

Éric Félice, Philippe Révilla

**QUALITÉ
DES RÉSEAUX
ÉLECTRIQUES
ET EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE**

Préface d'Antoine de Fleurieu

L'USINENOUVELLE

DUNOD

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autori-

sation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2009
ISBN 978-2-10-054618-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

L'année 2008 aura été un bon cru avec l'adoption à l'unanimité des parlementaires de la loi Grenelle 1, fait révélateur d'une réelle prise de conscience collective des enjeux du changement climatique et de la volonté de la France de s'engager résolument dans la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.

2009 sera également un bon millésime avec la probable adoption de la loi Grenelle 2 ainsi que la récente décision du Gouvernement de mettre en œuvre la taxe carbone. Il serait légitime d'être partiellement déçu par la modestie du montant de cette dernière dans sa phase de démarrage, 17 euros la tonne de CO₂, et le manque de visibilité quant à sa progressive augmentation dans les années à venir ; mais tâchons plutôt d'analyser l'enseignement positif de ce nouvel outil de fiscalité écologique.

À notre sens, en ne s'appliquant pas à l'électricité, la taxe carbone indique clairement la volonté de notre pays d'encourager des transferts d'usage d'énergie fossile vers l'utilisation d'une électricité à la fois efficiente et faiblement carbonée. L'électricité, à n'en pas douter, sera demain le vecteur énergétique essentiel de notre société. Autre perspective positive de notre point de vue, la taxe carbone repositionne l'industrie, grande oubliée du Grenelle, en première ligne dans la bataille de l'efficacité énergétique car cette dernière recèle justement un immense gisement de transfert rapide et aisé des énergies fossiles vers l'électricité.

En mai 2009 à l'occasion du colloque de l'UFE (Union Française de l'Électricité), Jacques Oddou, directeur du programme Commerce et énergies renouvelables à la Direction R&D d'EDF, indiquait ainsi « *il existe un potentiel d'au moins 50 TWh par an de combustibles fossiles que l'on pourrait substituer par 20 TWh/an d'électricité d'ici 2020* » dont 14 TWh réalisables facilement et rapidement sur la base de technologies existantes. Monsieur Oddou rajoutait « *la réalisation de cette substitution réduirait les émissions de l'industrie de plus de 12 millions de tonnes de CO₂ par an, sans augmenter significativement les émissions du parc électrique* ».

Ces solutions technologiques éprouvées sont bien connues et ne demandent qu'à être déployées massivement : moteurs électriques à haut voire très haut rendement, variateurs de vitesse, compensation de réactif, mécatronique, gestion intelligente des énergies par la mesure et les automatismes, etc. Pour ne prendre que l'exemple des moteurs électriques, il est stupéfiant de noter que le parc installé français, de 12 millions d'unités, ne comprend que 120 000 moteurs à haut rendement ! Or la part de ces moteurs dans la consommation électrique de l'industrie s'élève à 70 %.

L'écart entre les intentions et les actes reste donc encore immense et nécessitera pour être comblé une politique plus incitative encore de la part des pouvoirs publics en faveur des solutions électriques et d'automatismes efficaces. De plus, la prescription et le déploiement massif de ces solutions nécessitent de relever un défi supplémentaire, la formation à grande échelle de professionnels qualifiés. C'est à ce défi que répond le présent ouvrage et le Gimélec félicite ses auteurs et l'éditeur d'avoir pris l'initiative prémonitrice de proposer aux professionnels un livre complet, technique et richement documenté sur ce thème majeur de l'efficacité énergétique. Le partage des connaissances en la matière est un rouage essentiel de la révolution énergétique qu'entame notre XXI^e siècle et toute initiative dans ce domaine doit être saluée.

Antoine DE FLEURIEU
Délégué général du Gimélec

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	IX
1 • Une utilisation croissante de l'électronique	1
1.1 L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance	1
1.2 La notion de charges déformantes	3
1.3 Démystification des harmoniques	5
1.4 Conséquence de la pollution harmonique	8
2 • Origine et caractérisation des charges déformantes	11
2.1 Notion de charges linéaires et non linéaires	11
2.2 Nature et liste des principaux équipements pollueurs	15
2.3 La mesure du courant efficace et les appareils RMS	23
2.4 Le facteur de crête	26
2.5 Le taux d'harmonique individuel et global	27
2.6 Les harmoniques : en savoir plus	28
3 • Les effets néfastes de la pollution harmonique	31
3.1 Les perturbations observées sur les équipements et installations électriques	31
3.2 Les origines des harmoniques de tension	34
3.3 Principaux phénomènes rencontrés	36
3.4 Cas concrets de pollution harmonique sur des sites industriels et tertiaires	44
4 • Les enjeux de la qualité	55
4.1 Qualité de l'énergie électrique : critères et définitions	55
4.2 Textes et normes de référence	61
4.3 Le contrat Émeraude	66
5 • Les techniques de filtrage : une solution aux perturbations harmoniques	71
5.1 Phénomènes de résonance	71
5.2 Les solutions de filtrage	79
5.3 Étude de cas d'un filtrage passif sur un convertisseur de traitement de surface	86

5.4	Les solutions de filtrage des industriels	94
5.5	Les solutions de l'avenir	124
6 •	La mesure de la qualité	125
6.1	Spécificités de la pollution harmonique	125
6.2	Différents niveaux d'analyse harmonique	128
6.3	Appareils de mesure des harmoniques et de la qualité des réseaux	130
6.4	Mesures, analyse et interprétation	147
6.5	Quelques considérations liées aux mesures sur site	156
7 •	Établir un diagnostic d'analyse de qualité réseau	157
7.1	L'analyse et le diagnostic harmonique	157
7.2	Analyse harmonique sur un système de remontée mécanique	161
7.3	Travailler en partenariat avec un bureau d'études	166
8 •	L'efficacité énergétique au service des réseaux électriques	175
8.1	Le concept d'efficacité énergétique	175
8.2	Mettre en place une démarche d'efficacité énergétique au service des réseaux électriques	177
8.3	La mesure : une étape essentielle	179
8.4	Un exemple de solution globale de gestion et de suivi des réseaux électriques	179
8.5	Des exemples d'initiatives pour la réduction des consommations d'énergie électrique	188
	Index	195

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage a pour objectif de proposer au lecteur une véritable démarche de quantification, d'analyse, de gestion et d'optimisation des installations électriques, démarche qui s'intègre aujourd'hui dans le contexte de l'« efficacité énergétique ».

Face à une forte augmentation de la facture en énergie électrique ces dernières années, les économies d'énergie dans ce domaine permettent d'amortir rapidement le surcoût issu de l'investissement d'un appareillage électrique (compensation d'énergie réactive, dispositif de surveillance de la consommation d'électricité ou encore utilisation d'un moteur à haut rendement par exemple) mais aussi d'assurer la compétitivité de son entreprise. La part non négligeable de la ligne budgétaire Énergie est d'autant significative dans le coût de production d'un objet fini ou encore du fonctionnement d'un ensemble tertiaire.

Les retours d'expériences sur les gains obtenus grâce à une meilleure gestion énergétique démontrent aux industriels et aux exploitants de sites tertiaires que le retour sur investissement est relativement court (2 à 3 ans en moyenne).

La mesure, constituant alors un élément clé de la réussite de l'optimisation énergétique, va permettre d'obtenir une image précise des données du réseau, nécessaire et indispensable pour analyser la qualité du réseau électrique. L'observation et l'analyse des consommations électriques, ainsi que des perturbations éventuelles affectant l'installation, autorisera l'identification des gisements possibles d'économie d'énergie sur ce réseau électrique.

Les instruments de mesure sont aujourd'hui disponibles chez les fabricants pour l'obtention des données techniques nécessaires à cette analyse (pinces de puissance et d'harmoniques, analyseurs d'énergie et de réseaux ou encore les appareils de thermographie infrarouge. Un échantillonnage représentatif de ces appareils de mesure est présenté dans le contenu de cet ouvrage). Les solutions logicielles d'analyse communiquent en temps réel avec les systèmes d'acquisition de données afin d'analyser celles-ci, nous vous en présentons ici quelques applications possibles.

Les décisionnaires sont ainsi en possession de toutes les données techniques qui leur permettront de prendre la bonne décision pour optimiser leur installation électrique.

Les gestionnaires de réseau trouveront dans cet ouvrage les méthodes à mettre en place avec les outils adaptés pour entrer dans la dynamique de l'« efficacité énergétique ». Cette stratégie est la clef de voûte essentielle de la réussite énergétique de l'entreprise du XXI^e siècle (double enjeu de compétitivité industrielle et de développement durable).

■ Suppléments en ligne

Les suppléments en ligne sont accessibles sur la page web de Dunod dédiée à l'ouvrage, *www.dunod.com*. Ce sont des ressources essentielles pour la bonne mise en pratique de la démarche d'efficacité énergétique : l'accès direct aux téléchargements de guides indispensables en la matière, des liens constructeurs pour enrichir vos connaissances sur le sujet et collecter des informations complémentaires et incontournables sur les équipements de mesure. Ces suppléments vous permettront d'accompagner efficacement votre projet de gestion et d'optimisation de la qualité de vos réseaux électriques.

■ À qui s'adresse cet ouvrage ?

Cet ouvrage s'adresse aux techniciens de l'industrie, dans le cadre de la maintenance et de l'exploitation des réseaux électriques, aux responsables de sites et aux directeurs d'unité de production, mais aussi aux gestionnaires de réseaux, aux exploitants ou fournisseurs d'énergie électrique ou encore aux chargés d'exploitation pour les « grands comptes ».

■ Remerciements

Nous tenons à adresser tous nos remerciements à l'ensemble des partenaires et collaborateurs pour ce projet, tant au niveau des illustrations que pour la relecture d'écrits : ABB, Française d'Instrumentation, Chauvin-Arnoux, Fluke, Flir Systems France ; Schneider Electric, LEM, Festo, le Gimélec.

Éric FÉLICE, Philippe RÉVILLA

1 • UNE UTILISATION CROISSANTE DE L'ÉLECTRONIQUE

L'énergie électrique principalement distribuée sous la forme d'un système triphasé sinusoïdal permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux équipements et matériels de l'électrotechnique. C'est particulièrement l'aspect sinusoïdal de la tension d'origine qu'il est nécessaire de conserver, afin de lui préserver ses qualités essentielles pour la transmission de la puissance utile aux équipements terminaux. Lorsque la forme de l'onde de tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre alors des perturbations qui génèrent des dysfonctionnements et des échauffements des récepteurs et appareillages raccordés sur un même réseau d'alimentation électrique.

1.1 L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance

L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation.

En effet, des récepteurs, tels que les moteurs asynchrones et les transformateurs participent à la distorsion de l'onde sinusoïdale de la tension. Mais ce ne sont pas les uniques et principaux responsables. L'électronique de puissance présente aujourd'hui au sein de nombreux matériels d'électrotechnique, ainsi que l'électronique des équipements informatiques, contribuent essentiellement à la prolifération de ces perturbations électriques.

Ces charges dites déformantes, ou encore appelées récepteurs non linéaires comme nous le détaillerons dans la suite de l'ouvrage, appellent sur le réseau électrique des courants déformés qui en fonction de l'impédance du réseau, ou lorsqu'ils sont importants en amplitude, vont modifier l'allure de la tension sinusoïdale.

Le signal déformé ainsi obtenu est composé d'harmoniques qui se traduisent par des pertes électriques ou encore des dysfonctionnements sur le réseau électrique d'alimentation.

De plus en plus, les perturbations liées à la pollution harmonique sont présentes dans les installations et deviennent un véritable « casse-tête » pour les utilisateurs et producteurs d'électricité et ceci quel que soit le secteur d'activité industriel ou tertiaire (figure 1.1).

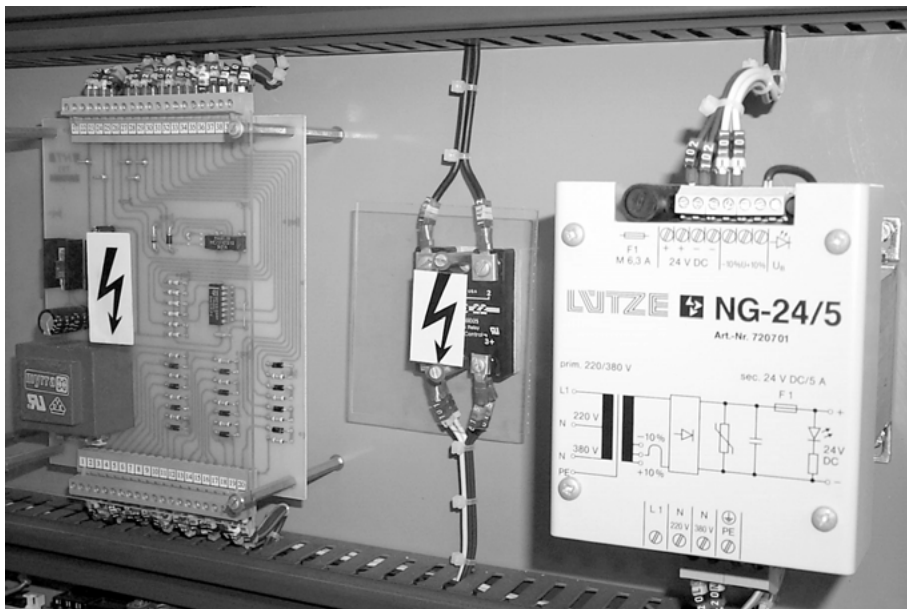


Figure 1.1 – Convertisseur générateur d'harmoniques sur une chaîne de traitement de surface.

Cet ouvrage a pour ambition de démystifier le phénomène de pollution harmonique pour les électriciens, artisans ou industriels et les professeurs ou étudiants de la filière. Des explications simples et commentées de graphiques, associés aux expérimentations pratiques permettront d'appréhender clairement les problèmes liés à la pollution du réseau électrique.

Les électriciens ou les étudiants en électrotechnique doivent aujourd'hui connaître le phénomène de pollution harmonique, et savoir réaliser les mesures électriques permettant de déterminer les éléments propres à ces perturbations en vue de quantifier le degré de pollution harmonique, dans le cadre de la qualité de l'énergie électrique, sur une installation électrique.

Actuellement, la réalité industrielle a conduit à une évolution de la mesure qui ne se satisfait plus seulement de la valeur efficace du signal analysé, mais nécessite aussi la connaissance d'autres critères caractérisant le signal déformé. Le technicien doit être en mesure de pouvoir évaluer cette pollution avec les outils de mesure existants et de proposer des solutions pour limiter ces perturbations.

Nous développerons cet aspect plus en avant dans l'ouvrage : un signal électrique se qualifie par sa valeur efficace, sa fréquence, son allure mais aussi son facteur de crête et son taux de distorsion harmonique afin de pouvoir lui attribuer un rang dans le cadre de la qualité de l'énergie électrique.

1.2 La notion de charges déformantes

Les charges déformantes, encore appelées charges non linéaires, sont présentes aujourd'hui au travers de nombreux dispositifs de l'électrotechnique : variateurs de vitesse (figure 1.2), redresseurs dans le domaine industriel, alimentations à découpage dans les ordinateurs et les onduleurs de tension (figure 1.3) pour le domaine tertiaire.

L'ensemble de ces récepteurs déforment les signaux électriques du réseau, courant et tension, en produisant des courants et tensions harmoniques.

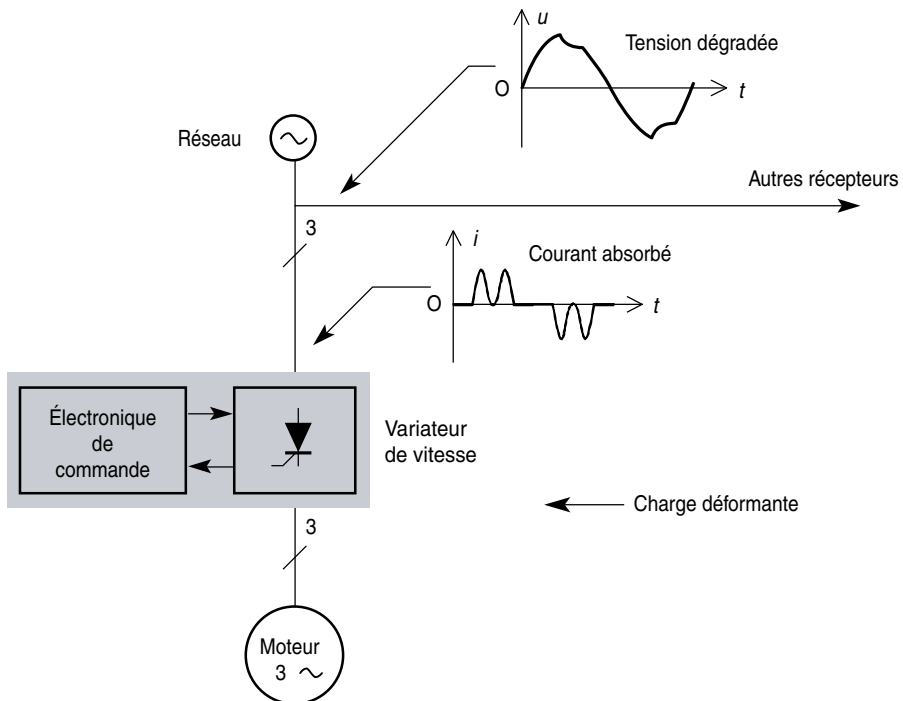


Figure 1.2 – Moteur asynchrone équipé de son variateur de vitesse.

Note

Il est nécessaire de préciser que lorsque les grandeurs électriques des équipements industriels s'éloignent de l'allure sinusoïdale pure, on obtient ce que l'on appelle des signaux déformés (figure 1.4).

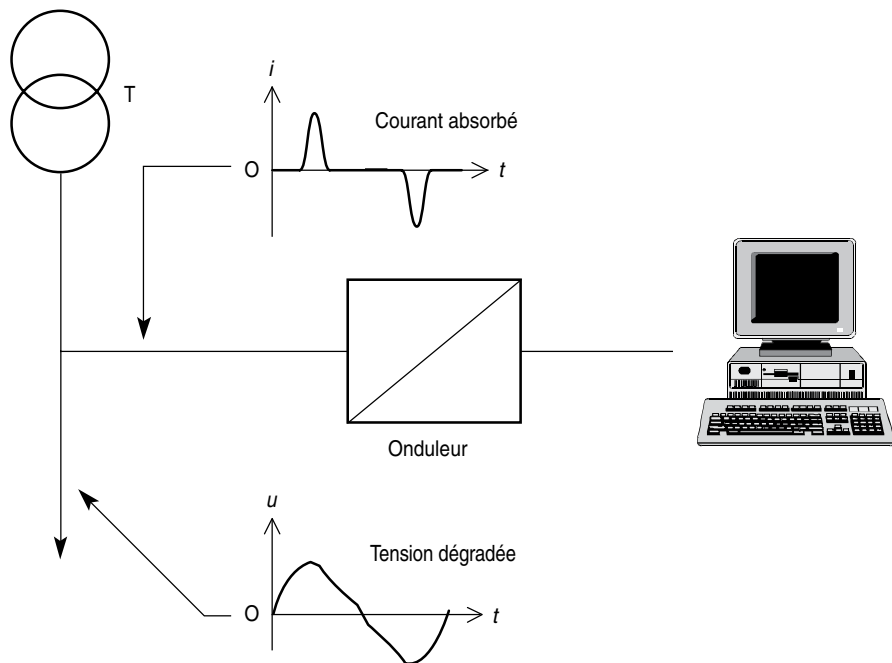


Figure 1.3 – Onduleur de tension pour micro-ordinateur.

