

- **TGBT**: Tableau général basse tension.
- **TD1,TD2,TD3**: Tableau divisionnaires.
- **G1,G2,G3**:Gradateurs modulaires 1000W (télévariateurs Legrand).
- **H1..H6**:Projecteurs halogènes de puissance unitaire  $P = 500W$

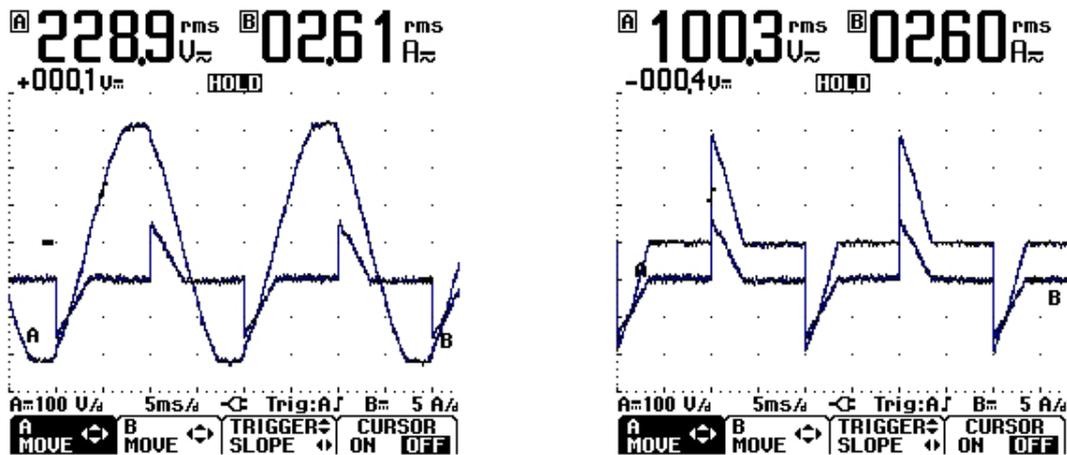
Pour plus de lisibilité, les appareils de protection ne sont pas représentés.



### 1.3.2 Réglage des gradateur

**Les trois gradateurs** sont réglés comme sur les figures 6a et 6b: le réglage est effectué par appui prolongé sur les bouton-poussoirs modulaires non représentés sur le schéma.

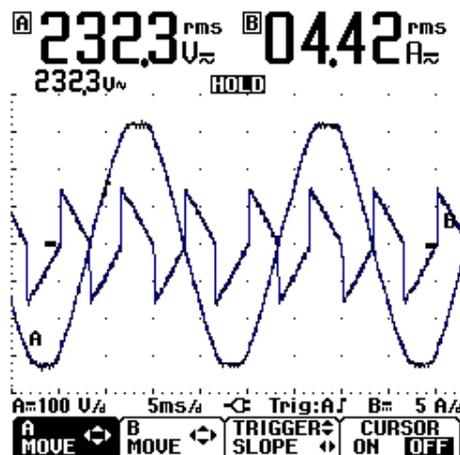
Figure 6: a et b



- **Figure 6a:**  $u_1(t)$  réseau en amont du gradateur et  $i(t)$  lampes.
- **Figure 6b:**  $u_2(t)$  aux bornes des lampes et  $i(t)$  lampes.

### 1.3.3 Valeur prise par le courant dans le conducteur Neutre

Le courant dans le **conducteur neutre** ainsi qu'une tension simple du réseau (comme élément de comparaison) sont visibles sur l'oscillogramme ci-dessous.

Figure 7:  $I_N$ 

Certains points peuvent être soulignés:

- Un courant circule dans le neutre alors que nous sommes en présence d'un circuit triphasé équilibré qui devrait vérifier la relation:  $\vec{I}_N = \vec{0} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$
- Le courant  $I_N$  est bien plus élevé que dans les conducteur phases:  $I_N = 4,4A$  et  $I = 2,6A$
- Le courant  $I_N$  possède une fréquence de **150 Hz** qui mettent en évidence l'importance de l'effet de **l'harmonique de rang 3** lorsque celle-ci possède une amplitude élevée.

### 1.3.4 Puissances déformantes

Un autre effet de la présence d'harmoniques dans une installation est de modifier en profondeur le triangle des puissances.

