

RESEAU ELECTRIQUE HAUTE QUALITE

Julien SERRES, Patrick DUBOIS, Christophe JAUNAY et Sophie ESCOLANO

Lycée Marie Madeleine Fourcade,
Avenue du groupe Manouchian BP 128
13420 GARDANNE

Résumé : En milieu industriel, de plus en plus de charges polluantes (éclairage, ordinateurs...) sont installées, mais paradoxalement de nombreux équipements sensibles ont besoin d'être alimenté par un réseau de haute qualité. L'objet de cet article collectif, mêlant physiciens et électrotechniciens, est de montrer comment nous abordons avec nos étudiants de section de technicien supérieur les différents aspects de la pollution harmonique : les causes, les conséquences, et les remèdes.

Mots clés : Qualité de l'énergie électrique, Pollution harmonique, Compensateur actif.

Abréviations : GE (Groupe Electrogène), H_n (Harmonique de rang n), THD (Taux de Distorsion Harmonique - Total Harmonic Distorsion)

Notations :

I_n : valeur efficace de l'harmonique de courant H_n

φ_n : déphasage de l'harmonique de courant H_n par rapport au fondamental de la tension simple $v_1(t)$.

f_n : fréquence de H_n ($f_1 = 50\text{Hz}$)

F_p : facteur de puissance

THD I% : Taux de distorsion harmonique en courant

THD V% : Taux de distorsion harmonique en tension

I. INTRODUCTION

En première et terminale, les élèves sont initiés aux différentes formes de signaux électriques : sinusoïdaux, continus, créneaux, et les harmoniques sont à peine abordés. En Section de Technicien Supérieur, les étudiants sont confrontés à toutes formes de régime périodique.

L'étude des régimes périodiques non-sinusoïdaux nécessite de maîtriser un outil mathématique complexe basé sur le développement en série de Fourier qui est abordé en mathématiques en milieu de première année (mars). L'étude de la pollution harmonique est traitée conjointement par plusieurs disciplines : les enseignements d'électrotechnique, de physique appliquée et les essais de systèmes.

L'atelier d'essai de systèmes du lycée Fourcade est bien doté pour l'étude des thèmes relatifs à la distribution de l'énergie électrique et à la qualité de l'énergie électrique (cf. Repères pour la formation en BTS électrotechnique). Tous les essais de système se font dans l'atelier d'électrotechnique, comme préconisé dans le référentiel.

Nous disposons dans cet atelier :

- de multiples charges non-linéaires (systèmes d'éclairage, ordinateur, variateurs, alimentation sans interruption...)
- d'un groupe électrogène (OLYMPIAN™ GEP30-1) de 30 kVA,
- d'un compensateur actif SineWave triphasé (MGE UPS SYSTEMS™) de calibre 20 A,
- d'un analyseur de réseau FLUKE™ 434/435.

L'organisation de cet article vise à décrire la façon dont nous traitons les thèmes liés à la pollution harmonique au cours des deux ans. La partie II présente les sources de la pollution harmonique. La partie III présente des bilans sur la qualité de l'énergie électrique consommée par notre atelier alimenté, soit par le réseau électrique, soit par un groupe électrogène (GE) de secours. La partie IV présente une solution de dépollution par un compensateur actif. Nous avons constaté que l'introduction des problèmes liés à la pollution harmonique et des techniques de dépollution dès le début du cycle de formation des techniciens, facilite leur étude sur un plan plus théorique, en physique appliquée et en mathématiques.

II. LA POLLUTION HARMONIQUE

II.1. Les causes de la pollution harmonique

Lorsque l'installation est raccordée au réseau de distribution électrique, on fait généralement l'hypothèse d'une tension d'alimentation sinusoïdale. La pollution harmonique est générée par des charges absorbant un courant d'intensité non-sinusoïdal. Elles peuvent être de deux natures : soit des charges non-linéaires intrinsèques (e.g., tube fluorescent compensé sur Fig. 1(b), ampoule fluocompacte sur Fig. 1(c), ordinateur sur Fig. 1(d)), soit linéaires mais couplées à

un variateur ce qui les rend non-linéaires (e.g., ampoule à filament + gradateur [1], moteur triphasé + variateur [2]).