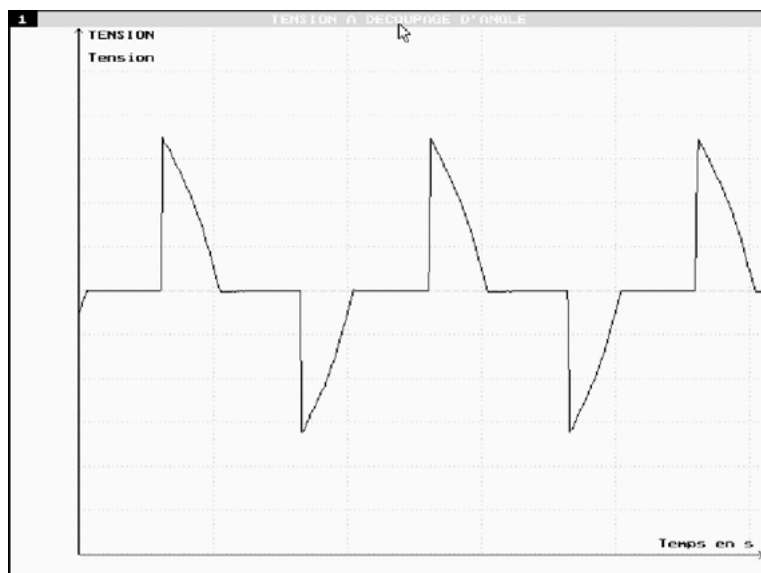


Figure 1.4 – Exemple de signal déformé issu d'un gradateur.

1.3 Démystification des harmoniques

Les signaux déformés engendrent une variation du signal d'origine qui se trouve alors composé :

- d'un fondamental,
- d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences et d'amplitudes différentes appelées harmoniques.

La somme de ces signaux sinusoïdaux de fréquences et d'amplitudes différentes constitue ainsi le signal déformé.

Les signaux harmoniques sont des multiples de la fréquence fondamentale de 50 Hz de la tension secteur (figures 1.5 A et 1.5 B).

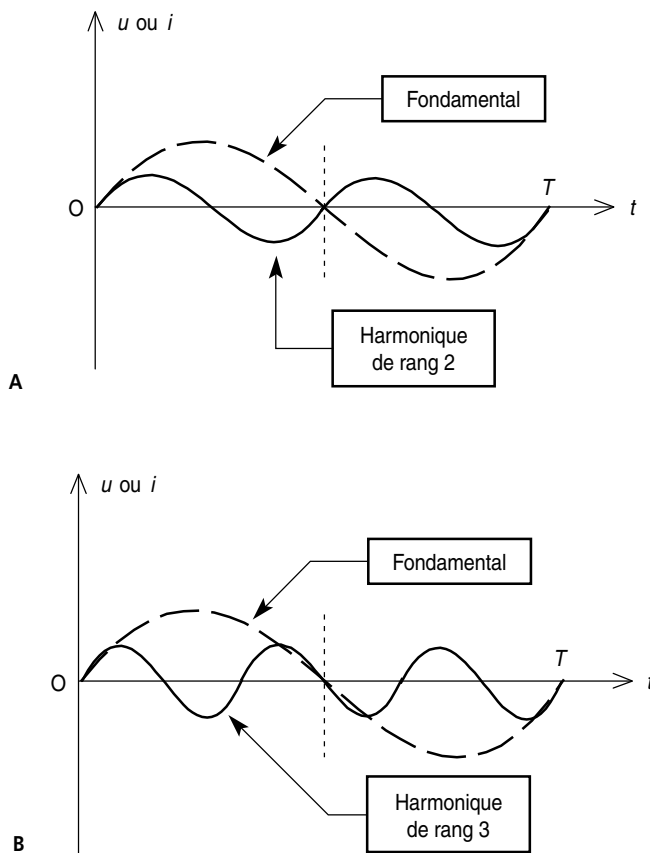


Figure 1.5

- A)** Signal fondamental et son harmonique de rang 2. L'harmonique de rang 2 a une fréquence de $50 \text{ Hz} \times 2 = 100 \text{ Hz}$.
- B)** Signal fondamental et son harmonique de rang 3. L'harmonique de rang 3 a une fréquence de $50 \text{ Hz} \times 3 = 150 \text{ Hz}$.

On définit le rang harmonique comme le rapport entre la fréquence de l'harmonique considéré et la fréquence fondamentale :

$$\text{rang} = \frac{f_{\text{Harmo.}}}{f_{\text{Fond.}}}$$

Dans la somme harmonique évoquée précédemment, et qui correspond au courant déformé appelé par le récepteur (voir exemple figure 1.6), on trouve :

- une sinusoïde fondamentale à 50 Hz (sur le réseau EDF),
- des composantes sinusoïdales possédant une fréquence multiple de la composante fondamentale, appelées harmoniques.

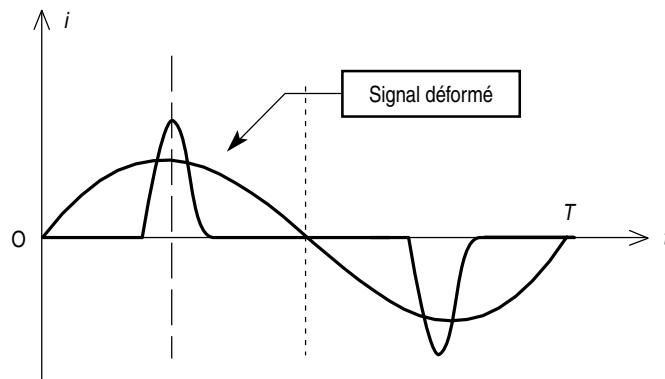


Figure 1.6 – L'exemple présenté ici représente l'allure du courant consommé par un ordinateur.

Remarque

On distingue les harmoniques de rangs pairs : 2, 4, 6, 8, etc. et les harmoniques de rangs impairs : 3, 5, 7, 9, etc. Les harmoniques de rangs impairs sont les plus courants dans les réseaux électriques industriels. En effet, les harmoniques de rangs pairs s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ainsi, dans la majorité des cas, il n'est donc question que d'harmoniques de rangs impairs.

Ainsi, une onde périodique de forme quelconque peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales élémentaires de fréquences multiples de la fréquence fondamentale (figure 1.7).

On peut donc considérer, de manière simple, que la somme des harmoniques plus le fondamental constituent ainsi le signal déformé (figure 1.8).

L'exemple de la figure précédente (figure 1.8) ne fait apparaître seulement que deux harmoniques : le rang 3 et le rang 5. En réalité, le signal déformé est composé d'un bon nombre d'harmoniques.

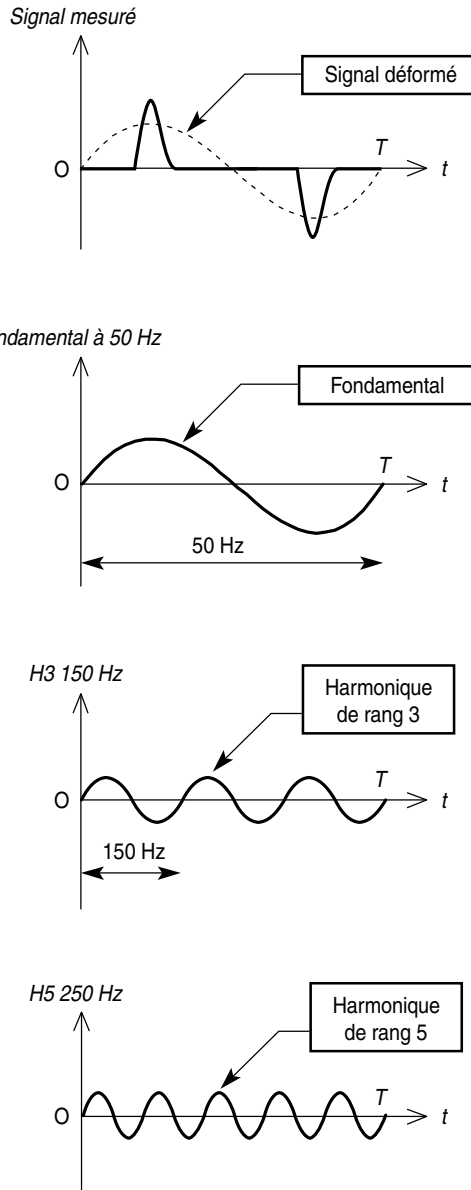


Figure 1.7 – Décomposition harmonique d'un signal déformé.

En pratique, on ne s'intéressera qu'aux harmoniques significatifs jusqu'au rang 13 dans la majorité des cas. Les appareils de mesure peuvent aller au delà : les références de pinces harmoniques ou d'analyseurs de réseau cités plus en avant dans notre ouvrage, nous permettront de faire une analyse fine de la situation de l'installation vis-à-vis des perturbations harmoniques.

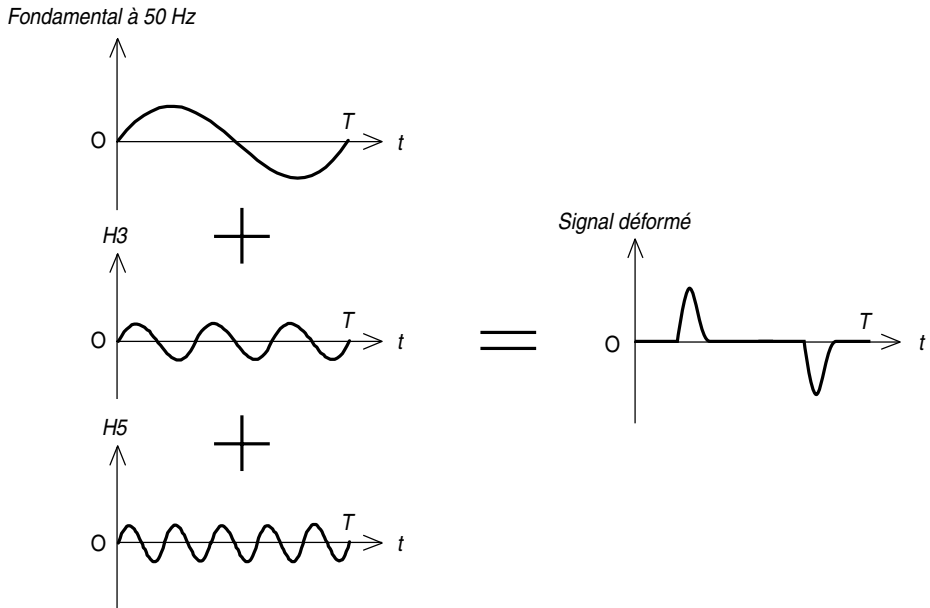


Figure 1.8 – Un signal déformé : somme de sinusoïdes de fréquences et d'amplitudes multiples.

1.4 Conséquence de la pollution harmonique

Les courants harmoniques, lorsqu'ils traversent l'impédance interne des générateurs, donnent naissance (loi d'Ohm) à des tensions harmoniques qui viennent s'ajouter, ou se déduire, des tensions fondamentales générées par le réseau d'alimentation du distributeur d'énergie électrique. De ce fait, la tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale et elle a donc un impact sur tous les autres récepteurs du réseau, avec pour conséquences les manifestations suivantes :

- augmentation des pertes par effet Joule et effet de peau ainsi que les pertes supplémentaires pour les fréquences élevées,
- augmentation de la facturation de l'énergie électrique,
- dégradation du facteur de puissance de l'installation,
- vieillissement prématuré des équipements électriques (exemple : câble de neutre),
- dysfonctionnements fréquents,
- destruction de certains matériels (condensateurs par exemple).

Cette pollution, préjudiciable pour le bon fonctionnement de tous les récepteurs raccordés sur ce réseau, est identifiée depuis plusieurs années. La problématique qu'elle engendre est aujourd'hui, au cœur des préoccupations du distributeur d'énergie électrique ainsi que des industriels et utilisateurs d'énergie électrique.

Jusqu'à présent, les préoccupations du distributeur d'énergie électrique EDF et des utilisateurs étaient centrées sur le relèvement du facteur de puissance.

Les gênes occasionnées sur le réseau de distribution électrique ont conduit les producteurs et distributeurs d'énergie électrique à prendre en compte sérieusement

ces nouvelles contraintes en vue de trouver des réponses pour une meilleure qualité de réseau électrique et de lutter contre :

- **les effets instantanés** qui concernent les pertes par effet Joule, les déclenchements intempestifs de disjoncteurs (exemple : magnéto thermique) et de relais, ou encore la perturbation des dispositifs de régulation et des équipements informatiques ;
- **les effets à long terme** qui génèrent des échauffements dans les condensateurs et les conducteurs, provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et les transformateurs.

Nous aborderons et développerons cet aspect réglementaire et normatif dans le chapitre 4, *Les enjeux de la qualité*.

2 • ORIGINE ET CARACTÉRISATION DES CHARGES DÉFORMANTES

2.1 Notion de charges linéaires et non linéaires

2.1.1 L'origine des charges déformantes

Hier, la majorité des charges utilisées sur le réseau électrique étaient des charges dites linéaires. Les charges linéaires appellent un courant de forme identique à la tension, c'est-à-dire quasi sinusoïdal, comme les convecteurs électriques ou encore les lampes à incandescence (figure 2.1).

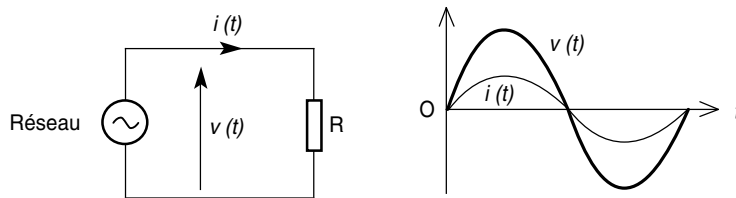


Figure 2.1 – Signaux relatifs à une charge linéaire.

Aujourd'hui, avec l'apport de l'électronique intégrée dans de nombreux dispositifs électriques, les charges produisent des courants déformés dont l'allure n'est plus sinusoïdale. Ces courants sont alors composés d'harmoniques, multiples de la fréquence du fondamental de 50 Hz (figure 2.2).

Aussi, il est impératif de bien faire la distinction entre les charges linéaires et les charges non linéaires. Cette identification peut s'effectuer :

- soit par reconnaissance du type de charge lorsque la technologie intégrée est connue,
- soit par la mesure afin de vérifier les caractéristiques du courant appelé par la charge.

Pour vous aider à déceler les charges susceptibles d'être génératrices d'harmoniques, nous allons enrichir d'exemples à partir de différents types de charges dites non linéaires ainsi que par une liste d'équipements identifiés en tant que pollueurs.

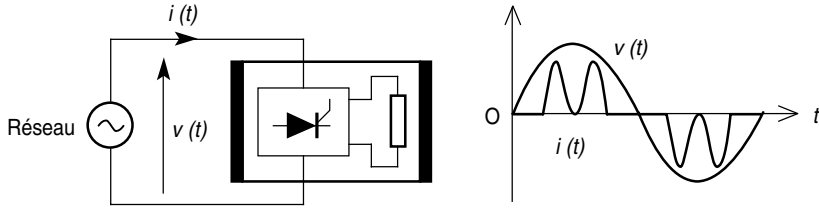


Figure 2.2 – Signaux relatifs à une charge non linéaire.

La valeur efficace d'un signal s'avère aujourd'hui insuffisante pour apprécier la déformation de ce signal. Elle n'est, dans le cas d'un courant, que l'image des effets thermiques de celui-ci mais ne renseigne pas sur la forme du signal qui est un critère d'appréciation indispensable actuellement pour une analyse précise de la qualité de l'énergie électrique sur un réseau de distribution basse tension.

On peut citer, dès à présent, quelques exemples d'équipements responsables de la déformation des signaux :

- les convertisseurs de l'électronique de puissance,
- les machines à souder, fours à arc,
- la généralisation des alimentations à découpage dans l'informatique des secteurs tertiaire et industriel aussi bien que dans les appareils électroménagers,
- tous les équipements comportant des dispositifs à semi-conducteurs.

Les équipements pollueurs sont nombreux dans le secteur industriel et répartis sur différents postes d'équipements électriques (figure 2.3).

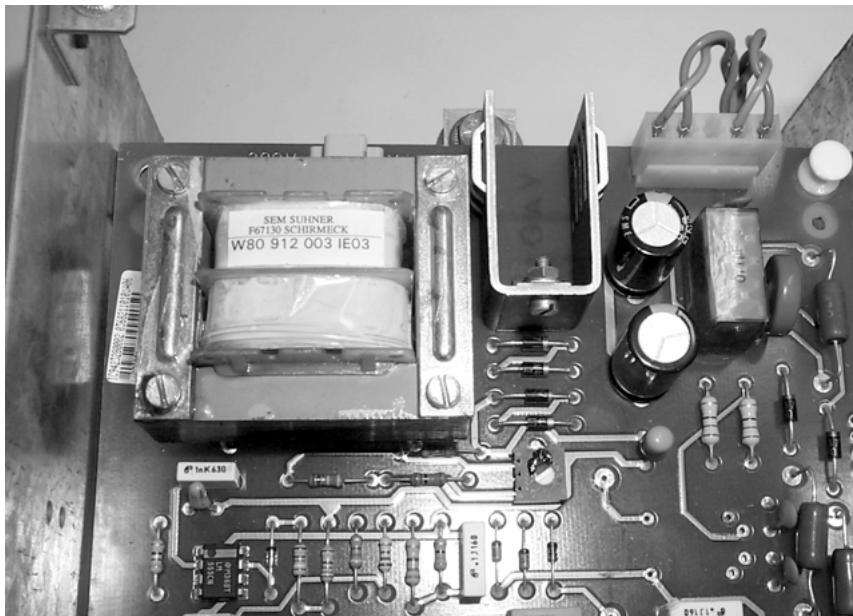


Figure 2.3 – L'électronique intégrée au cœur d'une armoire d'équipement électrique.

2.1.2 Une application de charge dite linéaire

Revenons à notre charge dite linéaire correspondant à un type de charge connue des utilisateurs du domaine de la distribution électrique. Cette catégorie de charge se retrouve au travers des récepteurs classiques tels que les convecteurs électriques, les lampes à incandescence ou encore tout simplement des récepteurs comportant des éléments purement résistifs. Mais cela peut-être aussi une charge comprenant des éléments inductifs ou capacitifs telle qu'un moteur électrique.

Aussi, la charge linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant de même allure. Il y a ainsi, à tout instant, proportionnalité entre tension et courant (figure 2.4).

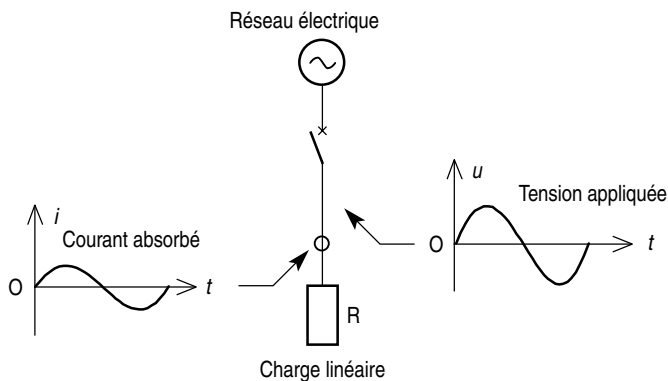


Figure 2.4 – Proportionnalité entre tension et courant pour une charge dite linéaire.

La puissance absorbée correspondante à ces deux grandeurs électriques, tension et courant, est le simple produit de ces composantes pour une charge dite linéaire associant de simples éléments purement résistifs.

Un déphasage existe lorsque l'on observe entre deux signaux sur un même circuit, un décalage de l'un par rapport à l'autre dans le temps (figure 2.5).

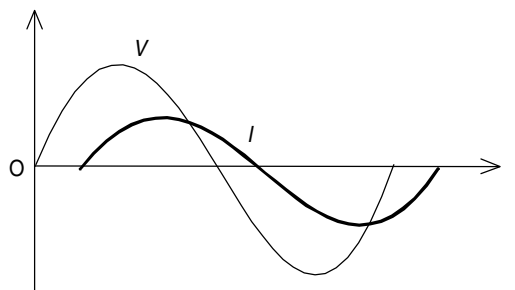


Figure 2.5 – Différence de phase entre tension et courant.

La différence de phase constatée fait alors référence au facteur de puissance intervenant dans le calcul de la puissance absorbée du récepteur en plus des composantes tension et courant.

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

Le facteur de puissance k d'un circuit est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Celui-ci est toujours inférieur ou égal à 1.