### 1.3.5 Analyse des mesurages effectués sur les tableaux

Mesurages réalisés à l'analyseur Fluke 434

Figure 8: U - I

Volts/Amp/Hertz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	234.9	229.6	231.4	4.1
Vpk	324.4	315.0	318.1	9.3
CF	1.38	1.37	1.37	2.25
Hz	49.99			
Arms	2.6	2.6	2.6	4.2
Apk	7.5	7.3	7.5	7.7
CF	2.88	2.78	2.92	1.82

16/03/12 19:50:56 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

Figure 9: Bilan puissance **fund** et **full**

Puissance et énergie				
	L1	L2	L3	Total
W	276.1	302.7	267.6	846.4
VA	608.8	602.8	598.7	1810
VAR	542.5	521.3	535.5	1599
PF	0.45	0.50	0.45	0.47
Cosφ	0.65	0.70	0.59	
Arms	2.6	2.6	2.6	

16/03/12 19:50:08 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

Puissance et énergie				
	L1	L2	L3	Total
W	276.0	299.5	270.1	845.5
VA	428.2	427.6	454.2	1310
VAR	327.4	305.2	365.2	997.8
PF	0.45	0.50	0.45	0.47
Cosφ	0.64	0.70	0.59	
Arms	2.6	2.6	2.6	

16/03/12 19:51:42 230V 50Hz 3Ø WVE EN50160

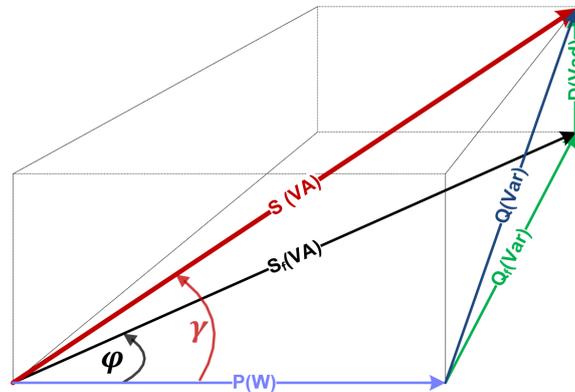
Quelques remarques sur les valeurs mesurées:

- Le facteur de crête (CF) est très supérieur à  $\sqrt{2}$  car  $\frac{pk}{rms} = \frac{7,5}{2,6} = 2,88$  pour la phase N°1: l'usage **d'appareils T.R.M.S** (efficace vrai) est indispensable pour avoir un mesurage conforme à la réalité.
- Le  $\cos \varphi \neq 1$  alors que le réseau n'alimente que des récepteurs résistifs.
- Le  $\cos \varphi$  appelé aussi facteur de déplacement (DPF) indique le déphasage entre fondamentaux, dans le cas présent:  $\cos \varphi = 0,65$ . Rappel:  $\cos \varphi = \frac{P}{S_f} = 0,65$
- Le facteur de puissance (PF) prend en compte les harmoniques générées par le circuit:  $PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = 0,47$

5. L'analyseur mesure une puissance réactive consommée par les trois phases bien que les circuits soient constitués de récepteurs **résistifs**: projecteurs halogènes.

### 1.3.6 Triangle des puissances

Figure 10: triangle des puissances complet



Le **triangle des puissances** qui est représenté dans le plan lorsque les calculs s'effectuent sur le fondamental, passe dans l'espace lorsqu'il prend en compte les harmoniques. Le côté **D** qui modélise la **puissance déformante**, présente un angle de  $90^\circ$  avec  $Q_f$ . La puissance déformante **D** fait son apparition dans le théorème de **Pythagore** adapté au triangle dans l'espace :  $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

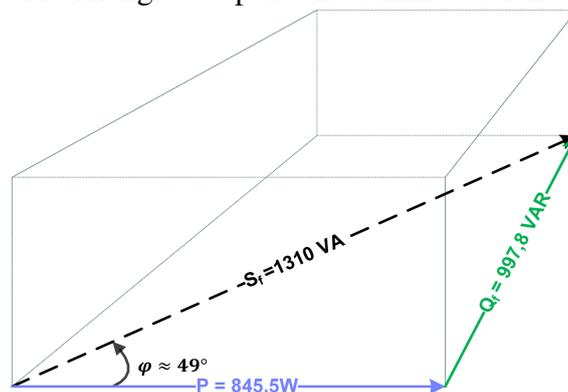
### 1.3.7 Mesurage des puissances

Les mesurages ont été effectués à l'aide de l'analyseur Fluke 434 qui possède deux configurations possibles pour :