Lorsque l'installation est raccordée à une source d'énergie autonome (e.g., un groupe électrogène), on ne peut plus faire l'hypothèse d'une tension purement sinusoïdale. La pollution harmonique est alors aussi

bien générée par la source que par les charges non-linéaires. Dans un tel cas de figure, il faut mettre en œuvre une technique de dépollution pour restaurer la qualité du réseau (e.g., un compensateur actif [2]), notamment pour éviter des dysfonctionnements au niveau des équipements sensibles (papillotement des luminaires, ordinateurs, serveurs...).

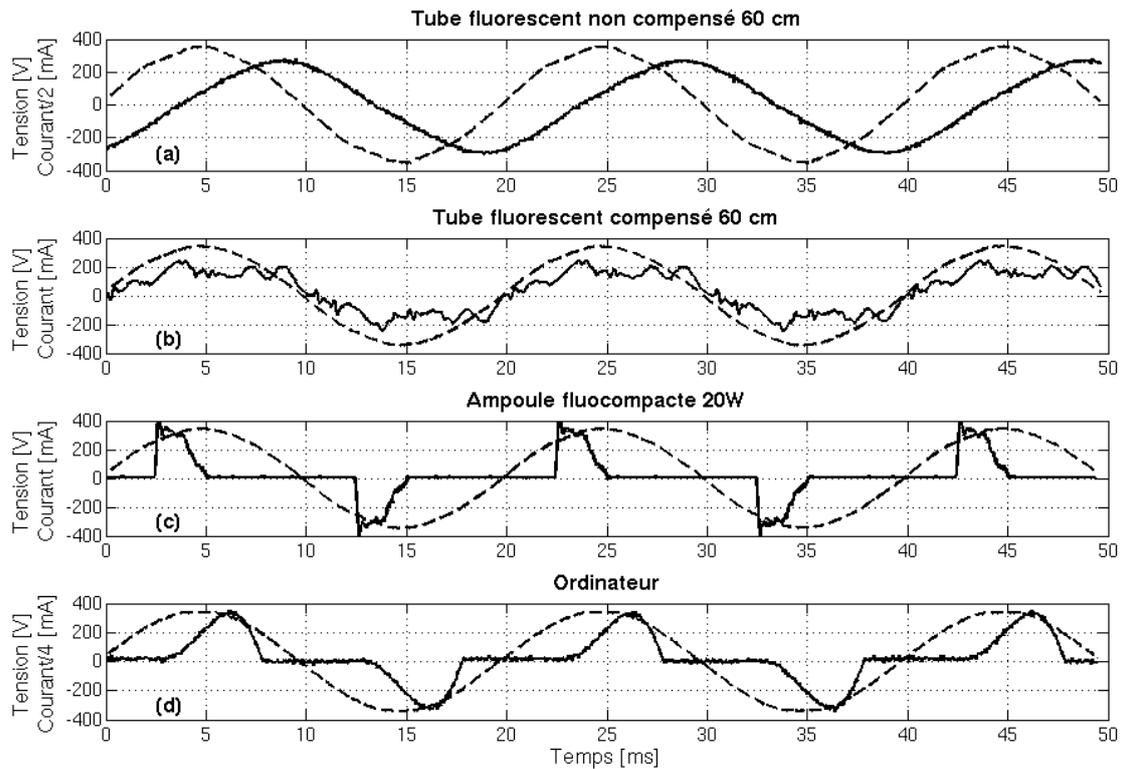


Figure 1 : types de charges (tension en pointillés,; intensité en trait continu). (a) Tube fluorescent non compensé 60 cm. (b) Tube fluorescent compensé 60 cm. (c) Ampoule fluocompacte 20 W. (d) Ordinateur de bureau.