La puissance apparente étant calculée de la façon suivante : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ où P représente la puissance active et Q la puissance réactive.

On parle de $\cos\varphi$ pour des signaux purement sinusoïdaux. Par exemple un moteur asynchrone d'une puissance de 3 kW présente un $\cos\varphi$ d'environ 0,82.

La puissance active consommée par un récepteur linéaire en régime sinusoïdal est donnée par les relations suivantes :

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

Pour un facteur de puissance pouvant être unitaire (dans le cas de charge purement résistive) ou inférieure à 1 (dans le cas de charge inductive telle qu'un moteur asynchrone), la notion de **charges linéaires** :

- est donc valable pour des charges comprenant non seulement des éléments résistifs mais aussi des composants passifs tels que les inductances ou les condensateurs,
- conserve proportionnalité entre tension et courant.

2.1.3 Une application de charge dite non linéaire

La charge dite non linéaire correspond à un type de charge composée d'éléments semi-conducteurs, constituants essentiels des dispositifs de l'électronique.

Aussi, la charge non linéaire, lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale, absorbe un courant dit déformé. Il y a donc plus proportionnalité entre tension et courant (figure 2.6).

La notion de $\cos\varphi$ n'est plus applicable dans le cas de signaux déformés. On parle alors de facteur de puissance Fp (PF pour *Power Factor* dans la littérature anglaise) :

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

En développant cette notion de facteur de puissance, on voit apparaître un nouveau terme D dans l'expression suivante, matérialisant la puissance déformante :

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

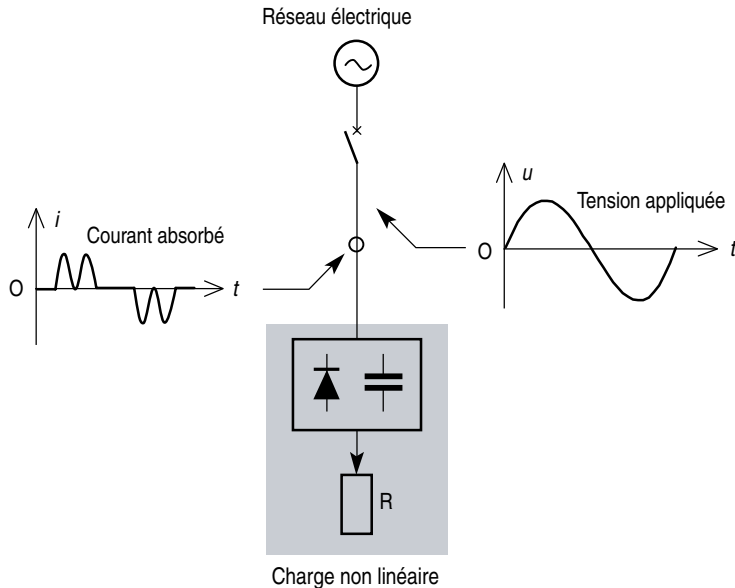


Figure 2.6 – Non-linéarité entre tension et courant pour une charge déformante.

Cette puissance déformante D traduit les effets de la distorsion harmonique sur l'installation considérée. La dégradation de la valeur du facteur de puissance est donc augmentée, sur ce type d'installation, comparativement à une installation ne comportant que des charges linéaires. Et ceci en raison de la présence d'harmoniques issus des charges non linéaires.

Afin de lever l'ambiguïté entre le $\cos\varphi$, dans le cas de signaux sinusoïdaux, et le facteur de puissance k , dans le cas de signaux déformés, les appareils de mesure de puissance et d'analyse d'énergie utilisent le terme DPF (*Displacement Power Factor* pour déplacement du facteur de puissance) pour désigner le $\cos\varphi$ en régime perturbé. La compensation d'énergie réactive mise en œuvre sur une installation n'étant pas faite sur les harmoniques, c'est le paramètre DPF qui est pris en compte dans les calculs.

Ainsi, le DPF est égal au facteur de puissance F_p uniquement pour les signaux non déformés. En d'autres termes, le DPF représente le cosinus du déphasage entre les fondamentales de la tension et du courant. Le DPF constitue alors la véritable représentation du déphasage entre les signaux U et I .

2.2 Nature et liste des principaux équipements pollueurs

La génération de courants harmoniques, sur les réseaux d'alimentation électrique, est due à de nombreux types d'équipements, dont on peut dresser une liste non exhaustive et que l'on retrouve dans les matériels suivants :

Types d'équipements générant des courants harmoniques	Dans quelles familles de matériels les trouve-t-on ?
Moteurs asynchrones monophasés et triphasés	Matériel électroménager Climatisation Outillage et machines-outils Équipements industriels
Redresseurs monophasés	Micro-ordinateurs Imprimantes et périphériques d'ordinateurs Variateurs de vitesse pour moteurs alternatifs Ballasts électroniques Téléviseurs
Gradateur à angle de phase	Modulation d'éclairage des lampes Commande de four électrique Régulation de puissance Démarreurs progressifs de moteurs
Redresseurs triphasés à base de semi-conducteurs	Variation de vitesse de moteurs (pompes, convoyeurs, etc.) Fours à induction Électrolyseurs
Appareils d'éclairage	Lampes à fluorescence Lampes à vapeur haute pression Lampes fluo compactes
Appareils à arc électrique	Fours Poste de soudure

Les allures de courant appelées par les charges déformantes sont éloignées de l'allure sinusoïdale et peuvent prendre des formes très diverses dont quelques-unes sont décrites dans les exemples suivants.

La plupart des équipements informatiques sont dotés d'une alimentation à découpage. Grâce à la commutation en interne de ses composants d'électronique de puissance, l'alimentation ne laisse passer le courant que de manière impulsionnelle (figure 2.7). Celui-ci est alors riche en harmoniques de rangs impairs (rangs 3, 5, 7 et 9).

Cette configuration explique, nous le détaillerons plus en avant dans l'ouvrage, les dysfonctionnements que l'on peut rencontrer dans le secteur tertiaire en raison de l'utilisation massive d'équipements informatiques.

Les moteurs ou encore les alternateurs produisent des courants harmoniques en raison des imperfections dues aux dissymétries de leur bobinage. Les taux de distorsion mesurés sont en général faibles (figure 2.8).

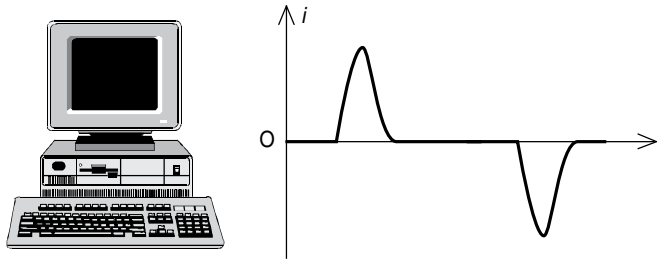


Figure 2.7 – Alimentation à découpage dans un micro-ordinateur.

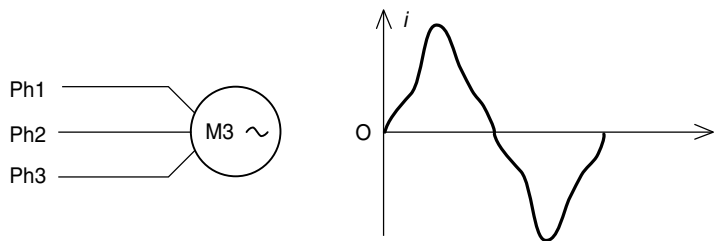


Figure 2.8 – Moteur asynchrone. Il est à noter que plus les moteurs sont de fortes puissances, moins les harmoniques sont présents.

Les équipements informatiques alimentés via des onduleurs permettent de pallier à des coupures électriques du réseau d'alimentation (figure 2.9).

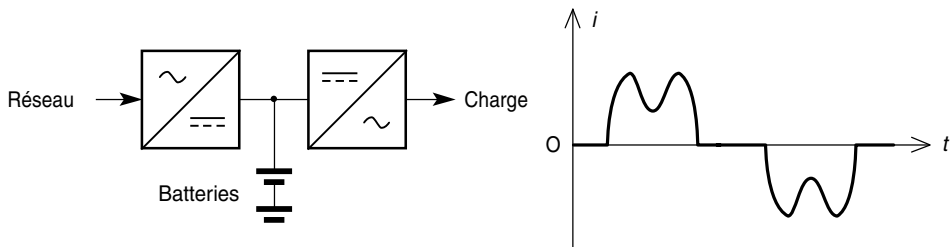


Figure 2.9 – Onduleur de tension.

Le courant de sortie de l'onduleur est déformé et produit des harmoniques de rang impair avec un fort taux de distorsion.

Dans les dispositifs récents d'onduleur de tension encore appelés ASI (Alimentation statique ininterrompue) qui assurent le plus souvent l'alimentation des équipements informatiques, les technologies internes utilisées permettent de fournir à la charge non linéaire une tension quasi sinusoïdale (technique dite de MLI, Modulation de largeur d'impulsion). De ce fait, les ASI de technologie récente au même

titre que les alternateurs, ne sont pas, ou tout du moins très faiblement, responsables de la pollution harmonique des réseaux électriques.

La commande des moteurs à vitesse variable représente un grand nombre d'applications industrielles. Dans ce cas, le moteur est alimenté par une onde de courant d'amplitude et de fréquence variables issues du variateur de vitesse (figure 2.10). Ces variateurs génèrent des harmoniques de rangs impairs (rangs 5, 7, 9...).

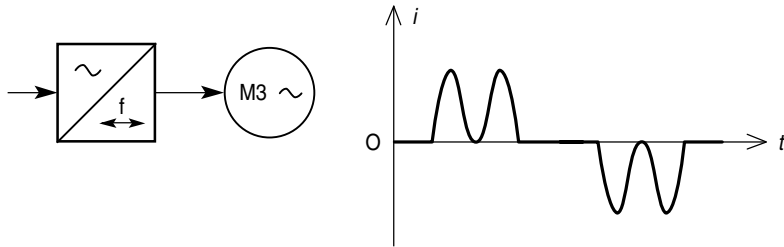


Figure 2.10 – Variateur de vitesse à fréquence variable.

L'éclairage fluorescent, doté de ballast, absorbe un courant qui n'est pas d'allure sinusoïdal et génère ainsi des courants harmoniques de rangs impairs : 3, 5, 7, 9... (figure 2.11).

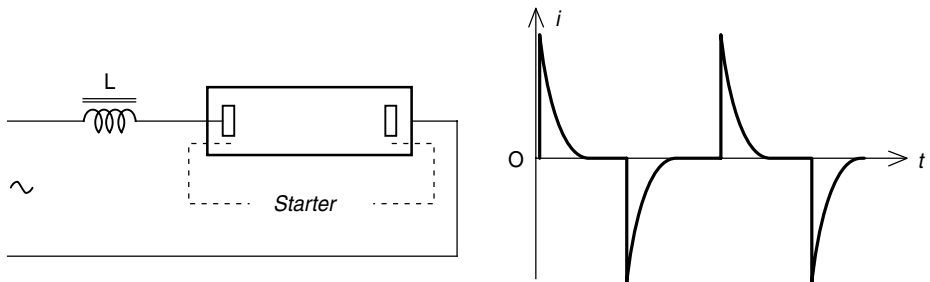


Figure 2.11 – Éclairage fluorescent.

Les lampes à vapeur haute pression présentent une plus grande efficacité lumineuse avec un coût relativement plus élevé ; elles sont aussi génératrices de courants harmoniques. La présence aujourd'hui, de plus en plus fréquente de ballasts électroniques, conduit à une émission d'harmoniques plus importante.

La commande de lampes halogènes est réalisée à partir de gradateurs utilisant des thyristors afin d'assurer la modulation de puissance fournie à la lampe. Les courants consommés produisent des harmoniques de rangs impairs : 3, 5, 7, 9... (figure 2.12).

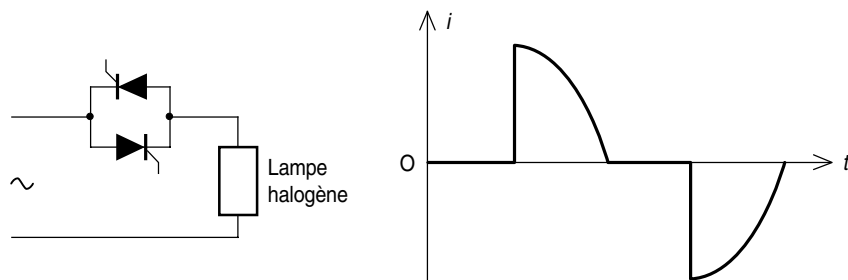


Figure 2.12 – Variateur de lumière pour lampe halogène.

Ce montage est aussi utilisé pour moduler l'énergie électrique de fours ou encore pour réaliser la commande des démarreurs de moteurs électriques (démarreur progressif). Il existe deux types de commande du gradateur : commande par trains d'ondes et commande par angle de phase. Pour la commande par angle de phase, les semi-conducteurs (thyristors ou triacs) sont commandés de telle sorte que la tension appliquée à la charge est une tension tronquée issue de la sinusoïde réseau. Le courant est à l'image de la tension et est chargé d'harmoniques.

Le redresseur monophasé à filtre capacitif permet de convertir la tension alternative du réseau en une tension redressée et filtrée. Ce montage produit l'émission de courants harmoniques de rangs 3, 5, 7, 11 et 13 avec un fort taux de distorsion harmonique essentiellement pour les rangs 3 et 5 (figure 2.13).

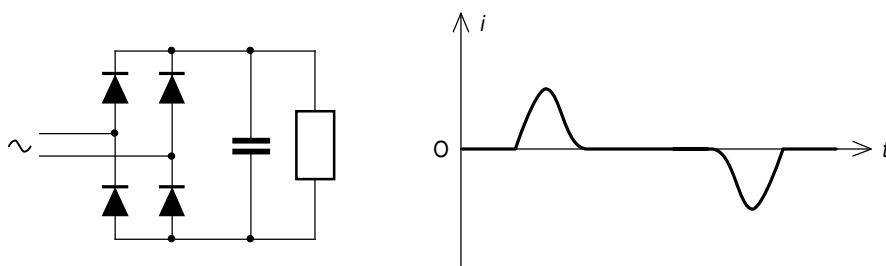


Figure 2.13 – Redresseur monophasé avec filtrage.

La version triphasée du redresseur à diodes avec filtrage capacitif constitue bien souvent le montage d'entrée du variateur de vitesse pour moteur asynchrone. Les courants harmoniques générés par ce type de convertisseur sont riches et correspondent aux rangs 3, 5, 7, 11 et 13 (figure 2.14).

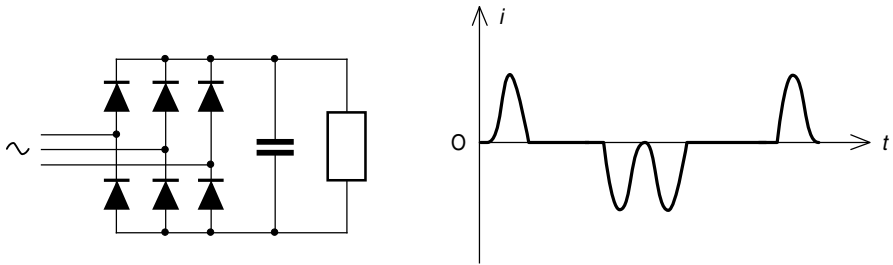


Figure 2.14 – Redresseur triphasé avec filtrage.

Le redresseur triphasé à thyristors est un convertisseur de l'électronique de puissance très utilisé dans les applications industrielles. Il réalise la modulation de puissance de la charge (vitesse variable des moteurs à courant continu ou des moteurs synchrones, électrolyseurs, etc.) en faisant varier la tension continue appliquée à ses bornes à l'aide des thyristors.

Ces convertisseurs constituent une source importante de pollution harmonique dans le secteur industriel. Les rangs harmoniques essentiellement présents sont les rangs 5, 7, 11 et 13 (figure 2.15).

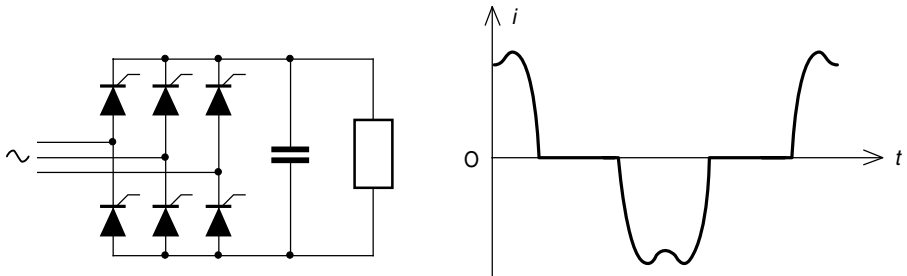


Figure 2.15 – Redresseur triphasé à thyristors.

Un résumé des principaux types de charges associées à l'allure des courants correspondant appelés sur le réseau est fourni dans le tableau 2.1 suivant. Et ceci pour des applications de type domestiques, tertiaires et industrielles.

Tableau 2.1 – Principaux types de charges avec les allures de courants absorbés.

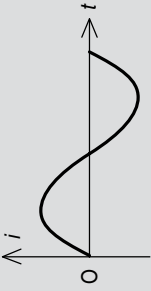
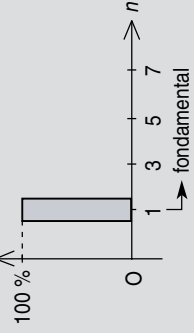
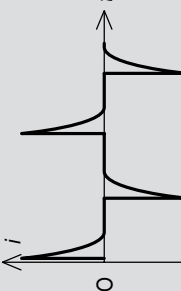
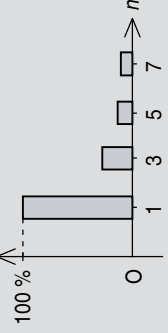
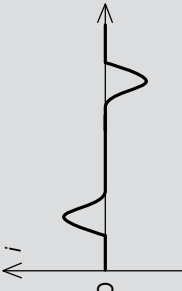
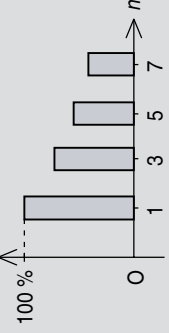
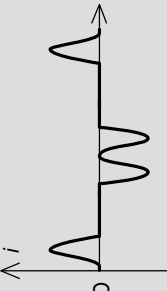
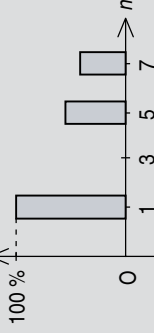
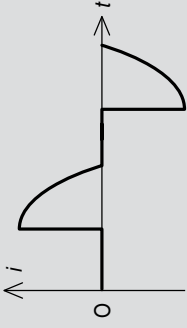
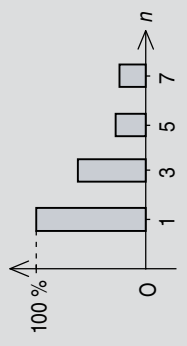
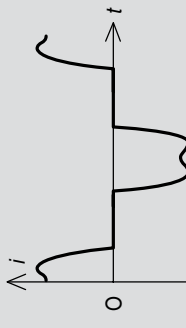
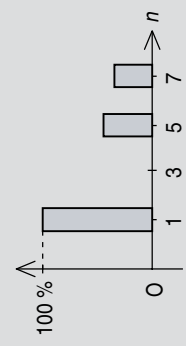
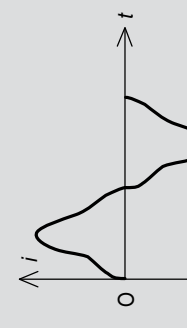
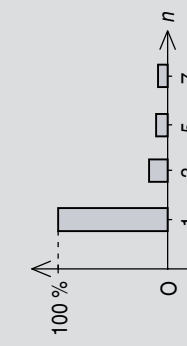
Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Récepteur résistif.	Fours industriels à résistances régulées par commande à trains d'ondes. Lampe à incandescence, convecteurs, chauffe-eau.		
Éclairage.	Tubes fluorescents. Lampes à vapeur HP.		
Redresseur monophasé à diodes avec filtrage, alimentation à découpage.	Micro-informatique. Télévisions. Lampes à ballast électronique.		
Redresseur triphasé à diodes avec filtrage.	Variation de vitesse des moteurs asynchrones.		