- Mesurer uniquement le **fondamental** des grandeurs: c'est le mode **fund** qui doit être choisi.
- Mesurer l'**intégralité du spectre**: c'est le mode **full**<sup>1</sup> qui doit être choisi.

Les grandeurs contenues dans le tableau peuvent maintenant être affectées aux différents côtés du triangle des puissances. On voit immédiatement l'importance du réglage **fund** ou **full** sur le décodage des mesurages.

Figure 11: Triangle des puissances limité au fondamental



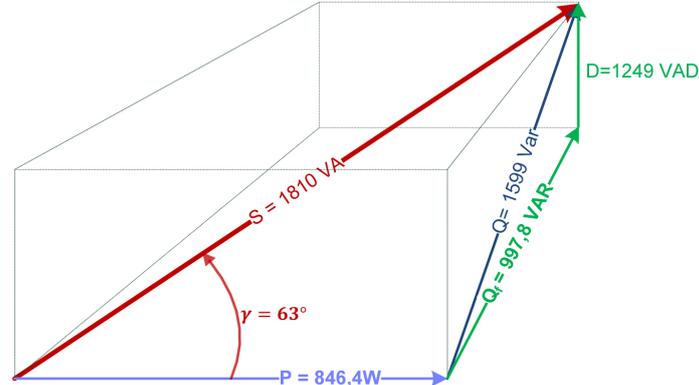
<sup>1</sup>le repère **full** ou **fund** apparaît en haut du tableau de mesurage des puissances

### 1.3.8 Vérifions la cohérence des grandeurs mesurées

Si on désire connaître les grandeurs limitées au fondamental, on peut effectuer les calculs suivants:

- $S_f = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{845,5^2 + 997,8^2} = 1308VA$

Figure 12: triangle avec prise en compte des harmoniques

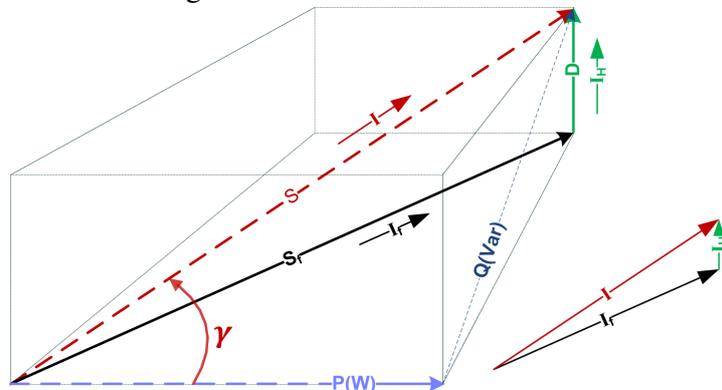


- $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{846,4^2 + 1599^2} = 1809VA$  : le mesurage montre que la puissance réactive mesurée **Q** est la somme vectorielle de la puissance déformante (**D**) et de la puissance réactive  $Q_f$  limitée au fondamental.
- $FP = \frac{P}{S} = \frac{846,4}{1810} = 0,467$ .
- La valeur de la puissance déformante vaut:  $D = \sqrt{S^2 - S_f^2} = \sqrt{1810^2 - 1310^2} = 1249VA$

### 1.3.9 Facteur de puissance

triangle des courants et des puissances

Figure 13: Puissance déformante



Le facteur de puissance peut s'exprimer comme ceci:  $FP = \frac{P}{S} = \frac{VI_f \cos \varphi}{VI} = \frac{I_f \cos \varphi}{I}$

avec  $I = \sqrt{I_f^2 + I_H^2}$  car les courants sont aussi liés par le théorème de Pythagore (c.f figure 13).