II.2. Les critères de qualité d'un réseau

II.2.a. Indicateur de qualité d'un générateur

Lorsqu'une installation est reliée au réseau électrique, on fait généralement l'hypothèse d'une tension simple purement sinusoïdale : $v(t) = V_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$ avec $V_1 = 230 \text{ V}$; $f_1 = 50 \text{ Hz}$, qui est prise comme référence de phase. L'intensité non-sinusoïdale du courant de ligne $i(t)$ (e.g. sur la Fig. 1(b-d)) est périodique de période 20 ms, elle peut donc se décomposer en série de Fourier :

$$i(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t - \varphi_1) + \dots + I_n \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi \cdot f_n \cdot t - \varphi_n) + \dots \quad (1)$$

L'intensité du courant $i(t)$ s'écrit comme une somme infinie de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale f_1 . Les

termes de cette somme sont qualifiés de composantes harmoniques (notés H_n).

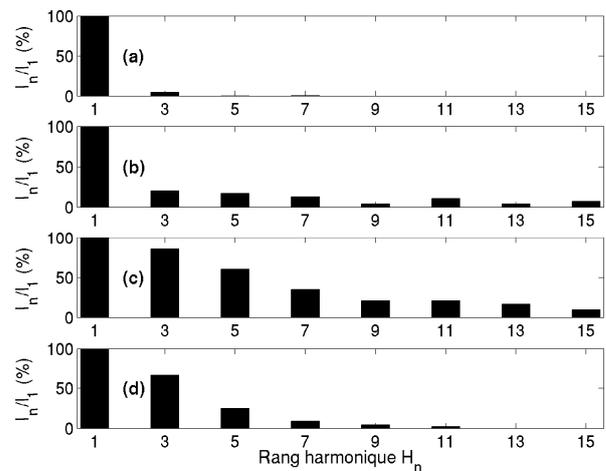


Figure 2 : signature spectrale en courant des charges représentées sur la figure 1.

La figure 2(a) montre qu'un tube fluorescent non compensé est non polluant car le spectre fait seulement

apparaître l'harmonique H_1 . La Fig. 2(b) montre qu'un tube fluorescent compensé génère peu d'harmoniques de H_3 à H_{15} en comparaison d'une ampoule fluocompacte domestique de 20 W (Fig. 2(c)). Les ordinateurs de bureau émettent essentiellement les harmoniques H_3 et H_5 (Fig. 2(d)). Chaque charge non-linéaire possède une signature spectrale qui lui est propre, ce qui permet, au sein une installation électrique, de facilement identifier la nature des émetteurs de pollution harmonique.

II.2.b. Valeur efficace d'une grandeur non-sinusoidale

La valeur efficace I de $i(t)$ est donnée par :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2 + \dots} \quad (2)$$

La valeur efficace de l'intensité des courants harmoniques I_H regroupe tous les harmoniques autres que le fondamental (H_1), on la calcule de la manière suivante :

$$I_H = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (3)$$

Dans la pratique, le calcul de cette somme dépend de la bande passante de l'appareil de mesure utilisé.

II.2.c. Les indicateurs de qualité de l'énergie électrique

Le taux de distorsion harmonique en courant $THD I\%$ (cf. (4)) est un indicateur de la qualité de la forme d'onde de courant pour quantifier l'émission de pollution harmonique d'un récepteur.

$$THD I(\%) = 100 \times \frac{I_H}{I_1} \quad (4)$$

Le niveau d'émission en BT est fixé par la norme CEI 61000-3-2 pour les appareils consommant un courant d'intensité inférieure 16 A et une puissance supérieure à 75 W, La norme CEI 61000-3-12 s'applique aux appareils consommant un courant par phase d'intensité comprise entre 16 A et 75 A. La norme CEI 61000-3-4 pour ceux consommant un courant d'intensité supérieure à 75 A [3].

Le taux de distorsion harmonique en tension $THD V\%$ (cf. (5)), est un indicateur de la qualité de la forme d'onde de tension.

$$THD V(\%) = 100 \times \frac{V_H}{V_1} \quad (5)$$

Une forte impédance de ligne ou de source, conjuguée à des courants harmoniques importants, est la cause de l'augmentation du $THD V(\%)$ au niveau des récepteurs. Les normes CEI 61000-2-2 et EN 50160 définissent les niveaux des harmoniques de tension sur les réseaux publics BT [3]. Le taux global de distorsion en tension en BT doit rester inférieur à 8%.