Tableau 2.1 – Principaux types de charges avec les allures de courants absorbés. (Suite)

Types de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commande par angle de phase).	Régulation de puissance de fours à résistances. Modulation de puissance des lampes halogènes.		
Redresseur triphasé à thyristors.	Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones. Electrolyseurs.		
Moteur asynchrone	Machines outils. Appareils électroménagers. Ascenseurs.		

2.3 La mesure du courant efficace et les appareils RMS

Afin de comprendre l'importance des perturbations causées par la pollution harmonique, il est nécessaire de rappeler qu'en régime alternatif, à la fréquence de 50 Hz, sur les réseaux d'alimentation électrique, les caractéristiques des matériels, les réglages des dispositifs de protection, la détermination par calcul des sections de conducteurs sont basés sur un courant parfaitement sinusoïdal.

Ainsi, avec l'apport des charges non linéaires, le courant, nous l'avons vu précédemment, ne conserve plus un aspect purement sinusoïdal. Il est déformé par la commutation de composants à base de semi-conducteurs intrinsèques à la constitution du matériel qui autorise le passage du courant qu'à des instants donnés sur une période complète.

Il va donc être essentiel de pouvoir mesurer la valeur efficace du signal quelle que soit la forme de celui-ci dans une installation électrique.

Les appareils numériques dits RMS (*Root Mean Square*) réalisent la mesure efficace d'un signal quelle que soit sa forme, sinusoïdal ou bien déformé.

Les appareils de mesure traditionnels à thermocouple sont basés sur le principe de la mesure de la chaleur dégagée par effet Joule et mesurent aussi de réelles valeurs efficaces des courants ou tensions, quelle que soit la forme du signal.

Attention !

Tous les appareils ne sont donc pas capables de mesurer la valeur efficace réelle d'un signal quelle que soit sa forme. La mesure de la valeur efficace réelle est liée à la bande passante ainsi qu'à la technologie de l'appareil de mesure. Assurez-vous auprès du constructeur de l'appareil de mesure de ses performances réelles.

■ Les mesures erronées dues à un appareil non RMS

Un appareil de mesure qui n'est pas de technologie RMS ne pourra aucunement donner la valeur efficace exacte du courant mesuré. Cet équipement, accessible bien souvent à bas prix, ne se contente que de préciser la valeur efficace du fondamental (à 50 Hz) du courant, ce qui n'est pas représentatif de l'image thermique totale produit par la valeur efficace du courant déformé (figure 2.16). Dans ce cas l'appareil de mesure en question n'est prévu que pour mesurer la valeur efficace d'un courant d'allure sinusoïdale.

Comme nous l'avons abordé dans le chapitre précédent, un signal déformé se décompose en une somme de signaux harmoniques associés au fondamental à 50 Hz (figure 2.17).

Aussi, la valeur efficace réelle du courant est représentative de l'effet Joule engendré par l'ensemble de ces signaux et prend en compte l'ensemble : fondamental + harmoniques (tableau 2.2).

Les caractéristiques du signal déformé présent à la figure 2.17 sont reportées dans le tableau précédent.

Nous verrons dans la suite de l'ouvrage qu'il est possible de mesurer la valeur efficace de chaque harmonique ainsi que du fondamental à l'aide des appareils de mesure actuels (pinces harmoniques notamment).

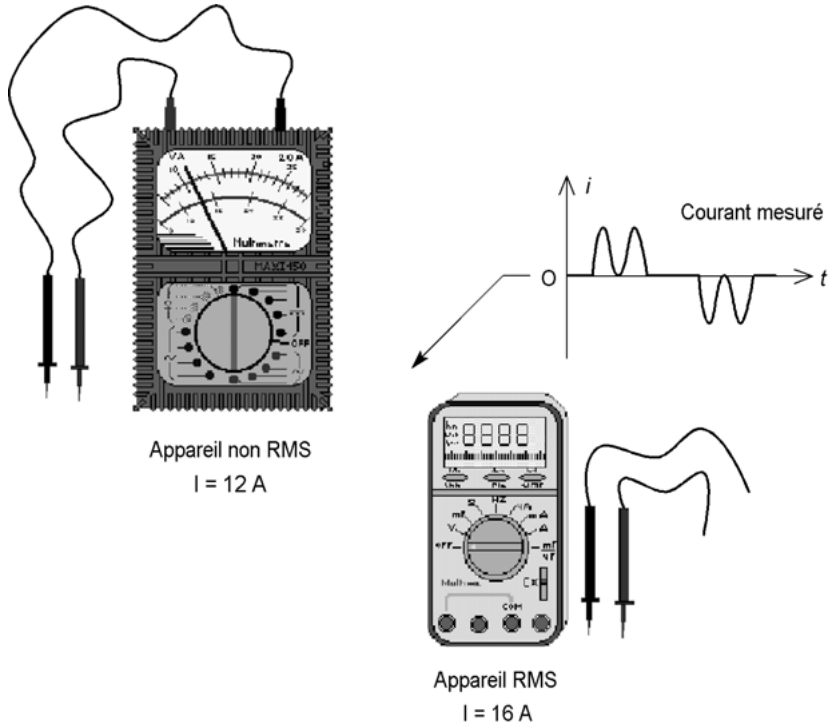


Figure 2.16 – La valeur réelle efficace est bien largement supérieure à la valeur mesurée par l'appareil qui n'est pas de technologie RMS. Les écarts peuvent être de l'ordre de 50 %.

Fondamental à 50 Hz

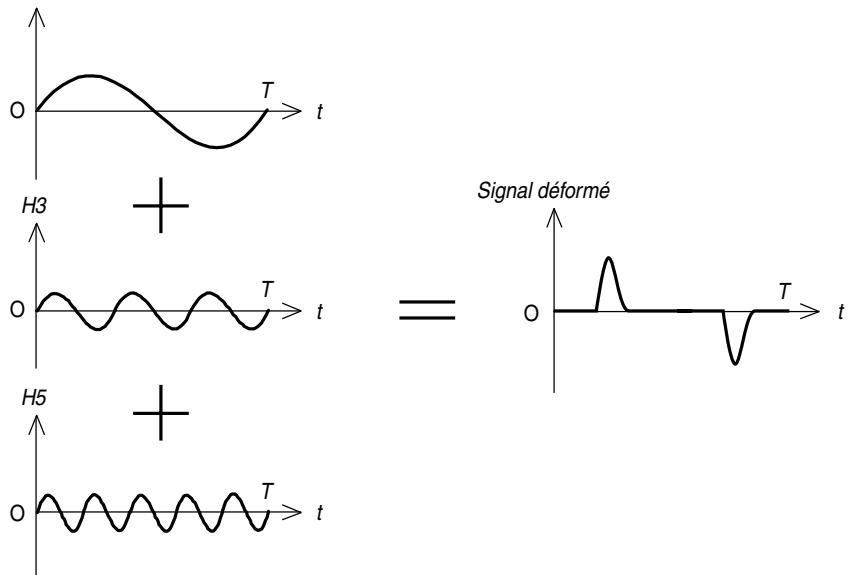


Figure 2.17 – Somme harmonique.

Tableau 2.2 – Valeur efficace des harmoniques d'un signal déformé.

Rang harmonique	Valeur efficace	Taux de distorsion de l'harmonique ¹
1 (fondamental)	12	100 %
3	9	75 %
5	5	42 %
7	2,5	21 %
autres	0,75	6,25 %

1. Le taux de distorsion de l'harmonique est calculé par rapport au fondamental. Exemple pour l'harmonique 7 : $\frac{2,5}{12} = 21 \%$.

Le calcul de la valeur efficace du courant déformé s'obtient donc en effectuant la somme quadratique des courants. Cela revient à élever au carré chaque valeur efficace du courant, à additionner les valeurs obtenues et à en extraire la racine carrée. Rassurez-vous, les appareils de mesure effectuent cette tâche automatiquement lors de la mesure ! Nous le découvrirons dans le chapitre 6, *La mesure de la qualité*.

Revenons à l'exemple précédent et appliquons la démarche de calcul proposée précédemment :

$$I = \sqrt{12^2 + 9^2 + 5^2 + 2,5^2 + 0,75^2} = 16 \text{ A}$$

On notera l'importance des valeurs efficaces des harmoniques devant celle du fondamental. L'harmonique de rang 3 vaut 9 ampères, le fondamental 12 ampères et le courant efficace total 16 ampères !

De manière générale, la valeur du courant efficace du courant est donnée par la relation suivante :

$$I_{\text{R.M.S.}} = \sqrt{I_{\text{fondamental}}^2 + Ih_3^2 + Ih_5^2 + Ih_7^2 + \dots}$$

où Ih représente le courant harmonique.

Les harmoniques de rang élevé ne présentent qu'une valeur efficace souvent négligeable, devant le courant total, et une approximation réalisée à partir des premiers rangs d'harmoniques suffit largement pour quantifier un signal et ceci dans la majorité des cas.

2.4 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 $\sqrt{2}$ entre la valeur crête (I_{MAX}) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace de ce même signal (figure 2.18) :

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

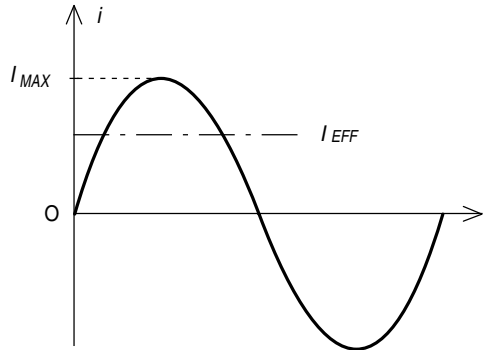


Figure 2.18 – Signal sinusoïdal.

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) :

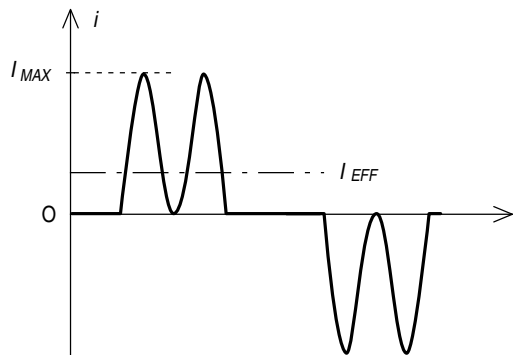


Figure 2.19 – Signal déformé.

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 :

$$F_c = \frac{\text{valeur}_{\text{crête}}}{\text{valeur}_{\text{efficace}}}$$

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

2.5 Le taux d'harmonique individuel et global

Nous avons précédemment fait référence au taux de distorsion d'un harmonique, qui est le rapport entre la réelle valeur efficace de l'harmonique d'un signal (courant ou tension) par rapport à la valeur efficace du même signal à la fréquence fondamentale :

$$\tau_n = \frac{A_n}{A_1}$$

Ce taux est une valeur particulière pour un harmonique donné, où A_n représente la valeur efficace de l'harmonique au rang considéré et A_1 la valeur efficace du fondamental.

Dans l'exemple précédent pour l'harmonique 3 :

$$\tau_n = \frac{A_3}{A_1} = \frac{9}{12} = 75 \%$$

Afin d'avoir une représentation globale de la déformation d'un signal, il a été nécessaire de définir un taux de distorsion harmonique, qui lui, tient compte de l'ensemble des harmoniques du signal analysé : le THD (*Total Harmonic Distorsion*).

Plus le signal est déformé, plus le taux de distorsion harmonique est important, ce qui signifie que le niveau de richesse du signal en harmoniques est conséquent.

Ce taux de distorsion harmonique global est égal au rapport de la valeur efficace de l'ensemble des courants harmoniques par rapport à la valeur du courant efficace du fondamental. On parle alors du *THD-F* :

$$THD - F = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1}$$

avec A_1 : valeur efficace du fondamental.

À nouveau pour l'exemple précédent :

$$THD - F = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{A_1} = \frac{\sqrt{9^2 + 5^2 + 2,5^2 + 0,75^2}}{12} = 88,5 \%$$

On définit également le taux d'harmonique par rapport à la valeur efficace du signal, qui est le quotient :

$$THD - G = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_n^2}}{X}$$

avec X : valeur efficace du signal.

Nota

Dans les relations précédentes, on tient compte des harmoniques de rangs pairs et impairs. Sachant que pour un signal symétrique, par rapport à l'axe des temps, seuls les harmoniques de rangs impairs seront pris en compte. On prend l'hypothèse de ne pas avoir de composante continue dans le signal.

2.6 Les harmoniques : en savoir plus

La notion d'harmonique, issue du développement mathématique en série de Fourier, permet de définir quantitativement et avec précision, la déformation du signal mesuré.

L'onde périodique est décomposée en une somme d'ondes sinusoïdales de fréquences différentes et associée à une sinusoïde à fréquence industrielle (50 Hz) appelée *fondamentale*.

La fréquence de chacune d'entre elles est un multiple entier de la fréquence fondamentale du signal.

D'autre part, le rang de l'harmonique est le rapport de sa fréquence à celle du fondamental à 50 Hz :

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

avec f_n , fréquence de l'harmonique et f_1 , fréquence du fondamental.

On parle ainsi de rang 3, 5, 7, etc.

Le signal peut donc être mis sous la forme :

$$x = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \times \sqrt{2} \times \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

avec :

- A_0 : amplitude de la composante continue (celle-ci est bien souvent nulle en distribution électrique).
- A_n : amplitude de l'harmonique de rang n (valeur efficace)
- φ_n : déphasage relatif au fondamental de la composante harmonique de rang n .

Les harmoniques au-delà du rang 25 sont généralement négligeables. Nous aurons l'occasion de le constater au travers de l'approche pratique abordée dans l'ouvrage.

Un autre moyen de traduire la notion d'harmoniques, sous forme d'histogramme, permet de donner une représentation de l'importance des harmoniques par rapport au fondamental en fonction du rang, on parle alors de spectre du signal étudié.

Dans l'exemple de la figure 2.20, on effectue l'analyse spectrale du signal observé en le décomposant en ses différentes composantes harmoniques.

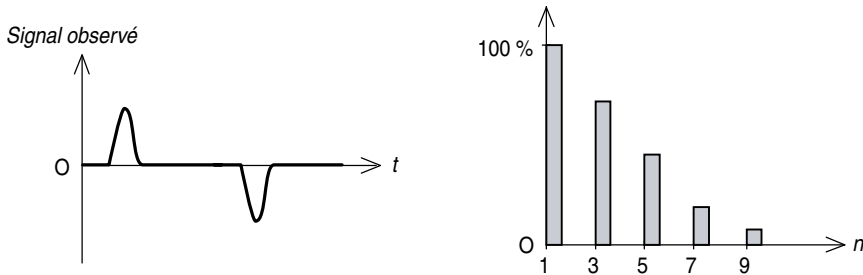


Figure 2.20 – Signal observé associé à son analyse spectrale.

Ici, on s'est attaché à ne représenter que les harmoniques de rang 3 à 9 qui donnent une représentation suffisamment réaliste de la composition du signal déformé.

La figure 2.21 illustre le développement en série de Fourier d'un signal sinusoïdal.

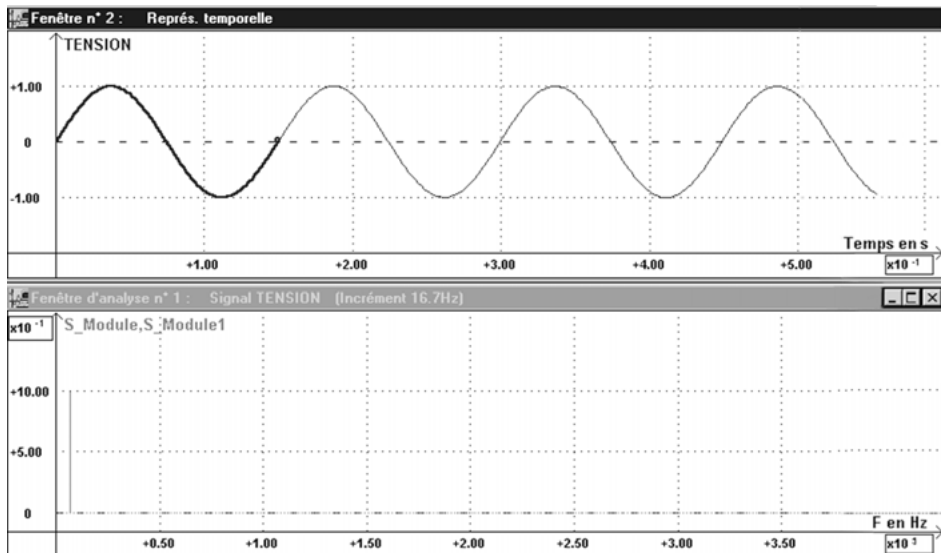


Figure 2.21 – Analyse de Fourier sur un signal sinusoïdal.

La décomposition d'un signal sinusoïdal montre la présence unique dans le spectre ci-dessus du fondamental à 50 Hz (figure 2.21). Il n'y a donc pas de présence d'harmoniques pour un signal purement sinusoïdal.

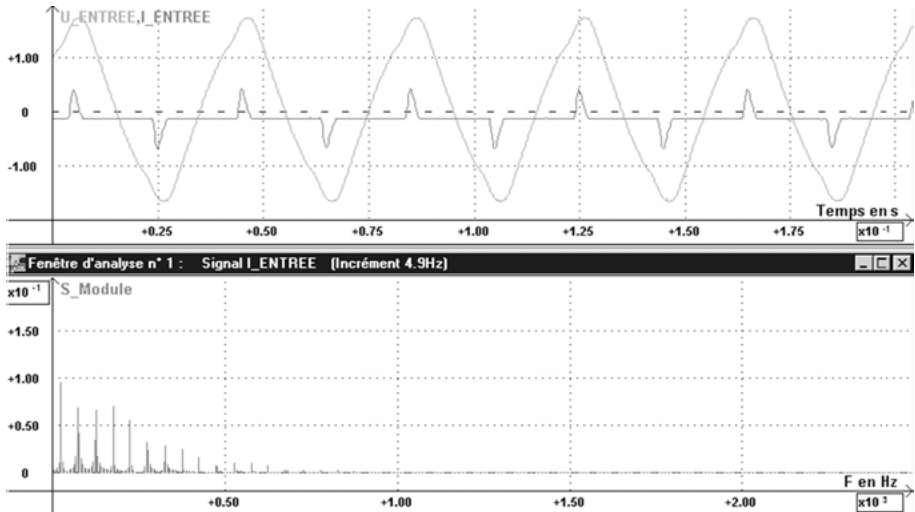


Figure 2.22 – Analyse de Fourier sur un signal déformé.

La décomposition d'un signal déformé montre la présence d'harmoniques dans le spectre précédent issu d'une alimentation à découpage d'un équipement informatique (figure 2.22).

Cette décomposition a été rendue possible grâce à l'utilisation de la fonction mathématique d'un logiciel d'acquisition et de traitement du signal.

3 • LES EFFETS NÉFASTES DE LA POLLUTION HARMONIQUE

3.1 Les perturbations observées sur les équipements et installations électriques

Comme nous l'avons précisé précédemment, la circulation des courants harmoniques va contribuer :

- à l'augmentation des pertes par effet Joule dans les conducteurs électriques,
- à la diminution du facteur de puissance de l'installation,
- au vieillissement prématuré des équipements raccordés sur l'installation électrique en diminuant leur durée de vie.

On notera de ce fait, le surcoût au niveau de la facturation d'électricité que peut entraîner la génération des harmoniques sur une installation électrique du fait de la diminution du facteur de puissance de celle-ci.

D'une façon générale, les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance, suivant la loi d'Ohm, à des tensions harmoniques, qui vont s'ajouter, ou se déduire, de la tension fondamentale générée par le réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale et de plus cette tension est commune à tous les autres récepteurs du réseau.

La pollution alors présente sur le réseau de distribution est préjudiciable pour le bon fonctionnement de tous les récepteurs raccordés sur ce même réseau (figure 3.1).