Par conséquent, en divisant numérateur et dénominateur par  $I_f^2$  l'expression devient:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{I_H^2}{I_f^2}}} \cos \varphi \quad (1)$$

La quantité  $\frac{I_H}{I_f}$  est appelée taux de distorsion harmonique **THD**, il s'exprime en % et a pour expression:

- $THD_i\% = \frac{100I_H}{I_f}$

En intégrant le THD dans (1), le FP s'exprime:  $FP = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_i}{100}\right)^2}} \cos \varphi$

Cette relation montre qu'un THD élevé impacte fortement le FP de l'installation avec une augmentation significative de la puissance apparente. Un  $THD \approx 100\%$  génère:

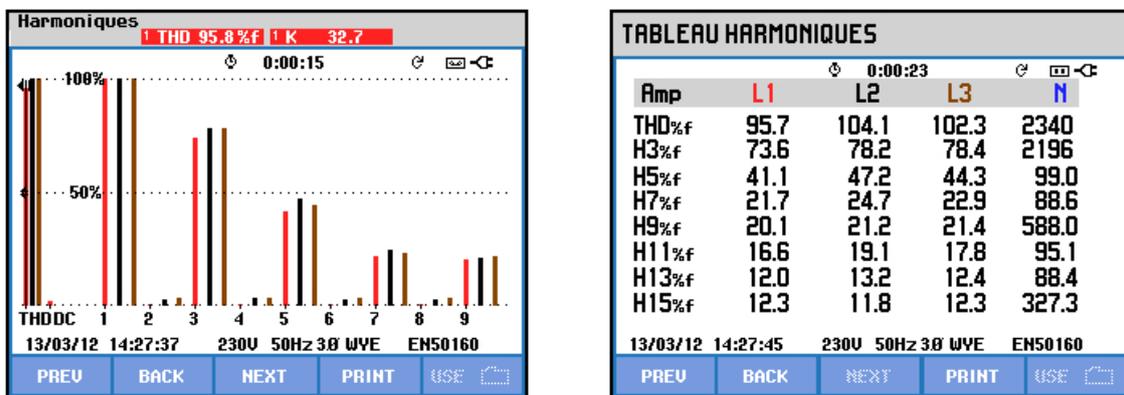
- $FP = \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \varphi$

- soit pour notre installation qui fonctionne sous  $\cos \varphi = 0,65$  :  $FP = \frac{0,65}{\sqrt{2}} = 0,46$  qui est la valeur donnée par notre analyseur de réseau.

### 1.3.10 Mesurage du THDi

Les deux tableaux ci-dessous contiennent le mesurage du THD total ainsi que le détail par rang d'harmonique. La figure de gauche donne une vue globale des trois phases qui permet de dresser une première analyse: on voit immédiatement la présence et l'importance des harmoniques de rang impairs. Le deuxième tableau permet de quantifier le THD pour chacun des rangs.

Figure 14: THDi



note:

Le THD s'applique aussi à la tension:  $THD_v\% = \frac{100V_H}{V_f}$

### 1.3.11 Charges polluantes

#### 1. Dans le tertiaire

- Lampe basse consommation.
- Tubes fluorescent
- Lampes à décharge gazeuse à basse et haute pression.
- Ballasts électroniques pour éclairage.
- Ordinateurs
- Imprimantes et photocopieurs
- Onduleurs

#### 2. En industrie

- Variateurs de vitesse
- Convertisseurs:redresseurs, hacheurs..etc.
- Soudeuses
- Four à arc utilisé dans la métallurgie

### 1.3.12 Effets indésirables des harmoniques sur les installations

- Dégradation du FP.
- Surcharge des conducteurs liés à l'élévation des courants qui conduisent à leur surdimensionnement.
- Perturbation des systèmes informatiques.
- Vieillessement des conducteurs, transformateurs, moteurs..etc.

### 1.3.13 Remèdes

- Pose de filtres passifs accordés sur le rang de l'harmonique
- Pose de filtres actifs (onéreux): génère une onde en opposition de phase avec l'harmonique à éliminer.

D'autres solutions sont envisageables, comme la pose d'un transformateur dont le primaire couplé en triangle évite la remontée des harmoniques par le conducteur neutre.