Le facteur de puissance $k=P/S$ quantifie le taux d'utilisation d'un réseau. La puissance apparente S étant un facteur de dimensionnement de l'installation. Les harmoniques de courant dégradent le facteur de puissance, car ils augmentent la valeur efficace des courants de ligne (cf. (2)) et par conséquent la puissance apparente S .

L'utilisation à grande échelle de petites charges non-linéaires (éclairage, ordinateurs portables, électronique grand public...) de puissance inférieure à 75 W est responsable de la pollution harmonique du réseau (voir Tableau 1). Ces types de charges échappent actuellement aux normes.

Charges	(a)	(b)	(c)	(d)
V	237 V	237 V	237 V	237 V
THD V(%)	2,4 %	2,4 %	2,4 %	2,4 %
I	0,36 A	0,13 A	0,12 A	1,54 A
THD I(%)	5 %	43 %	121 %	76 %
F_p	0,31	0,88	0,45	0,26
P	29 W	32 W	17 W	95 W

Tableau 1 : Indicateurs de qualité d'énergie des quatre récepteurs dont la tension et l'intensité sont représentés sur la figure 1.

II.3. Les conséquences sur la conception de l'installation électrique

Les harmoniques ont de nombreux effets néfastes sur une installation électrique [3,4,5,7]. Nous mettons en évidence certains de leurs effets durant les essais de systèmes en 1^{ère} année et les TP de physique appliquée en 2^{nde} année.

II.3.a. Dégradation du facteur de puissance

La puissance déformante consommée par les charges non-linéaires (tout comme la puissance réactive) dégrade le facteur de puissance F_p , cette dépendance peut s'écrire de la manière suivante en fonction de $TDH I\%$:

$$F_p = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + \left(\frac{TDH I\%}{100}\right)^2}} \quad (6)$$

Une telle dégradation conduit à augmenter la section des conducteurs de phase et de neutre. Nous proposons aux étudiants de déterminer la section des conducteurs pour différents choix de technologies d'éclairage d'un atelier industriel (voir III.3.c.).

II.3.b. Augmentation du courant de neutre

Même si les phases sont équilibrées par des charges non-linéaires (couplage étoile de trois ampoules fluocompactes), on observe un important courant de neutre (Fig. 3(b)&4(b)) dont la valeur efficace est bien plus importante que celle du courant de phase (Fig. 3(a)&4(a)). Ce phénomène est dû à la sommation des

harmoniques de rangs multiples de 3 ($H_3, H_9, H_{15}...$) dans le conducteur de neutre [6].

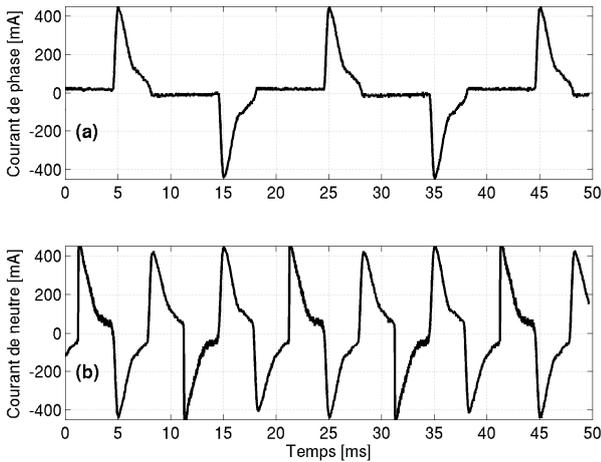


Figure 3 : (a) Courant de ligne absorbé par une ampoule fluocompacte ($I = 125 \text{ mA}$). (b) Courant de neutre mesuré pour trois ampoules fluocompactes couplées en étoile (valeur efficace 216 mA).