La norme fixe les valeurs de tensions harmoniques à ne pas dépasser pour assurer le fonctionnement correct des récepteurs.

Dans le cadre de la fourniture d'électricité, les taux de tensions harmoniques ne doivent pas dépasser les valeurs précisées dans le tableau suivant. Ces valeurs représentent des taux individuels calculés par rapport au fondamental à 50 Hz, sachant que le taux global d'harmonique en tension ne doit pas dépasser 8 % dans une installation de distribution basse tension. Les valeurs de taux d'harmonique individuel sont données dans le tableau 3.1 suivant.

Nous aurons l'occasion d'aborder l'aspect normatif de manière plus développée dans le chapitre 4 : Les enjeux de la distribution électrique. Nous nous contenterons, ici, de retenir le taux global d'harmonique maximal en tension admissible à 8 %. Au-delà de cette valeur, des dysfonctionnements se manifestent auprès des équipements présents sur le réseau électrique.

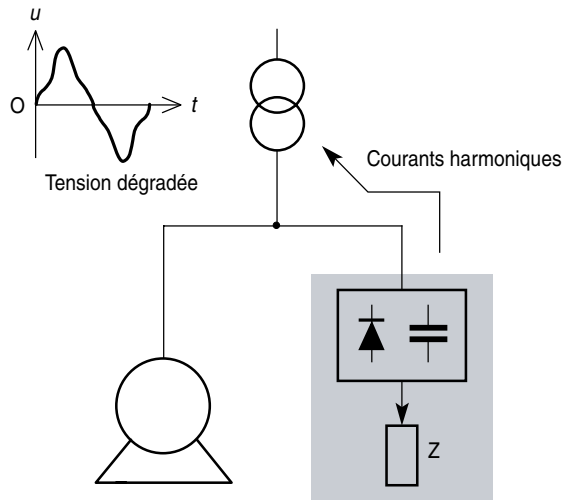


Figure 3.1 – Charge déformante générant des courants harmoniques sur le réseau électrique.

Tableau 3.1 – Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles.

Rang de l'harmonique	Taux en %
3	5
5	6
7	5
9	1,5
11	3,5
13	3
15	0,3
17	2
19*	1,5
21**	0,2

* Concerne aussi les harmoniques de rang impair, non multiples de 3.

** Concerne aussi les harmoniques de rang impair multiples de 3.

Un récapitulatif des effets produits sur certains équipements est proposé dans le tableau 3.2 suivant.

Tableau 3.2 – Types de perturbations observées dans le cas de pollution harmonique sur le réseau électrique.

Équipements perturbés	Type de perturbation
Machines tournantes	Échauffements supplémentaires. Couples pulsatoires entraînant une perte de stabilité mécanique des moteurs. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires. Risques de saturation si harmoniques paires.
Câbles	Pertes ohmiques (notamment câble du neutre dans les réseaux triphasés). Vieillessement prématuré de l'isolant (dû à l'effet Joule). Pertes diélectriques supplémentaires. Corrosion des câbles aluminium si composantes paire et continue. Effet de peau.
Micro-ordinateurs	Dysfonctionnement (couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques).
Électronique industrielle	Défauts de fonctionnement liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Dispositifs de communication	Interférences.
Dispositifs de télécommande Relais de protection Fusibles Disjoncteurs thermiques Disjoncteurs à maxima	Fonctionnement et déclenchement intempestifs.
Condensateurs de puissance	Échauffement, vieillissement
Compteurs d'énergie	Erreurs de mesure

On peut considérer que les perturbations provoquées par les harmoniques se manifestent de deux façons sur les appareils et les équipements électriques :

- **les effets instantanés**, dus à la déformation de l'onde et aux phénomènes de résonance, concernent les déclenchements intempestifs de disjoncteurs et de relais d'automatisme, la destruction de matériels (condensateurs par exemple) ou encore la perturbation des dispositifs de régulation ; mais c'est aussi la diminution du facteur de puissance de l'installation.
- **les effets à long terme** qui génèrent des échauffements dans les condensateurs et les conducteurs et provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou

encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et dans les transformateurs. Les problèmes rencontrés sont essentiellement de nature thermique et affectent alors la durée de vie des équipements concernés.

3.2 Les origines des harmoniques de tension

À l'origine, ce sont les récepteurs non linéaires qui appellent des courants déformés, sources de courants harmoniques. Les courants harmoniques circulant dans les conducteurs et les appareillages électriques rencontrent donc des impédances propres à ces composants et, suivant la loi d'Ohm, engendrent des tensions harmoniques. La valeur de chaque tension harmonique, pour les différents rangs harmoniques existants, dépendra :

- de l'amplitude du courant harmonique à l'origine,
- de l'impédance rencontrée pour le rang considéré.

Une tension harmonique U_h est donc régie par la loi d'Ohm telle que le décrivent la relation et la figure suivante (figure 3.2).

Avec :

- z : impédance de la source,
- Z : impédance de la charge.

$$U_h = Z \times i_h$$

- U_h : tension harmonique,
- i_h : courant harmonique,
- Z_h : impédance au rang harmonique considéré.

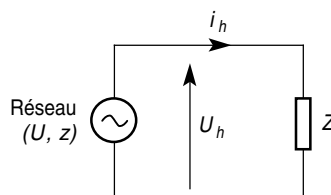


Figure 3.2 – La création des tensions harmoniques.

La pollution harmonique, dans une installation électrique, est moindre lorsque l'équipement pollueur est de puissance faible par rapport à la puissance disponible sur le réseau considéré. Le courant déformé appelé par la charge, présente dans ce cas, une amplitude faible et rencontre une impédance faible (impédances de source et de ligne). Le produit courant-impédance (loi d'Ohm) donne alors naissance à une tension harmonique pouvant ainsi être considérée comme négligeable et n'affectant pas l'onde sinusoïdale de tension du réseau (ceci peut être vrai pour les différents rangs harmoniques existants et dans les hypothèses d'amplitude de courant et d'impédance faibles).

C'est l'accumulation de charges déformantes, produisant des courants harmoniques importants sur un réseau électrique, qui conduira à un niveau de pollution jugé inquiétant. Ceci est d'autant plus vrai si les impédances présentées par la source (transformateur, groupes électrogènes, etc.) et par les conducteurs de ligne sont élevées.

Il apparaît que deux types de mesures interviendront pour effectuer l'analyse harmonique d'une installation électrique :

- la mesure des tensions harmoniques,
- la mesure des courants harmoniques.

En effet, afin de quantifier une installation électrique, en terme de pollution harmonique, c'est le taux harmonique en tension qui sera relevé aux bornes du secondaire du transformateur de distribution, pour évaluer si la pollution est présente ou non sur l'installation considérée.

D'autre part, c'est la mesure des courants harmoniques qui permettra de déterminer quelle est ou quelles sont la (les) source(s) perturbatrice(s) sur un réseau électrique. La mesure des courants harmoniques apparaît donc comme la solution adaptée dès lors qu'il s'agit de détecter et de localiser des sources d'harmoniques et d'établir un diagnostic sur les nuisances ainsi créées (figure 3.3).

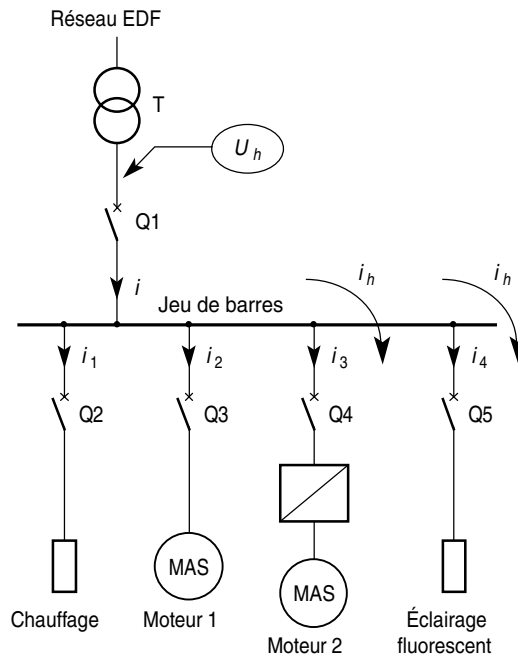


Figure 3.3 – L'identification des courants (i_h) et des tensions harmoniques (U_h).

La mesure des harmoniques est l'objet du chapitre 6 : Savoir effectuer les mesures et les interpréter.

3.3 Principaux phénomènes rencontrés

3.3.1 Les phénomènes de résonance

Les phénomènes de résonance proviennent de la présence d'éléments capacitifs et inductifs sur le réseau d'alimentation électrique (impédance de ligne et de la source, capacité de relèvement du facteur de puissance), générant ainsi des amplitudes élevées sur certains rangs harmoniques (rangs 5 et 7 par exemple). Nous décrirons des cas concrets, liés aux phénomènes de résonance, dans la suite de ce chapitre.

Lorsque les courants harmoniques ont une fréquence correspondant à la fréquence de résonance des circuits LC existants, il peut en résulter une augmentation de la tension harmonique et ceci en raison de l'impédance élevée pour ce rang harmonique. La tension harmonique voit alors sa valeur augmenter suivant la loi d'Ohm, affectant ainsi la tension du réseau d'alimentation électrique.

Nous évoquerons le traitement de ces phénomènes de résonance dans le chapitre 5 : Les remèdes.

3.3.2 Les échauffements dans les conducteurs et équipements électriques

Les conducteurs électriques véhiculent les courants harmoniques qui produisent par effet Joule un échauffement des conducteurs au même titre que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuant pas au transfert de la puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation.

Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang élevé des harmoniques en présence dans le signal déformé (figure 3.4).

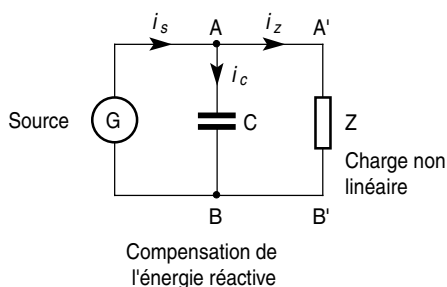


Figure 3.4 – Les condensateurs sont bien souvent victimes des courants harmoniques.

La charge Z crée des courants harmoniques qui circuleront d'autant plus facilement par le condensateur C que leur rang sera élevé (l'impédance du condensateur diminuant avec la fréquence). Le condensateur subit un échauffement excessif qui risque de conduire à sa destruction ou la fusion du fusible de protection généralement placé en série.

3.3.3 Les facteurs de crêtes élevés

Les déclenchements intempestifs des dispositifs magnétiques des disjoncteurs pouvant se produire, notamment dans le domaine des installations tertiaires comprenant un parc de matériel informatique important, sont bien souvent dus aux problèmes de pollution harmonique.

En effet, les disjoncteurs assurant la protection des installations électriques comprenant des matériels informatiques voient leur seuil de sensibilité atteint lors des pointes de courant engendrées par des signaux déformés ayant des facteurs de crête importants (figure 3.5).

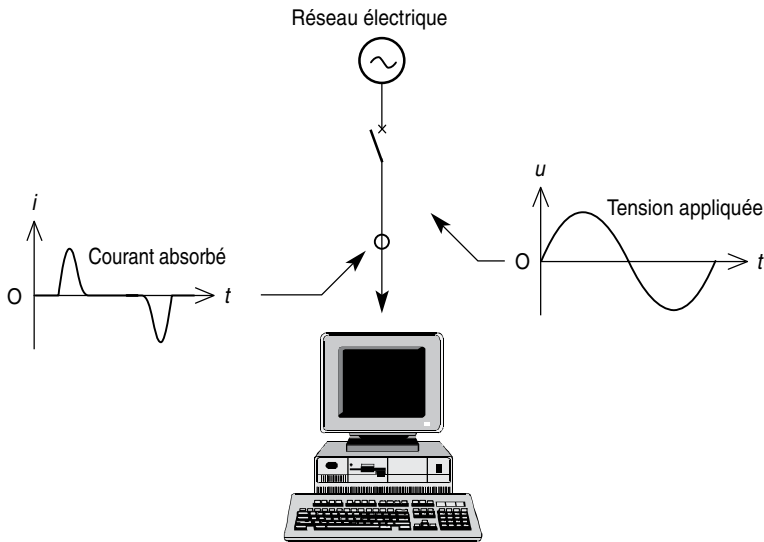


Figure 3.5 – facteurs de crête élevés liés aux charges déformantes.

L'exemple suivant met en évidence ce phénomène. L'installation électrique issue de la figure 3.5 met en œuvre plusieurs postes micro-ordinateurs dont les relevés de courant sont reportés à droite du signal de la figure 3.6.

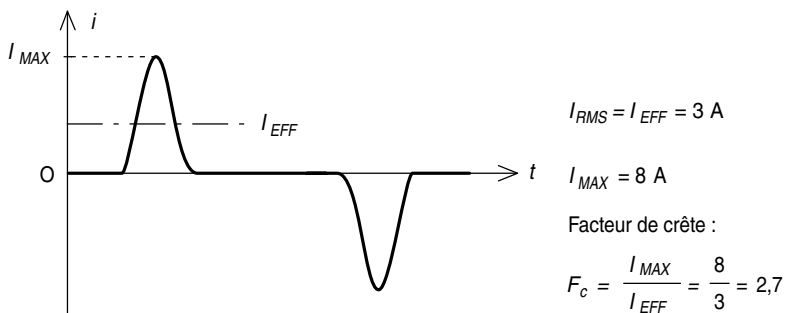


Figure 3.6 – Courant appelé par un ensemble de postes informatiques.

La valeur du facteur de crête traduit bien l'allure d'un signal fortement déformé : 2,7 !

Lorsque la courbe de sensibilité choisie au niveau d'un disjoncteur magnéto-thermique est très sensible, l'ouverture de ce dernier risque de se produire de manière intempestive pénalisant ainsi le fonctionnement des équipements informatiques et ceci en raison de la valeur de crête élevée due au signal déformé.

L'exemple présenté ci-après en est la représentation. Dans celui-ci, nous allons être amenés à adapter la courbe de sensibilité du dispositif de protection (disjoncteur) afin d'éviter le déclenchement intempestif du dispositif magnétique du disjoncteur de protection. Cette application est fréquente pour les installations équipées principalement de matériels informatiques.

Rappelons avant tout, le principe des zones de fonctionnement du disjoncteur magnéto-thermique au travers de la figure 3.7 et de ses commentaires associés.

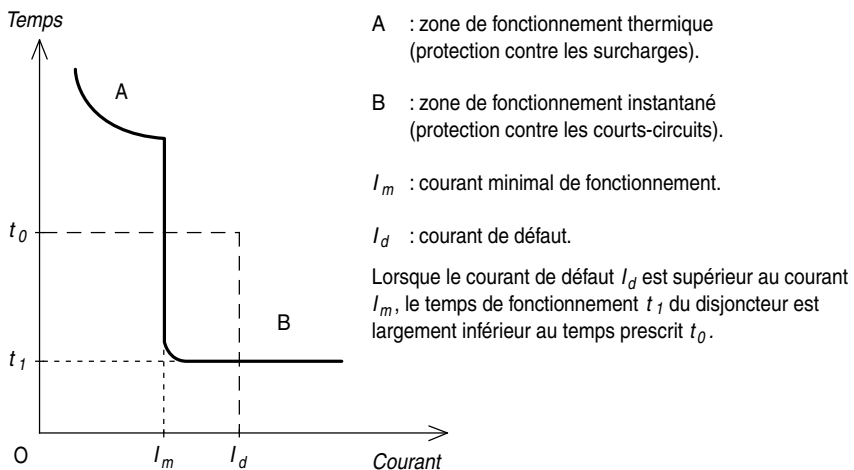


Figure 3.7 – Les zones de fonctionnement du disjoncteur magnéto-thermique.

Une installation, similaire à celle évoquée au travers de la figure 3.5, comporte essentiellement des équipements informatiques absorbant un courant efficace nominal d'environ 6 A. Celle-ci est l'objet de nombreux déclenchements intempestifs du disjoncteur protégeant le matériel informatique et met en cause la disponibilité de l'énergie électrique sur cette installation. Le facteur de crête relevé sur l'installation en service, à l'aide d'une pince ampéremétrique est de 3,8, traduisant ainsi la présence d'un courant déformé. La valeur crête du signal courant peut donc atteindre dans ce cas environ 22,8 A ! En effet le facteur de crête se calculant de la façon suivante :

$$F_c = \frac{I_{\text{MAX}}}{I_{\text{EFF}}} = \frac{22,8}{6} = 3,8$$

Le disjoncteur utilisé pour assurer la protection du matériel en question est de type DPN-B-6A. La courbe de déclenchement est fournie à la figure 3.8.

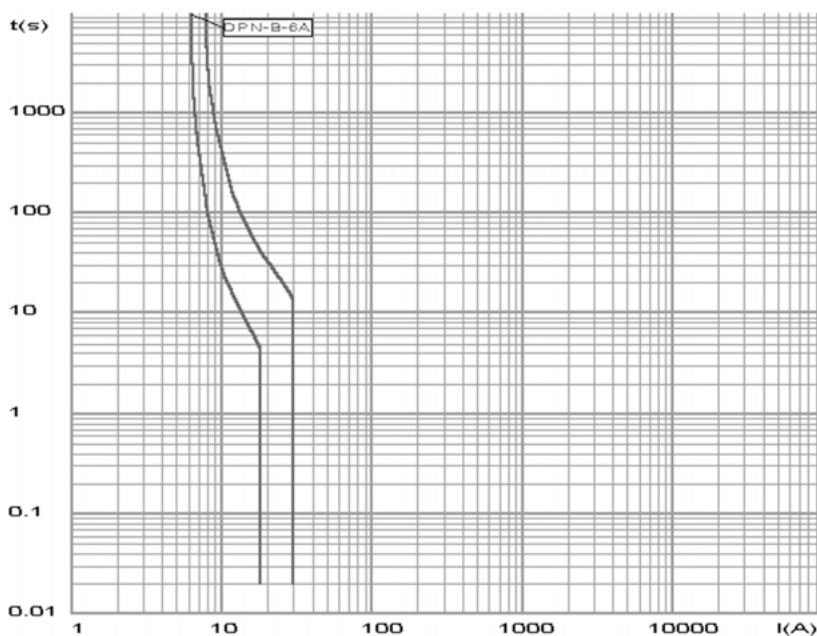


Figure 3.8 – Zone de déclenchement du disjoncteur DPN-B-6A.

On constate sur la courbe précédente que le dispositif instantané peut réagir à partir d'un courant avoisinant 18 A. On comprend aisément les dysfonctionnements occasionnés de par cette sensibilité du disjoncteur de protection malgré un choix de calibre adapté.

La solution consiste donc à remplacer ce disjoncteur par un équivalent du point de vue du calibre, mais en choisissant une courbe de sensibilité moins sensible que précédemment, c'est-à-dire une courbe C (figure 3.9).

À présent, le disjoncteur, tout en étant correctement calibré, répond mieux aux exigences de l'installation électrique en ne présentant pas une sensibilité trop accrue. Le courant minimal de déclenchement du dispositif magnétique, dans la zone instantanée, se situe en effet à partir de 30 A.

Aujourd'hui, les appareils de protection tels que les disjoncteurs à déclencheur électronique sont conçus pour mesurer et contrôler la valeur efficace réelle du signal courant et sont donc recommandés pour réaliser la protection des installations comprenant des matériels et équipements informatiques.