### 1.3.14 Normes

Taux d'harmoniques	Effets prévisibles
$THDu < 5\%$ et $THDi < 10\%$	Néant
$5\% < THDu < 8\%$ et $10\% < THDi < 50\%$	Pollution significative, effets nuisibles possibles
$THDu > 8\%$ ou $THDi > 10\%$	Pollution forte, dysfonctionnement probables
Taux d'harmoniques en courant $> 15\%$	Courant non négligeable dans le conducteur neutre

### Détermination de la section d'un conducteur neutre chargé <sup>2</sup>

Les courants harmoniques de rang 3 et multiples de 3 circulant dans les conducteurs de phases d'un circuit triphasé s'additionnent dans le conducteur neutre et le surchargent. Pour les circuits concernés par la présence de ces harmoniques, pour les sections de phase  $> 16 \text{ mm}^2$  en cuivre ou  $25 \text{ mm}^2$  en aluminium, il faut déterminer la section des conducteurs de la manière suivante, en fonction du taux d'harmoniques en courant de rang 3 et multiples de 3 dans les conducteurs de phases :

- $\text{taux (ih3)} < 15\%$  :

Le conducteur neutre n'est pas considéré comme chargé. La section du conducteur neutre  $S_n$  égale à celle nécessaire pour les conducteurs de phases  $S_{ph}$ . Aucun coefficient lié aux harmoniques n'est appliqué :  $S_n = S_{ph}$ .

- $15\% < \text{taux (ih3)} < 33\%$  :

Le conducteur neutre est considéré comme chargé, sans devoir être surdimensionné par rapport aux phases. Prévoir une section du conducteur neutre  $S_n$  égale à celle nécessaire pour les conducteurs de phases  $S_{ph}$ . Mais un facteur de réduction de courant admissible de 0,84 doit être pris en compte pour l'ensemble des conducteurs :  $S_n = S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1}{0,84}$  (facteur de dimensionnement pour l'ensemble des conducteurs, par rapport à la section  $S_{pho}$  calculée).

- *Exemple d'application si:  $15\% < \text{taux (ih3)} < 33\%$*

*Pour une section  $S_{pho} = 70 \text{ mm}^2$  alors  $S_n = S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1}{0,84} = \frac{70}{0,84} = 83 \text{ mm}^2$  qui correspond à une section théorique qui n'existe pas, par conséquent, la section retenue est  $S_n = S_{ph} = 90 \text{ mm}^2$ . On peut en conclure que l'impact des harmoniques est important sur le coût de l'installation.*

- $\text{taux (ih3)} > 33\%$  :

Le conducteur est considéré comme chargé et doit être surdimensionné pour un courant d'emploi égal à  $\frac{1,45}{0,84}$  fois le courant d'emploi dans la phase, soit environ 1,73 fois le courant calculé.

- Selon le type de câble utilisé :

câbles multipolaires :

La section du conducteur neutre  $S_n$  est égale à celle nécessaire pour la section des conducteurs de phases  $S_{ph}$  et un facteur de correction de  $\frac{1,45}{0,84}$  doit être pris en compte pour l'ensemble des conducteurs.  $S_n = S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1,45}{0,84}$  (facteur de dimensionnement pour l'ensemble des conducteurs, par rapport à la section  $S_{pho}$  calculée).

câbles unipolaires :

---

<sup>2</sup>d'après fiche A39 tirée du guide de distribution HTA/BT de Schneider Electric

Le conducteur neutre doit avoir une section supérieure à celle des conducteurs de phases. La section du conducteur neutre  $S_n$  doit avoir un facteur de dimensionnement de  $\frac{1,45}{0,84}$  et pour les conducteurs de phases  $S_{ph}$  un facteur de réduction de courant admissible de 0,84 doit être pris en compte :

$$S_n = S_{pho} \times \frac{1,45}{0,84}$$

$$S_n = S_{pho} \times \frac{1}{0,84}$$

Lorsque le taux (ih3) n'est pas défini par l'utilisateur, on se placera dans les conditions de calcul correspondant à un taux compris entre 15% et 33%.  $S_n = S_{ph} = S_{pho} \times \frac{1}{0,84}$  (facteur de dimensionnement pour l'ensemble des conducteurs, par rapport à la section  $S_{pho}$  calculée).