II.3.c. Application au dimensionnement des sections des conducteurs

Lors de travaux dirigés, on étudie une usine composée de trois ateliers. On s'intéresse à l'un des ateliers où des postes à souder et de l'éclairage sont installés. L'avant-projet d'éclairage (non traité ici) a montré qu'un flux lumineux total de 690 000 lm était nécessaire.

Le câble d'alimentation triphasé du circuit d'éclairage de l'atelier est à dimensionner pour chacune des technologies d'éclairage (ampoule incandescente 100W, tube fluorescent TLD 18W/33 non compensé, tube fluorescent TLD 18W/33 compensé, ampoule fluocompacte 20 W).

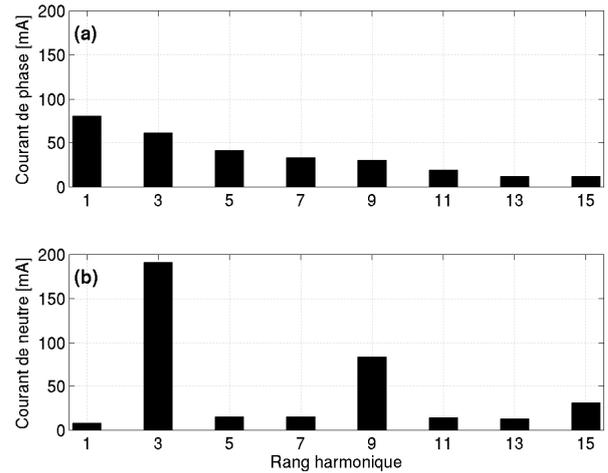


Figure 4 : (a) Spectre du courant absorbé par une ampoule fluocompacte. (b) Spectre du courant de neutre mesuré pour trois ampoules fluocompactes couplées en étoile.

Les points lumineux sont supposés être répartis de manière équilibrée sur chacune des phases d'un câble d'alimentation triphasé. Les caractéristiques du câble multipolaire sont les suivantes :

- type U 1000 R02V (PRC), âmes en cuivre,
- pose sur chemin de câble,
- 4 câbles sur le même chemin de câble,
- température ambiante maximale : 35 °C.

Les points principaux de la démarche adoptée pour choisir la section des conducteurs du câble sont récapitulés dans le Tableau 2. Les recommandations relatives au dimensionnement du conducteur de neutre sont à prendre en compte dans l'article 524.2 de la norme NFC-15100 (décembre 2002).

Technologies d'éclairage	Ampoule à incandescence	Tube fluorescent non compensé	Tube fluorescent compensé	Ampoule fluocompacte
Puissance consommée	100 W	18 W	18 W	20 W
Flux lumineux par point lumineux	1360 lm	1150 lm	1150 lm	1200 lm
Nombre de points lumineux à installer	170	200	200	192
Courant efficace dans le conducteur de phase	170 x 0,43 A → 73 A	200 x 0,36 A → 72 A	200 x 0,13 A → 26 A	192 x 0,12 A → 22 A
THD multiples de 3 (THD $I_{3n}\%$)	< 33%	< 33%	> 33%	> 33%
Courant dans le neutre (cf. norme NFC-15100)	-	-	1,45 x 26 A → 37,7 A	1,45 x 22 A → 31,9 A
Courant équivalent par phase ($I'z$)	$I'z = 73\text{A}/0,72$ → 101 A	$I'z = 72\text{A}/0,72$ → 100 A	$I'z = 26\text{A}/0,72$ → 36 A	$I'z = 22\text{A}/0,72$ → 31 A
Section des conducteurs du câble multipolaire	16 mm ²	16 mm ²	4 mm ²	2,5 mm ²

Tableau 2 : dimensionnement de la section des conducteurs du câble multipolaire selon l'éclairage.