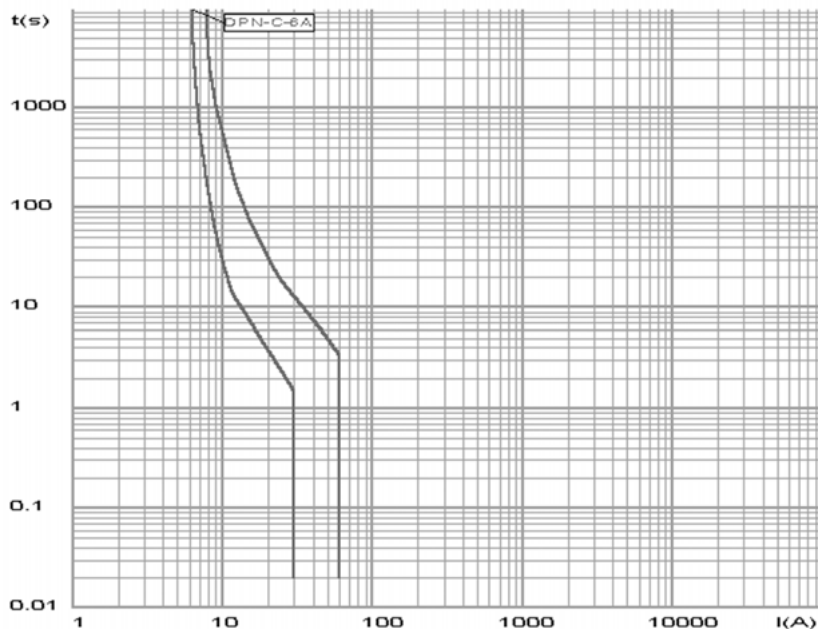


Figure 3.9 – Zone de déclenchement du disjoncteur DPN-C-6A.

3.3.4 Les effets dans le conducteur neutre

En régime sinusoïdal, dans le cas d'un système triphasé équilibré, tant du point de vue de la source que des récepteurs eux-mêmes, la somme vectorielle des courants s'annule au point neutre et conduit ainsi à ne pas retrouver de circulation de courant dans le conducteur neutre. La norme autorise alors un sous-dimensionnement du conducteur neutre vis-à-vis des phases afin de réaliser une économie de cuivre.

Le signal déformé issu d'une charge non linéaire comprend plusieurs composantes harmoniques de fréquences multiples. Si l'on s'intéresse à la somme des harmoniques de rang multiple de trois pour les trois phases : rang 3, rang 9, etc. on s'aperçoit que cette somme ne donne pas lieu à une annulation d'un courant dans le conducteur neutre.

La construction graphique, fournie à la figure 3.10 permet de le vérifier aisément. Les courants harmoniques de rang multiple de trois à partir des trois phases vont s'additionner et donner naissance dans le conducteur neutre à la circulation d'un courant. Ce sont essentiellement, les harmoniques de rang 3 qui sont prédominants dans ce cas (les harmoniques de rang 9, 27, etc. sont négligeables en général devant l'harmonique de rang 3). La fréquence du courant mesuré dans le conducteur neutre est de 150 Hertz, ce qui correspond bien à l'harmonique de rang 3. La valeur efficace de l'intensité de ce courant de neutre est tout simplement égale à la somme arithmétique des trois courants harmoniques de rang 3 pour chacune des phases. Ceci est valable toujours dans le cas d'un système équilibré.

Dans certains cas, on peut constater la circulation d'un courant dans le conducteur neutre supérieur au courant nominal circulant dans les conducteurs de phase et à une fréquence différente de 50 Hz. Dans le cas présent, la fréquence est de 150 Hz.

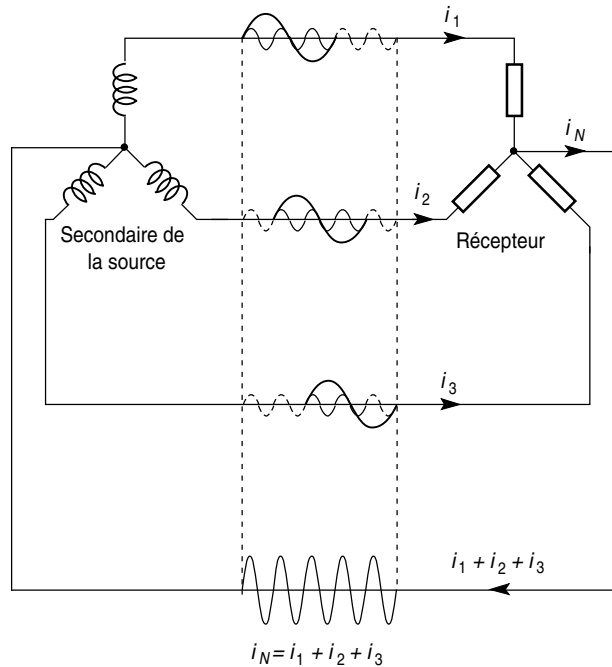


Figure 3.10 – Effets des harmoniques dans le conducteur neutre.

■ Une application issue d'un parc informatique

Un exemple de mesures réalisées sur une installation électrique permet d'apprécier l'influence des courants harmoniques vis-à-vis du conducteur neutre. Ces mesures ont été conduites sur une installation comportant un ensemble de postes informatiques répartis uniformément sur les trois phases du réseau de distribution électrique. Les mesures de courant effectuées dans un conducteur de phase sont fournies dans le tableau 3.3 suivant et permettent d'obtenir l'allure du signal représenté à la figure 3.11.

Tableau 3.3 – Mesures effectuées dans le conducteur de phase.

Rang harmonique	Valeur efficace (A)	Taux harmonique individuel (%)
I_1	2	100
I_3	1,7	85
I_5	1,2	60

Tableau 3.3 – Mesures effectuées dans le conducteur de phase. (Suite)

Rang harmonique	Valeur efficace (A)	Taux harmonique individuel (%)
I_7	0,62	31
I_9	0,18	9
I_{11}	0,2	10

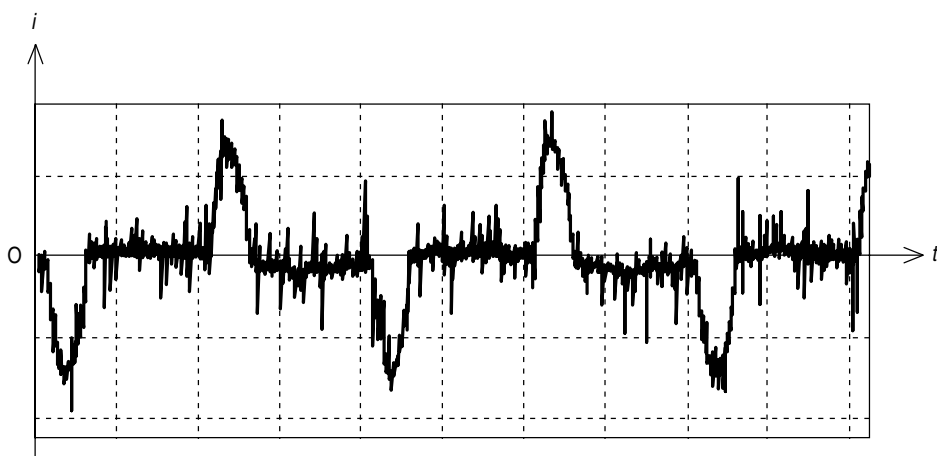


Figure 3.11 – Allure du courant dans un conducteur de phase.

D'autre part, les mesures effectuées à l'aide d'une pince harmonique dans un conducteur de phase ont permis de préciser les critères suivants :

- $I_{rms} = 3$ A,
- $THD = 115$ %,
- $F_c = 2,4$,
- $I_{peak} = 7,5$ A.

De même, les mesures dans le conducteur neutre ont aussi permis de relever les valeurs suivantes :

- $I_{rms} = 5,7$ A,
- $f = 150$ Hertz.

L'allure du signal relevé dans le conducteur neutre est reportée à la figure 3.12.

On peut constater que le courant dans le conducteur neutre est bien supérieur en amplitude au courant dans le conducteur d'une phase (les données à comparer sont en gras dans le texte précédent).

D'autre part, la mesure corrobore le calcul qu'il est possible de développer concernant la valeur efficace du courant dans le conducteur neutre :

$$I_N = 3 \times I_3 + 3 \times I_9 = 3 \times 1,7 + 3 \times 0,18 = 5,64 \text{ A}$$

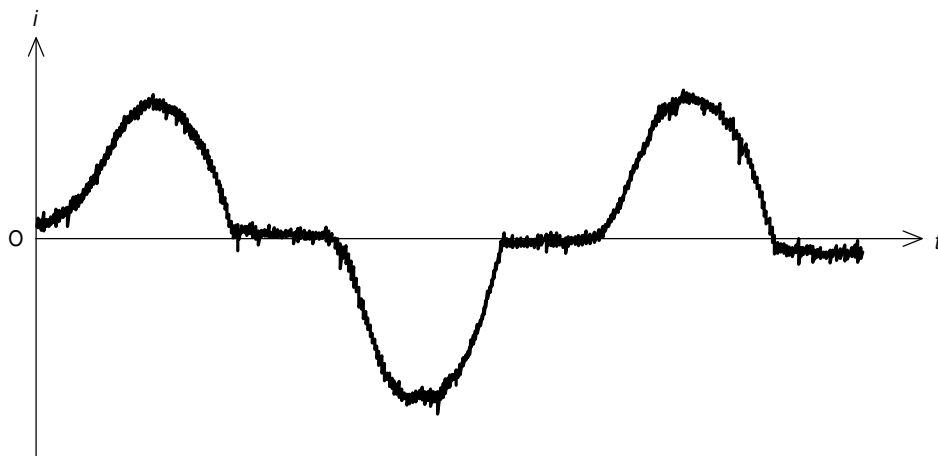


Figure 3.12 – Allure du courant dans le conducteur neutre.

La présence d'un signal dans le conducteur de neutre à la fréquence de 150 Hz justifie bien l'importance de l'harmonique 3 dans celui-ci. D'autre part, le calcul précédent confirme la place des harmoniques de rang multiple de trois dans le conducteur de neutre.

■ Une application issue d'un onduleur en fonctionnement

L'exemple suivant est tiré d'une affaire d'expertise sur un site industriel et concerne l'alimentation de dispositifs informatiques par l'intermédiaire de deux onduleurs, couplés en parallèle, d'une puissance unitaire de 100 kVA. Cet ensemble est alimenté par le réseau à partir d'un transformateur HT/BT de 630 kVA et peut être secouru par un groupe électrogène de 400 kVA. Un filtre anti-harmonique a été installé en amont de chaque onduleur afin de réduire la réinjection de courants harmoniques sur le réseau.

Néanmoins, les relevés effectués en aval des onduleurs font apparaître un taux de courants harmoniques très élevé et ceci en présence de charges déformantes alimentées par ces onduleurs. La décomposition du courant total par rang multiple de 50 Hz met en évidence la présence des harmoniques de rang 3 et 5.

Les répercussions dans le conducteur neutre se traduisent par :

- un courant efficace dans ce conducteur de 10 A,
- un courant harmonique de rang 3 de 89 A,
- un courant harmonique de rang 5 de 6 A,
- un courant harmonique de rang 7 de 6 A,
- un courant harmonique de rang 9 de 34 A,
- un courant harmonique de rang 11 de 2 A,
- un courant harmonique de rang 13 de 4 A.

On notera l'importance des rangs multiples de trois, d'une part devant les autres valeurs harmoniques, d'autre part devant la valeur du fondamental de 10 A. L'allure du courant dans le neutre en rapport avec la tension est donnée à la figure 3.13.

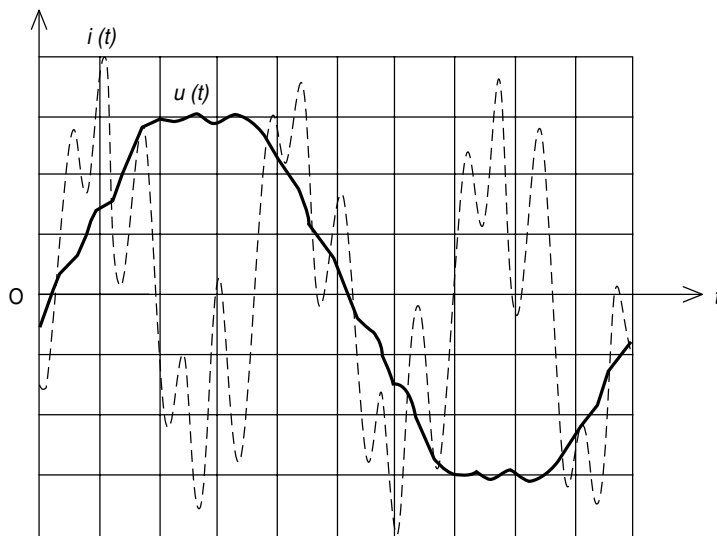


Figure 3.13 – Tension simple et courant dans le conducteur neutre.

Il est intéressant de remarquer sur la figure 3.13, la fréquence triple du courant dans le conducteur neutre à 150 Hz vis-à-vis de la fréquence de la tension d'alimentation à 50 Hz.

3.4 Cas concrets de pollution harmonique sur des sites industriels et tertiaires

Afin de mettre en évidence les effets néfastes de la pollution harmonique sur des sites industriels et tertiaires, nous vous proposons de découvrir quelques phénomènes observés au travers des cas concrets pris en exemples dans la suite de ce chapitre.

3.4.1 Équipements informatiques associés aux onduleurs d'un ensemble tertiaire

L'alimentation électrique des systèmes informatiques d'un organisme bancaire de la région parisienne est assurée par un dispositif d'alimentation de sécurité constitué de trois groupes d'onduleurs :

- un onduleur unitaire de 60 kVA – 50 Hz alimente une partie du système informatique,
- deux onduleurs de 120 kVA – 60 Hz et couplés en parallèle alimentent des machines informatiques fonctionnant en régime de 60 Hz (ces deux onduleurs sont redondants),
- deux onduleurs de 300 kVA – 50 Hz couplés en parallèle avec une cellule normal/secours automatique assurant l'alimentation du reste des équipements informatiques (ces deux onduleurs sont également redondants et très peu chargés).

Une extension des systèmes informatiques sur la tranche 60 Hz est envisagée par les gestionnaires de l'organisme bancaire et a donné lieu à une expertise par des spécialistes de l'analyse harmonique.

L'augmentation de puissance envisagée pour cette installation se situe à environ 30 kW et permettrait de pourvoir à l'alimentation électrique de nouveaux serveurs informatiques nécessaires pour l'activité de cet organisme bancaire. Avant de se faire et pour s'assurer de la faisabilité de cette opération, des mesures électriques ont été effectuées en aval des deux onduleurs de 120 kVA – 60 Hz (voir figure 3.14).

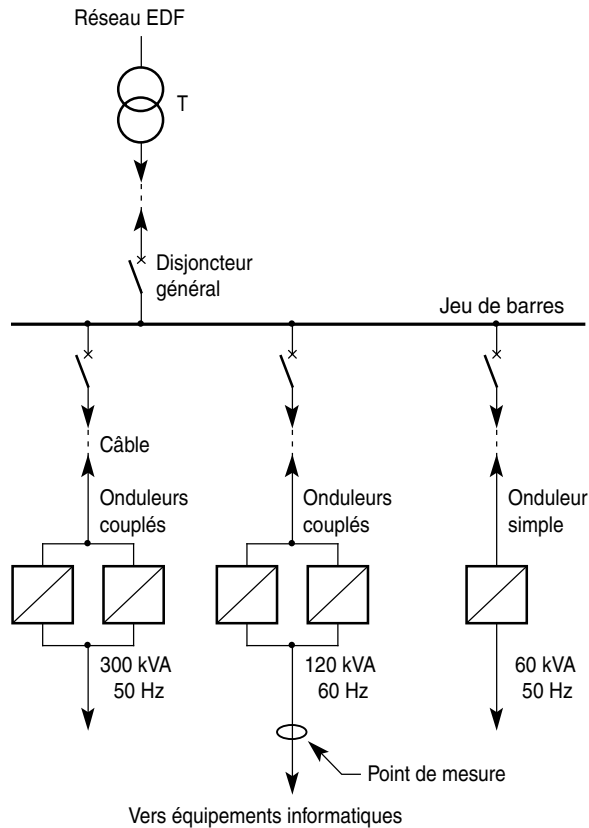


Figure 3.14 – Schéma unifilaire de l'installation électrique.

■ Première série de mesures

Une étude préliminaire est nécessaire afin de statuer sur la possibilité d'une extension de puissance d'alimentation sans pour autant compromettre le bon fonctionnement des équipements informatiques déjà présents ainsi que pour le matériel futur à mettre en œuvre.

Les relevés obtenus sont présentés dans le tableau 3.4

Tableau 3.4 – Relevés fournis par l'analyseur d'harmoniques.

Taux individuel de distorsion en courant		Taux individuel de distorsion en tension simple		Taux individuel de distorsion en tension composée	
Fonda-mental	60 Hz – 176 A 1 0 %	Fonda-mental	60 Hz – 122,7 V 1 0 %	Fonda-mental	60 Hz – 212,5 V 1 0 %
Har 04	240 Hz – 002 A 1, 3 %	Har 04		Har 04	
Har 05	300 Hz – 057 A 32, 5 %	Har 05	300 Hz – 12,2 V 9, 4 %	Har 05	300 Hz – 21,1 V 9, 2 %
Har 06	360 Hz – 001 A 0, 7 %	Har 06		Har 06	
Har 07	420 Hz – 012 A 7, 3 %	Har 07	420 Hz – 01,4 V 1, 4 %	Har 07	420 Hz – 02,5 V 1, 7 %
Har 11	660 Hz – 006 A 3, 4 %	Har 11	660 Hz – 002 V 1, 2 %	Har 11	660 Hz – 03,5 V 1, 4 %
Har 13	780 Hz – 003 A 1, 0 %	Har 13	780 Hz – 01,6 V 1, 0 %	Har 13	780 Hz – 02,8 V 1, 1 %

En raison de la symétrie du signal déformé, on constate bien évidemment des valeurs relativement faibles, voire négligeables des harmoniques de rangs pairs.

Remarque

Les mesures ont été réalisées à partir d'un analyseur d'harmonique ensuite couplé à une imprimante. Aujourd'hui, ce type de mesures peut s'effectuer à l'aide d'un équipement de mesure relativement accessible, tant au niveau de la praticité que de l'acquisition en terme d'investissement financier. Les outils de mesures correspondants sont des pinces harmoniques portables dont on développera l'usage dans le chapitre 6 : Savoir effectuer les mesures et les interpréter.

La décomposition du courant total appelé par les équipements informatiques en service sur le réseau fait apparaître des taux élevés de courants harmoniques (tableau 3.4) notamment pour le rang 5 : 32 % ! Ces courants harmoniques sont générés par les machines informatiques.

Les allures des signaux courant/tension mesurées sont fournies grâce à la figure 3.15.

La décomposition en tension fait apparaître aussi des taux individuels harmoniques non négligeables. La tension d'alimentation qui en résulte présente alors un taux global de distorsion proche de 10 %. Sachant que le taux raisonnable, afin d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble des récepteurs devra être de 8 %. Au-delà, des dysfonctionnements peuvent se produire.

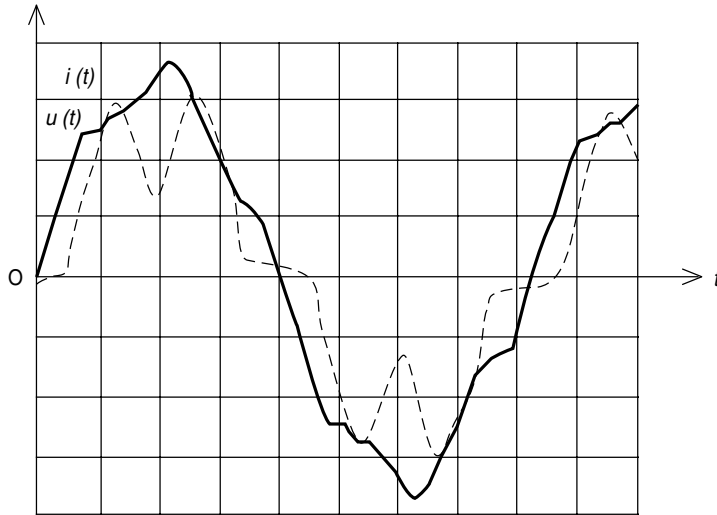


Figure 3.15 – Allures des signaux courant/tension en aval des onduleurs.

■ Deuxième série de mesures

Une autre série de mesures a été réalisée avec un seul onduleur en fonctionnement. Les équipements informatiques devant être opérationnels quelle que soit la situation, il est nécessaire de vérifier la qualité de l'alimentation électrique dans le cas où un seul onduleur est en service suite à une panne sur l'autre onduleur.