III. BILAN SUR LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DE L'ATELIER

III.1. L'installation électrique et ses deux modes d'alimentation

Dans le cadre d'un projet industriel avec l'entreprise ATMEL, le lycée a été doté d'un GE et d'un compensateur actif. L'atelier d'essais de systèmes (Fig. 5) peut ainsi être alimenté, soit par le réseau électrique, soit par un GE de 30 kVA (Fig. 6). Un compensateur actif est inséré au point commun de couplage du tableau électrique (Fig. 5) pour pouvoir compenser toutes les charges polluantes de l'atelier (composées d'éclairage : 50 tubes fluorescents compensés 120 cm et de 15 ordinateurs alimentés par une alimentation sans interruption). La puissance totale consommée par l'atelier est en moyenne de 3,6 kW. Le compensateur actif doit être placé au plus près des émissions de pollution pour éviter qu'elle se propage aux nœuds amont de l'installation. L'atelier ne possède pas de charges polluantes de forte puissance, et l'ajout de toutes charges linéaires (de forte puissance) a tendance à améliorer $THD I\%$ (cf. (4)), car cela augmente la valeur efficace du courant fondamental I_1 . Notre installation électrique nous permet seulement de faire travailler le compensateur actif à 10% de ses capacités ($I_H \sim 2$ A) pour un calibre de 20 A.

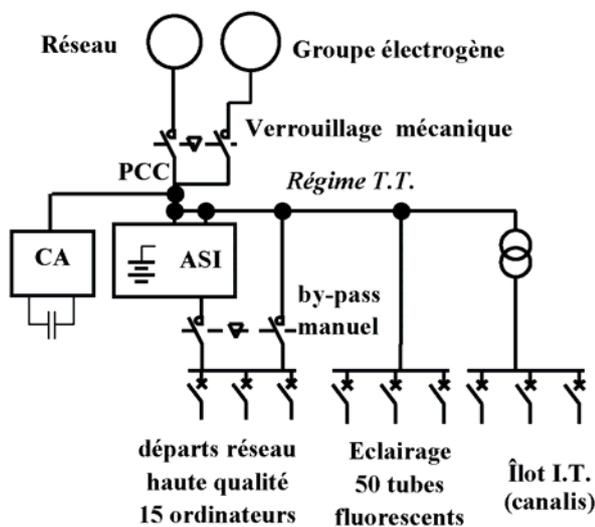


Figure 5: Schéma électrique de l'atelier d'électrotechnique. CA : Compensateur Actif, ASI : Alimentation Sans Interruption, PCC : Point Commun de Couplage.

III.2. Bilan des consommations d'énergie de l'installation

L'ensemble des résultats est regroupé dans le Tableau 3. Les étudiants mesurent en amont du point commun de couplage (Fig. 5) la qualité de l'énergie électrique distribuée, soit par le réseau, soit par le GE, au moyen d'un analyseur de réseau FLUKE™ 434/435 (bande passante des mesures de courants 10 kHz). Cet appareil

(comme de nombreux autres) globalise la puissance réactive Q et la puissance déformante D , sous une même « puissance réactive » exprimée en var . Il est important de montrer aux étudiants que ces deux puissances sont bien différentes l'une de l'autre. Durant trois séances d'essais de systèmes, les étudiants ont successivement pour tâches de :

1) quantifier la qualité de l'énergie électrique consommée par l'atelier et proposer des solutions en lien en lien avec les indicateurs de pollution harmonique (diagnostic d'installation). Les résultats sont portés dans le Tableau 3 : *Alimentation réseau – compensateur actif « OFF »*.

Les étudiants constatent qu'une multitude de petites charges non-linéaires génèrent un $THD \%I > 25\%$, et que les harmoniques H_3 et H_9 se somment dans le conducteur de neutre. Le courant de neutre représente alors $\sim 50\%$ du courant de phase (incluant un léger déséquilibre des phases). Les étudiants sont alors invités à :

2) mettre en service le compensateur actif (Fig. 7) et évaluer la qualité de l'énergie électrique apportée par le réseau (voir IV. **Dépollution**). Les résultats sont portés dans le Tableau 3 : *Alimentation réseau – compensateur actif « ON »*.

Cet essai permet de montrer qu'il est possible de rendre quasi linéaire la charge apparente vue du réseau.