Dans cette configuration, le taux global de distorsion harmonique en tension est passé de 10 à 16 %. L'impédance de source étant plus grande lorsqu'un seul onduleur est en service, les tensions harmoniques résultantes sont augmentées en conséquence, conduisant ainsi à une plus forte dégradation de la tension d'alimentation.

Dans ces conditions extrêmes de fonctionnement pour les équipements informatiques, il n'est pas envisageable d'augmenter la charge des onduleurs 60 Hz sans une remédiation de type filtrage, car le taux de distorsion en tension est alarmant et risquerait de porter préjudice au bon fonctionnement des matériels alimentés sur ce réseau.

■ Conclusion

Les mesures de puissance apparente laissent la possibilité d'ajouter 30 kW de charge sur les deux onduleurs de 60 Hz, mais l'analyse approfondie des courants harmoniques et de la qualité de tension qui en résulte, proscrit l'extension envisagée.

Une étude permettant de procéder à la mise en œuvre d'un filtrage harmonique des équipements pollueurs devrait pouvoir améliorer cette situation. De telle sorte à satisfaire l'utilisateur afin de procéder à l'extension de puissance dans des conditions réalistes en termes de qualité du réseau électrique.

Des exemples de filtrage seront passés en revue dans le chapitre concernant les remèdes. Les cas présentés ici mettent l'accent sur les phénomènes néfastes observés sur des sites industriels et tertiaires.

3.4.2 Entreprise Michelin

Le cas suivant a fait l'objet d'une diffusion écrite par EDF Industrie dans le cadre d'exemple de distorsion harmonique sur site industriel.

Située à Joué-lès-Tours, l'usine Michelin est alimentée en 90 kV et consomme de façon stable 11 MW de puissance active et 4 à 5 Mvar de puissance réactive. Les variateurs électroniques de vitesse y sont fortement présents et représentent 40 % de la puissance totale.

■ Position du problème

À la fin des années 1980, pour s'adapter à la tarification de l'énergie réactive selon le respect de la $\text{tg}\varphi = 0,4$, l'usine Michelin rénove et renforce sa compensation en mettant en œuvre des condensateurs neufs associés à une régulation varométrique.

À la suite de ces modifications techniques, il est observé sur le site de l'usine Michelin les conséquences suivantes :

- des destructions de condensateurs,
- un feu sur une batterie avec selfs de protection,
- des déclenchements intempestifs des condensateurs.

La première action a été le remplacement de la régulation varométrique par une commande chronométrique : l'amélioration est observée mais reste insuffisante.

■ La génération d'harmonique

Nous savons à présent que le distributeur d'énergie électrique fourni à ses clients des tensions sinusoïdales à la fréquence de 50 Hz que certains équipements électroniques perturbateurs peuvent déformer. Une tension ainsi déformée est la superposition d'une sinusoïde à des fréquences multiples entières de 50 Hz que l'on appelle harmoniques.

L'usine Michelin est équipée de nombreux moteurs à courant continu pilotés par de l'électronique de puissance. Cette électronique de puissance génère principalement des courants harmoniques de rang 5 (250 Hz), 7 (350 Hz), 11 (550 Hz) et 13 (650 Hz).

On rappelle ci-dessous les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques (tableau 3.5) qui sont définis dans les normes CEI 61000-2-2 et EN 50160 ainsi que dans le contrat Émeraude de fourniture de l'énergie électrique d'Électricité de France (voir le chapitre 4 pour plus de détails).

Tableau 3.5 – Valeurs correspondant au critère harmonique.

Tensions harmoniques	Seuils admissibles en % (tension < 50 kV)	Seuils admissibles en % (tension > 50 kV)
Taux global	8	3
Rang 3	5	2
Rang 5	6	2
Rang 7	5	2
Rang 11	3,5	1,5
Rang 13	3	1,5

■ L'étude harmonique

Réalisée par l'entreprise Séchaud et Metz (département Qualité électricité) en 1991, l'étude harmonique met en évidence l'effet des variateurs électroniques de vitesse en présence de la résonance de différents réseaux de l'usine de par leurs condensateurs.

En augmentant le nombre des condensateurs (c'est-à-dire la puissance correspondante de compensation), les fréquences de résonance sont descendues autour de 250 et 350 Hz en correspondance avec les premières fréquences d'émission de la vitesse électronique variable.

Telle que nous l'avons évoqué précédemment dans ce chapitre, l'impédance résultante liée aux phénomènes de résonance s'est vue augmentée pour les rangs 5 et 7 (250 et 350 Hz). La conséquence en a été :

- des taux de distorsion harmonique en tension anormalement élevés, en particulier sur les deux machines d'extrusion : 12 % pour un critère de compatibilité normalisé à 8 % (voir tableau 3.5 précédent).
- des surcharges excessives en courants harmoniques dans les condensateurs.

L'étude harmonique réalisée montre que la compensation de 2,9 Mvar sur le réseau 3 kV de l'usine Michelin est très défavorable du fait de sa résonance à 250 Hz. En effet, les condensateurs placés sur le 3 kV, associés aux transformateurs 15 kV/3 kV, forment une résonance et absorbent les courants harmoniques du niveau 15 kV.

L'installation de filtres absorbant les courants harmoniques de rang 5 sur les équipements polluants permettrait d'installer des condensateurs non protégés par des selfs jusqu'à 2,1 Mvar en 15 kV et 2,9 Mvar en 3 kV.

L'ajout de batteries de condensateurs sur le réseau 15 kV fait croître les tensions harmoniques pour les rangs 5 et 7.

Aussi, les recommandations de l'étude harmonique sont les suivantes :

- La compensation d'énergie réactive au niveau 3 kV doit être limitée à 2,9 Mvar pour éviter d'amplifier les harmoniques du réseau 15 kV.

- Les courants harmoniques des deux machines d'extrusion doivent être filtrés à la source en basse tension. Le filtre pourrait avoir une puissance de l'ordre de 300 kvar et être accordé au rang 5 (principal rang harmonique gênant sur le réseau moyenne tension de l'usine).

■ La solution préconisée

L'évolution souhaitable vers une solution de compensation, limitée en condensateur et complétée par un filtrage anti-harmonique sur certains réseaux, ne pourra se réaliser que progressivement (le chapitre 5 développe les notions de filtrage de ce type). La première étape concerne donc les deux machines d'extrusion.

■ La mise en œuvre de la solution envisagée

L'entreprise Michelin confie en 1994 l'étude à la société Gec-Alsthom. Cette étude consiste à la réalisation et à la mise en service des deux filtres anti-harmoniques de 166 kvar accordés sur le rang 5 dans les TGBT (400 V) des deux machines d'extrusion.

Un filtre anti-harmonique accordé à 250 Hz a été installé sur chacune de ces machines.

L'objectif de ce filtre est de compenser à la source les courants harmoniques des variateurs électroniques de vitesse des procédés pour obtenir :

- un taux de distorsion harmonique en tension acceptable sur ces postes,
- une nette réduction de la réinjection vers l'amont de l'installation,
- un complément de compensation de l'énergie réactive.

Les deux ensembles de filtrage de rang 5 installés ont permis de ramener la distorsion harmonique aux niveaux suivants. Ces équipements sont présentés dans la photo de la figure 3.16.

- 5,5 % et 3,7 % sur les réseaux basses tensions, taux à présent bien inférieurs au critère,
- 2,5 % sur le réseau 15 kV, taux amélioré et nettement inférieur au critère,
- 0,7 % sur le 90 kV, non influencé par les filtres.

Le relevé des taux globaux d'harmonique obtenus par la mesure est fourni dans le tableau 3.6 suivant.

Tableau 3.6 – Taux global d'harmonique obtenu.

Mesures du taux global en tension	Sans filtrage (%)	Avec filtrage (%)	Critère de compatibilité (%)
TGBT boudineuse	10,1	5,5	8
TGBT plastifieur	7,3	3,7	8
Réseau 15 kV	3,7	2,5	8
Réseau 90 kV	0,7	0,5	3

En conséquence, un filtrage supplémentaire sur le rang 7 ne présente pas d'intérêt pour réduire les tensions harmoniques qui sont maintenant satisfaisantes.

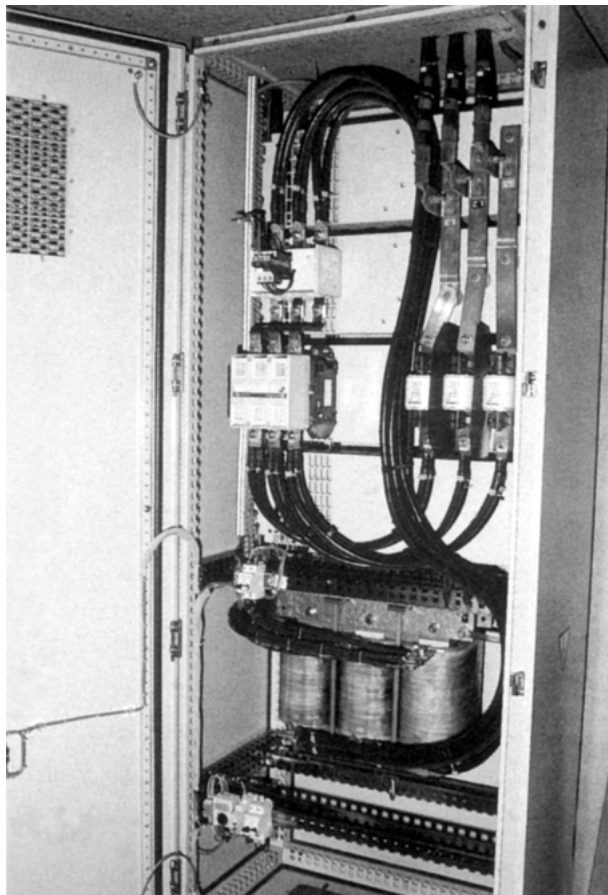


Figure 3.16 – Photo des selfs du filtre anti-harmonique.

3.4.3 Le stade du Mans

L'exemple du stade Léon-Bollée au Mans est un cas éloquent de perturbations harmoniques, représentatif des effets instantanés liés à la résonance. Ce cas a été l'objet d'une analyse effectuée par le groupe Qualité de la tension de la direction des études et recherche d'EDF suite à la demande de l'agence Entreprise du Mans concernant un problème de perturbations harmoniques sur le dispositif d'éclairage du stade de football de la ville.

L'exemple présenté ici fait état seulement de la problématique liée aux perturbations harmoniques. La direction des études et recherche d'EDF a réalisé ensuite une modélisation en régime harmonique de l'installation conduisant à déterminer le type de solutions préconisées à mettre en œuvre. Cette partie est développée plus en détail dans l'ouvrage au travers du chapitre 7.

Cette étude à aussi fait l'objet d'une publication dans le numéro de septembre 1995 de la revue de l'éclairage LUX.

■ Caractéristiques électriques et mesures effectuées sur site

Au cours d'un match de football, le disjoncteur protégeant le transformateur d'alimentation coupe le circuit électrique du stade. Le stade est plongé dans l'obscurité. Il n'est pas possible de réenclencher le disjoncteur car la sonde de température du transformateur reste en défaut. Une première expertise montre qu'une surintensité est à l'origine de la coupure. Cette surintensité est principalement provoquée par des courants harmoniques. En effet, il est relevé un taux de distorsion harmonique supérieur à 65 % sur le courant et supérieur à 8 % sur la tension.

L'alimentation électrique du stade est réalisée à partir d'un transformateur triphasé HTA/BT (20 kV/400 V) présentant une puissance de 400 kVA et une tension de court-circuit de 4 %.

Le circuit électrique se divise en deux branches principales : éclairage du stade et annexes (éclairages des locaux, alimentation des friteuses...). L'éclairage du terrain de football est assuré par 76 projecteurs de 2 kW montés sur 4 pylônes répartis sur le périmètre du stade. Chaque projecteur de type Mazda « Aquila » branché entre phases (400 V) comprend :

- une lampe aux halogénures métalliques MHN-TD de 2 kW,
- un amorceur parallèle,
- un ballast,
- deux condensateurs de compensation de 30 micro-Farad chacun branchés en parallèle sur le réseau.

La puissance active absorbée par un projecteur est de 2,1 kW (100 W de pertes ballast). La puissance totale absorbée par les 76 projecteurs est donc égale à 160 kW. Sans perturbation, le courant par phase devrait être de 250 A.

Les premières expertises sur le site ont révélé une surintensité puisque les courants en ligne atteignent, pour une tension moyenne de 389 V les valeurs suivantes :

$$I_1 = 294,4 \text{ A}$$

$$I_2 = 279 \text{ A}$$

$$I_3 = 257,6 \text{ A}$$

$$\text{Soit } I_{\text{moyen}} = 277 \text{ A}$$

La puissance active mesurée est de 140 kW, la puissance apparente de 187 kVA (les 76 projecteurs sont en service). Le faible facteur de puissance (0,75) n'est pas dû à un mauvais $\cos \varphi$ (0,90), mais à la distorsion des courants (figure 3.17).

La dégradation de la tension alors obtenue est fournie à la figure 3.18.

Une mesure de courants harmoniques en laboratoire des projecteurs montre que ceux-ci sont conformes à la norme IEC 555-2 et donc ne sont pas en cause pour expliquer la surintensité enregistrée.

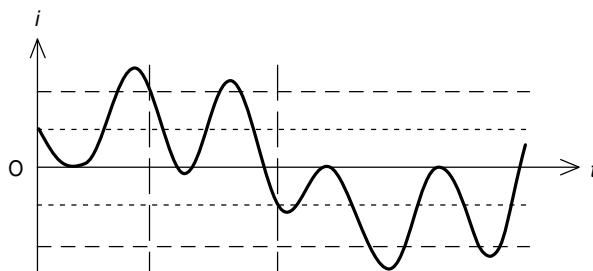


Figure 3.17 – Allure du courant dans une phase.

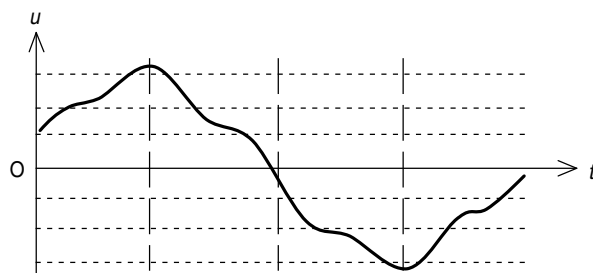


Figure 3.18 – Allure de la tension entre phases.

Cependant, les tensions et les courants harmoniques mesurés au niveau du poste de livraison en fonction de la charge : 1, 2, 3 ou 4 pylônes mis en service font apparaître une fréquence de résonance proche de 250 Hz (harmonique de rang 5) entre la self du transformateur d'alimentation du stade et les capacités de compensation des projecteurs :

- entre 31 et 66,5 % de taux harmonique en courant par rapport au fondamental pour le rang 5,
- entre 4 et 8 % de taux harmonique en tension par rapport au fondamental pour le rang 5.

Le taux global de distorsion (THD) atteint 67 % sur le courant pour une charge capacitive de 76×60 micro-Farad répartie sur les trois phases.

■ Cause et remède

Aussi, il s'avère que les courants harmoniques ont été responsables de l'incident survenu sur le stade du Mans. Ces courants harmoniques étaient dus à l'apparition d'une fréquence de résonance proche de 250 Hz entre le transformateur alimentant le stade et les capacités de compensation des projecteurs. Une modélisation de l'installation suivie d'une simulation réalisée par le groupe Qualité de la tension d'EDF-DER a permis de mettre en évidence les différents paramètres sur lesquels il était possible d'agir pour diminuer le phénomène.

La solution retenue consiste à installer des selfs en série sur les différentes branches du circuit des projecteurs. Le résultat prévu par la modélisation a été vérifié sur le

terrain. Les taux d'harmoniques sur les courants en ligne ont été réduits de 66,7 % à 9,6 %, ce qui conduit à une réduction du courant efficace de 20 %.

Il est à noter que l'utilisation des selfs entraîne une diminution de la tension aux bornes des projecteurs et, par conséquent, une puissance réduite dissipée dans les lampes. Cet inconvénient peut évidemment être facilement corrigé, soit par une augmentation de la tension au transformateur d'alimentation, soit par un réglage au niveau du ballast des projecteurs.

4 • LES ENJEUX DE LA QUALITÉ

4.1 Qualité de l'énergie électrique : critères et définitions

La qualité de l'énergie électrique sur les réseaux est fondamentale pour l'utilisateur final, notamment lorsqu'il met en œuvre des process de fabrication dits sensibles. Elle doit constituer alors un engagement réciproque entre le distributeur d'énergie et l'exploitant (voir le contrat Émeraude en tarif vert au sein de ce chapitre).

La libéralisation récente du marché de l'énergie a conduit les industriels à de nouvelles exigences en termes de contrôle de la qualité de leurs réseaux électriques. Face à la crainte d'une dégradation du produit électricité, les utilisateurs expriment le souhait de pouvoir contrôler et donc mesurer ainsi la qualité de l'énergie qui leur est fournie.

La qualité de l'énergie électrique se mesure donc sur les réseaux et passe par l'observation des perturbations pouvant affecter ces réseaux électriques grâce à un panel d'équipement de mesure, tel qui vous est présenté dans le chapitre 6 de cet ouvrage.

Pour l'heure, il est indispensable de préciser quels sont les critères définissant la qualité de l'énergie des réseaux électriques, ces réseaux pouvant être le siège de perturbations de natures diverses (creux de tension, flicker, harmoniques...).

On caractérise ainsi l'aptitude d'un appareil ou d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.

Le concept de compatibilité électromagnétique (CEM) classe ces perturbations selon deux groupes :

- basses fréquences (< 9 kHz) ;
- hautes fréquences (> 9 kHz).

Ces phénomènes sont caractérisés selon leur mode de transmission : on parlera de perturbations conduites et de perturbations rayonnées.

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la basse fréquence dont la transmission est conduite.

Les phénomènes observés, et pouvant affecter le bon fonctionnement des réseaux électriques, sont nombreux : creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence,

déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter-harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs.

Ils peuvent être regroupés en quatre catégories selon qu'ils affectent :

- l'amplitude,
- la forme d'onde,
- la fréquence,
- la symétrie du système triphasé.

4.1.1 Les perturbations du réseau de distribution basse tension

Les problèmes liés à la qualité de l'énergie électrique impliquent l'ensemble des partenaires du distributeur d'énergie à l'utilisateur. Ils concernent les imperfections de la tension électrique ayant pour origine les perturbations électriques. Ces perturbations électriques font l'objet d'une norme européenne EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique) et traitant des caractéristiques du produit électricité en basse et moyenne tension.

La plage de variation nominale de la tension réseau est généralement fixée par le distributeur d'énergie à $\pm 10\%$ de la tension composée, conformément à la norme EN 50160. Toute variation de la tension au-delà du seuil haut ou bas de la plage nominale de la tension, génère une perturbation de la qualité de l'électricité distribuée.

■ Origines des perturbations de la qualité de l'énergie électrique

Les perturbations de la qualité de l'énergie électrique distribuée sont principalement provoquées par les phénomènes suivants :

- Creux de tension et coupures
- Surtensions
- Variations rapides de la tension – Flicker
- Déséquilibre du système triphasé de tensions
- Harmoniques et inter-harmoniques

□ Creux de tension et coupures

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension en dessous du seuil inférieur de la plage nominale comme l'illustre la figure 4.1. Ils sont provoqués par l'apparition de défauts sur le réseau électrique.

La coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Une coupure est dite brève si elle n'excède pas trois minutes, sa profondeur est supérieure à 90 %. Au-delà de trois minutes, la coupure est dite longue.

Au cours d'une année :

- le nombre de creux de tensions peut aller de quelques dizaines à un millier.
- Le nombre de coupures brèves peut varier de quelques dizaines à plusieurs centaines, et n'excède pas une durée d'une seconde (bien souvent, les coupures brèves sont provoquées lors de la manœuvre des automatismes liés aux réseaux de distribution).