Figure 6 : groupe électrogène OLYMPIAN™ GEP30-1
Caractéristiques : 380-415 V, 50 Hz, 30 kVA, régulateur de tension R250 ($\pm 0,5\%$), excitation shunt auto-excité, $THD V\%$ à vide = 4%.

3) mettre en service le GE (Fig. 6) et évaluer l'influence d'un $THD \%V$ dégradé sur la qualité de l'énergie électrique distribuée. Les résultats sont portés dans le Tableau 3 : *Alimentation groupe électrogène*.

Même si le GE est relativement peu chargé ($\sim 13\%$ de sa puissance nominale), le $THD V\%$ à vide du GE dégrade $THD I\%$. En effet, d'un $THD I\% \approx 30\%$ avec le réseau, on obtient $THD I\% \approx 45\%$ avec le GE. On

constate alors que : lorsque $THD V\%$ est multiplié par un facteur $\sim 1,5$ (2,4% avec le réseau contre 4% avec le GE), $THD I\%$ est aussi multiplié par $\sim 1,5$ (voir les cases grisées dans le Tableau 4). Cela est lié au fait que $THD I\%$ est proportionnel à $THD V\%$.

Ce dernier essai permet de mettre en évidence l'influence des générateurs sur les émissions de pollution harmoniques des récepteurs.



Figure 7 : Compensateur actif SineWave (MGE UPS SYSTEMS™) de calibre 20 A (à gauche). Transformateurs d'intensité pour les mesures et les apports des courants de compensation (à droite).

Tableau 3 : qualité de l'énergie électrique selon la nature de la source d'énergie et de l'activation du compensateur actif.

F_c : facteur de crête en courant

I : valeur efficace du courant de phase

I_N : valeur efficace du courant de neutre

Alimentation réseau - compensateur actif «OFF»

	PHASE 1	PHASE 2	PHASE 3
V	227 V	224 V	226 V
$THD V(\%)$	2,4 %	2,5 %	2,3 %
I	6,3 A	4,8 A	5,4 A
$THI I(\%)$	30,3 %	28,9 %	25,0 %
F_c	1,82	1,95	1,84
K	0,95	0,86	0,93
I_N	3,1 A		

Alimentation réseau - compensateur actif «ON»

V	227 V	224 V	226 V
$THD V(\%)$	2,4 %	2,5 %	2,3 %
I	7 A	5,6 A	6,3 A
$THI I(\%)$	8,2 %	9,6 %	8,0 %
F_c	1,63	1,84	1,67
F_p	1	0,91	0,99
I_N	2 A		

Alimentation GE - compensateur actif «OFF»

V	230 V	230 V	230 V
$THD V(\%)$	4,0 %	4,3 %	4,1 %
I	6,5 A	5,1 A	5,6 A
$THI I(\%)$	40,3 %	46,6 %	37 %
F_c	1,75	1,80	1,66
F_p	0,92	0,80	0,89
I_N	2,9 A		

IV. DEPOLLUTION PAR UN COMPENSATEUR ACTIF

L'insertion d'un compensateur actif type « shunt » se fait au point commun de couplage du tableau divisionnaire pour créer un nœud supplémentaire (Fig. 8). Le compensateur actif mesure en temps réel l'intensité des courants consommés par l'installation puis fournit, à travers le nœud créé (PCC sur Fig. 5), les courants harmoniques nécessaires aux charges non-linéaires (Fig. 8). Le réseau électrique n'a plus qu'à fournir le fondamental du courant (H_1). La charge apparente vue du réseau devient alors linéaire (Fig. 8).

Lorsque le compensateur est mis en service avec traitement global des puissances déformante et réactive, on observe que $THD I\% < 10\%$ au lieu de $\sim 30\%$, une amélioration du facteur de puissance (voir Tab. 3), une amélioration du facteur de crête en courant (voir Tab. 3), et une réduction de l'intensité du courant de neutre ($\sim 35\%$). On constate également une légère augmentation des courants de ligne liée à la consommation de puissance active nécessaire au compensateur actif.

Un compensateur actif possède de nombreux avantages vis-à-vis d'un filtre passif anti-harmonique [2], et relativement peu d'inconvénients (coût et fiabilité), on peut citer comme avantages :

- 1) un traitement global et/ou sélectif des harmoniques du H_2 à H_{25} (bande passante 1,25 kHz).
- 2) aucun risque de résonance avec l'installation,
- 3) la possibilité de traiter la puissance réactive sous faible puissance déformante,
- 4) aucun risque de surcharge mais un fonctionnement en mode dégradé,
- 5) un excellent rendement énergétique sous forte charge déformante car le compensateur actif consomme au maximum 1 kW.
- 6) le système est communiquant et reconfigurable.

Un compensateur actif « shunt » à action parallèle se révèle être la solution de dépollution la plus intéressante en BT, sauf pour des raisons économiques. Il existe également diverses solutions de couplage au réseau, ainsi que des solutions hybrides largement détaillées dans [2]. La mise en œuvre de filtres anti-harmoniques est réalisée conjointement en TP de physique appliquée de 1^{er} année plutôt qu'en essais de système.

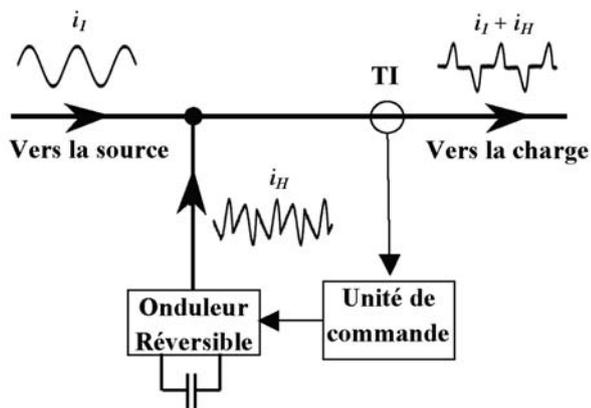


Figure 8 : Principe de fonctionnement d'un compensateur actif. TI : transformateur d'intensité.

V. CONCLUSION

L'augmentation croissante du nombre de charges polluantes (ordinateurs, éclairage, variateurs de vitesse...) en milieu industriel engendre des courants harmoniques de plus en plus importants. C'est pourquoi, le compensateur actif est une solution flexible permettant d'obtenir un réseau de haute qualité ($THD V\% < 5\%$, cf. [3]). Son utilisation évite aux industriels de redimensionner les câbles électriques ou de mettre en œuvre des solutions passives (batteries de filtres anti-harmoniques, transformateurs couplés en zig-zag ou en triangle).

À travers les activités pédagogiques proposées dans cet article, les étudiants abordent les différents aspects de la pollution harmonique : les causes, les conséquences, et les remèdes comme le ferait un technicien de terrain en charge de poser un diagnostic et de prescrire des solutions pour traiter la pollution harmonique [8].

Références bibliographiques

- [1] B. Douine, D. Netter et P. Loos, "Etude d'un variateur d'éclairage", La Revue 3EI, No 35, pp. 40-44, Dec. 2003.
- [2] E. Bettega et J-N. Florina, "Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs", Cahiers Techniques Schneider Electric, Cahier Technique n°183, 2000.
- [3] C. Colombert, J.M. Lupin, et J. Schonek, "Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement", Cahiers Techniques Schneider Electric, Cahier technique n°152, Sept. 1999.
- [4] M. Guillet, J-C Guignard et J-C Schubanel, "Comprendre les harmoniques et leurs effets", La Revue 3EI, No 49, pp. 51-56., Juin 2007.
- [5] Schneider Electric, "Détection et filtrage des harmoniques", Guides Expert Basse Tension, No 4, Avril 2008.
- [6] J. Schonek, "Les singularités de l'harmonique 3", Cahier technique n°202, Cahiers Techniques Schneider Electric, Sept. 2000.
- [7] P. Ferracci, "La qualité de l'énergie électrique", Cahier Technique n°199, Cahiers Techniques Schneider Electric, Oct. 2001.
- [8] F. Eddi et J-F Ding, "Harmoniques et réseau", La Revue 3EI, No 34, pp. 43-54, Sept. 2003.