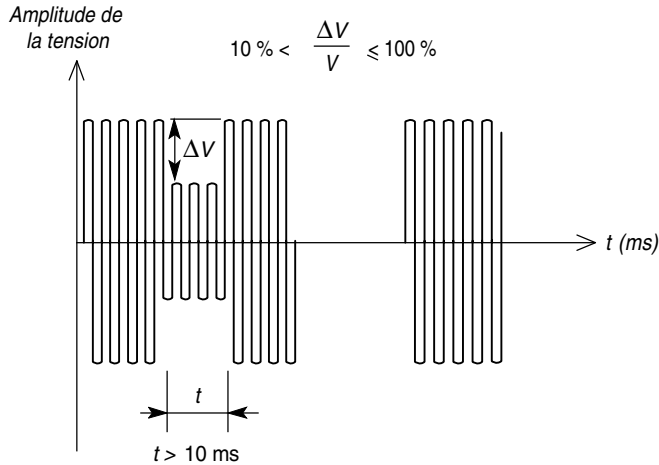


Figure 4.1 – Creux de tensions.

Lorsque la variation de tension apparaît en tant que défaut sur le réseau électrique, il est difficile de mesurer exactement la durée et l'amplitude de celle-ci. Particulièrement quand celle-ci intervient sur les trois phases avec des durées et des amplitudes différentes.

L'utilisation d'analyseurs de réseaux triphasés s'avère indispensable afin d'analyser les trois phases simultanément (voir le chapitre 6 à ce sujet).

□ Surtensions temporaires ou transitoires

Les surtensions de durée inférieure à 10 ms sont appelées surtensions transitoires. Les analyseurs de réseaux triphasés, de part leur technologie numérique permettront ici aussi de mesurer les surtensions transitoires en offrant une fréquence d'échantillonnage élevée. Les surtensions sont mesurées en amplitude et en durée lorsque le seuil supérieur de la plage nominale est dépassé comme illustré par la figure 4.2.

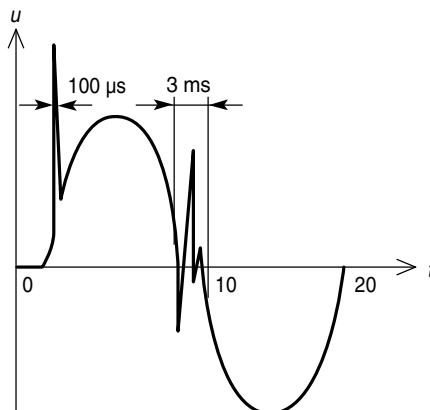


Figure 4.2 – Surtensions.

La norme EN 50160 fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation :

- réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser $1,7 U_n$;
- réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser $2 U_n$.

Les surtensions apparaissent selon deux modes :

- mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre)
- mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase – phase ou phase – neutre)

Les surtensions sont de trois natures :

- **Surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz)** : les surtensions à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur.
- **Surtensions de manœuvre** : les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau : mise en service de gradins de condensateur, d'une ligne à vide.
- **Surtensions atmosphériques** : les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

□ Variations rapides de la tension – Flicker

Les variations d'intensité lumineuse de l'éclairage à incandescence provoquent un papillonnement qui est ressenti comme une gêne par le système visuel humain dès que la tension varie de 1 %. Cette gêne se concrétise par des maux de tête, une irritabilité et peut même parfois déclencher des crises d'épilepsie. Ce papillonnement est mesuré par la valeur du Flicker. Le Flicker résulte d'un calcul statistique issu de la mesure des variations de tension, défini dans la norme IEC 61000-4-15.

De telles variations de la tension sont en général causées par la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareils dont la puissance absorbée varie de façon rapide : fours à arcs, machine à souder, moteurs à démarrages fréquents, imprimantes laser, micro-ondes, système d'air conditionné, etc.

La figure 4.3 illustre une représentation de variation rapide de tension.

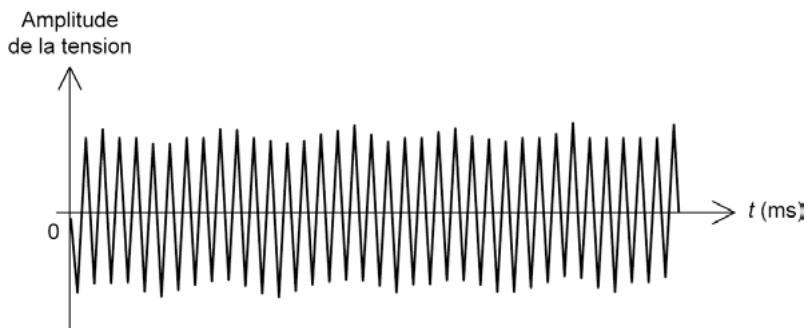


Figure 4.3 – Variation rapide de tension.

□ Déséquilibre de système triphasé de tensions

Le déséquilibre de récepteurs électriques (triphases ou monophasés) alimentés par un réseau triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou lorsqu'elles sont déphasées de 120° les unes par rapport aux autres, comme illustré par la figure 4.4.

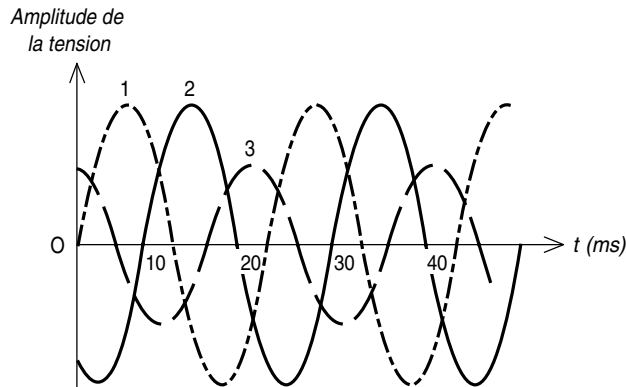


Figure 4.4 – Déséquilibre de systèmes triphasés.

Ces déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courant non équilibré par les impédances de réseau et ont pour conséquence des couples de freinage parasites et des échauffements qui conduisent à une dégradation prématurée des équipements tels que des moteurs ou toute autre machine asynchrone.

La norme EN 50160 fixe le taux de déséquilibre inverse admissible à 2 % sur les valeurs efficaces calculées sur dix minutes pour 95 % du temps d'une semaine. Il est généralement convenu qu'un déséquilibre inférieur à 2 % ne suscite aucun problème.

La quantification du phénomène fait appel à une méthode dite des composantes symétriques directes, inverse ou homopolaires.

□ Harmoniques et inter-harmoniques

Les phénomènes de perturbations harmoniques sont décrits dans les trois premiers chapitres, et les différentes techniques à mettre en œuvre pour leur trouver des solutions sont décrites dans le chapitre 5.

Pour résumer, les harmoniques sont des perturbations introduites dans le réseau par des charges non linéaires provenant d'équipements intégrant des redresseurs et des électroniques de découpage.

Ces configurations de réseau et la concentration de tels équipements polluants déforment les courants et créent des variations de tension sur le réseau de distribution, comme illustré en figure 4.5.

Les harmoniques consistent donc en une superposition sur l'onde fondamentale de 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de la fréquence fondamentale.

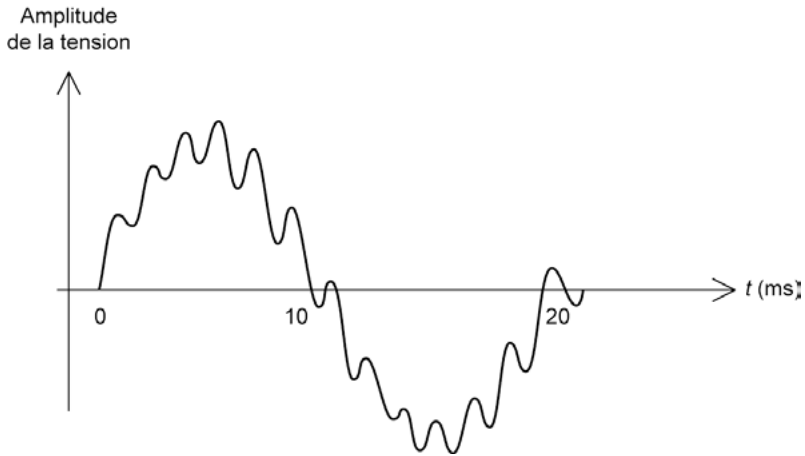


Figure 4.5 – Effets d'une pollution harmonique.

Lorsque la fréquence superposée n'est pas multiple de la fréquence fondamentale, on parle d'inter-harmonique.

Les conséquences des harmoniques peuvent être instantanées ou à long terme.

Les effets instantanés se manifestent par des troubles fonctionnels de synchronisation ou de commutation, des disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie, voir même la destruction d'équipements (condensateurs, disjoncteur).

Les effets à long terme se manifestent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

Les normes EN 50160, CEI 61000-2-2 et CEI 61000-2-12 fixent respectivement :

- les niveaux de tensions harmoniques jusqu'au 25^e rang et indique que le taux global de distorsion harmonique ne doit pas dépasser 8 %.
- Les niveaux maxima rang par rang pour les réseaux basse tension.
- Les niveaux maxima rang par rang pour les réseaux moyenne tension.

4.1.2 Le cas particulier des perturbations harmoniques

En ce qui concerne les perturbations harmoniques, celles-ci doivent être repositionnées dans un contexte global qui est celui de la compatibilité électromagnétique (CEM).

On réalise, bien souvent, une distinction entre les perturbations harmoniques dites « *perturbations basses fréquences* » et les perturbations électromagnétiques dites « *perturbations hautes fréquences* ».

Il faut savoir que la limitation des perturbations harmoniques s'inscrit dans le cadre des règles de compatibilité électromagnétique. Néanmoins, il est établi une frontière entre : les perturbations harmoniques (sujet qui nous intéresse dans cet ouvrage) sur les réseaux électriques et les perturbations électromagnétiques affectant les équipements électroniques en général. Ces perturbations impliquent des règles d'installations et de mise en œuvre précises :

- **Les perturbations harmoniques « basses fréquences »** – Celles-ci se manifestent au sein de l'installation électrique sous une forme de type *Conduite* (transmises dans les câbles).
- **Les perturbations électromagnétiques « hautes fréquences »** – Ces dernières quant à elles, vont se manifester au sein de l'installation électrique sous une forme de type *Rayonnée* (transmise par l'air).

On place la frontière de ces deux domaines connexes aux alentours de 10 kHz. Cependant, l'ensemble de ces perturbations est bien regroupé et répertorié dans le registre de la compatibilité électromagnétique. La CEM traite du courant continu jusqu'au THF (Très hautes fréquences).

4.2 Textes et normes de référence

De toute évidence, la limitation de la pollution harmonique se concrétise par un travail commun entre les deux partenaires distributeur et utilisateur tel que nous l'avons évoqué précédemment. Du côté du distributeur de l'énergie électrique, il est essentiel de fournir une qualité de l'énergie électrique avec la distorsion la plus faible possible. Du côté de l'utilisateur de cette énergie électrique, il est impératif de s'assurer que les charges polluantes identifiées ne contribuent pas à dégrader la tension du réseau de telle sorte que celle-ci soit préjudiciable pour le fonctionnement des autres récepteurs.

La limitation des courants harmoniques s'inscrit dans les règles de compatibilité électromagnétique. Les normes CEI 61000-3-2, 61000-3-4 et 61000-3-6 précisent les limites d'émission harmonique à respecter. Les limites d'émission harmonique en France sont ainsi prescrites, en tant que valeurs de courant harmonique, dans le contrat Émeraude et font référence en la matière.

4.2.1 Les normes

Il est nécessaire de savoir qu'une norme est un recueil de règles, de descriptions ou encore de méthodologies qu'un constructeur utilise comme référence afin de définir le produit qu'il fabrique et aussi pour réaliser les tests des produits élaborés.

On peut réaliser un classement selon trois types de normes concernant la Compatibilité électromagnétique (CEM) :

- **Les publications ou normes fondamentales** – Il s'agit de définir, d'une façon générale, les prescriptions relatives à la CEM (phénomènes, essais...). Celles-ci sont applicables à tous les produits et servent de boîte à outils aux comités d'élaboration des normes spécifiques. Les normes fondamentales ne sont pas harmonisées au niveau européen.
- **Les normes génériques ou européennes** – Elles définissent les exigences essentielles en termes de niveau d'émission, niveau à tenir par type d'essai. Elles utilisent les normes fondamentales ainsi que les limites définies par les normes d'émission et/ou d'immunité.
- **Les normes de produits ou de familles de produits** – Pour les produits ou les familles de produits concernés, les normes précisent les dispositions constructives,

les caractéristiques à présenter, les méthodes d'élaboration de test, les critères de performance.

Remarque

Lorsque le Cenelec souhaite élaborer une norme à son initiative, celui-ci soumet le projet de norme à la CEI qui va en assumer l'élaboration au niveau international. Généralement les EN CEI sont transposés au Cenelec moyennant de petits amendements. Les votes CEI et Cenelec sont indépendants.

Les normes CEM établies par la CEI portaient autrefois la référence CEI 1000-X-X, celles du Cenelec la référence EN 61000-X-X. À présent, et pour éviter toute confusion, les normes CEI et EN portent la même référence : la norme CEI 61000-X-X sera équivalente à la norme EN 61000-X-X.

4.2.2 Les organismes normalisateurs

On distingue les différents organismes qui élaborent les normes applicables par les installateurs et les fabricants de matériels électriques :

- **La CEI** (Commission électrotechnique internationale, siège à Genève) – Les normes s'y rattachant sont repérables par la désignation CEI.
- **Le CISPR** (Comité international spécial des perturbations radioélectriques).
- **Le Cenelec** (Comité européen de normalisation électrotechnique, siège à Bruxelles) – Ces normes sont repérables par la désignation EN.
- **La NFC** (Norme française du domaine électricité, siège à Paris) – Ces normes sont repérables par la désignation NFC.
- **L'UTE** (Union technique de l'électricité en France).

La liste non exhaustive des thèmes abordés par les normes relatives aux perturbations harmoniques est conséquente. De ce fait, nous citons seulement les principales normes dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Principales normes relatives aux harmoniques.

Partie	Références et thèmes abordés
Généralités	CEI 61000-1-1 : définitions des termes fondamentaux.
Environnement : traite de la compatibilité et de la définition du produit électrique. Nous ne donnerons ici seulement les thèmes relatifs aux harmoniques, objet de notre ouvrage.	CEI 61000-2-1 : environnement électromagnétique concernant les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation. CEI 61000-2-2 : niveaux de compatibilité concernant les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation. CEI 61000-2-4 : niveaux de compatibilité sur les réseaux industriels pour les perturbations conduites à basse fréquence. CEI 61000-2-5 : classification des environnements électromagnétiques. EN 50160 : caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution.

Tableau 4.1 – Principales normes relatives aux harmoniques. (Suite)

Partie	Références et thèmes abordés
Limites pour les émissions.	<p>CEI 61000-3-2 : limites pour les émissions de courants harmoniques dans les réseaux publics à basse tension pour les appareils de moins de 16 A par phase.</p> <p>CEI 61000-3-4 : limites pour les émissions de courants harmoniques dans les réseaux publics à basse tension pour les appareils de plus de 16 A par phase.</p> <p>CEI 61000-3-6 : évaluation des limites d'émission pour les charges déformantes raccordées aux réseaux moyenne tension et haute tension.</p>
Immunité et technique d'essai.	<p>CEI 61000-4-1 : vue d'ensemble sur les essais d'immunité. Publication fondamentale en CEM.</p> <p>CEI 61000-4-7 : guide général pour la mesure des harmoniques ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés. Guide de mesure associé à l'EN 50160.</p> <p>CEI 61000-4-13 : essais d'immunité aux harmoniques.</p> <p>CEI 61000-4-15 : phénomènes de Flicker.</p> <p>EN 50082-1 : norme générique immunité-résidentiel, commercial, industrie légère.</p>
Normes génériques*.	<p>CEI 61000-6-1 : normes génériques sur l'immunité pour les environnements résidentiels, commerciaux et de l'industrie légère.</p> <p>CEI 61000-6-2 : normes génériques, immunité pour les environnements industriels.</p> <p>CEI 61000-6-3 : normes génériques sur l'émission. Partie 1 : Résidentiel commercial et industrie légère.</p> <p>CEI 61000-6-4 : normes génériques sur l'émission. Partie 2 : Environnement industriel.</p> <p>EN 50081-1 : norme générique émission-résidentiel, commercial, industrie légère.</p> <p>EN 50081-2 : norme générique émission-environnement industriel.</p> <p>EN 50082-2 : immunité, environnement industriel.</p>

* Quand un produit n'a pas de norme spécifique en CEM (dédiée), c'est la norme générique qui s'applique. Les normes de produit sont dupliquées en cohérence avec les normes génériques. Un comité spécial veille à ce qu'aucune dérive n'ait lieu.

Remarque

Il est nécessaire de préciser la signification des termes utilisés suivants :

- *Émission*. On dit que le niveau d'émission propre à un appareil doit être suffisamment faible pour qu'il n'entraîne pas de perturbation envers les autres appareils de son proche environnement.
- *Immunité*. On dit qu'un appareil possède un degré d'immunité tel qu'il ne doit pas être perturbé par son environnement électromagnétique.

Nous savons à présent que les perturbations harmoniques s'inscrivent dans le registre de la CEM. La perturbation électromagnétique n'est autre qu'un signal électrique indésirable qui vient s'ajouter au signal utile au sein d'une installation électrique. Les harmoniques font donc partis de ces signaux indésirables et répertoriés dans les normes liées à la CEM.

4.2.2 Exploitation de la norme

Pour l'activité quotidienne des techniciens et des installateurs d'équipement électrique sur les réseaux basse tension, on s'attachera plus particulièrement, aux deux normes suivantes :

- **CEI 61000-3-2** : limites en courants harmoniques pour les appareils de moins de 16 A par phase.
- **CEI 61000-3-4** : limites d'émissions en courants harmoniques pour les appareils de plus de 16 A par phase.

En effet, celles-ci fixent les niveaux d'émission harmonique en courant pour les appareils électrodomestiques et industriels et constituent ainsi une base de référence pour comparer les valeurs efficaces relevées sur une installation électrique vis-à-vis des valeurs spécifiées par la norme.

■ Exemple concernant l'utilisation de la CEI 61000-3-2 (appareils inférieurs à 16 A par phase)

La norme CEI 61000-3-2 définit les limites en courants harmoniques pour les appareils de moins de 16 A par phase.

L'alimentation électrique des unités centrales d'un serveur informatique, dont le courant fondamental est de 11,5 A absorbe des courants harmoniques d'amplitude élevés (voir tableau 4.2 suivant).

Tableau 4.2 – Consommation d'un matériel informatique.

Rang harmonique	Intensité (en ampères)
Fondamental	11,5
Harmonique 3	3,1
Harmonique 5	1,6
Harmonique 7	0,8

Les limites en courants harmoniques des matériels informatiques sont fixées au travers des classes A et D et en fonction de la puissance absorbée par ces matériels (figure 4.6).

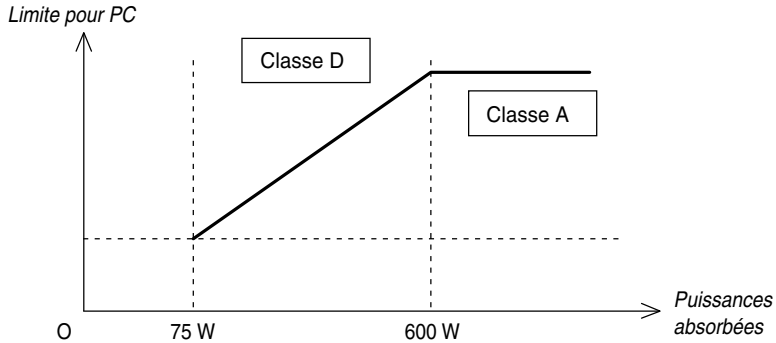


Figure 4.6 – Limites en courants harmoniques pour les PC.

Conformément à l'extrait de la norme fournie dans le tableau 4.3 suivant, l'alimentation de ce matériel informatique ne répond plus aux exigences de la réglementation et doit être retiré du marché européen. En effet, les taux individuels d'harmoniques en courant relevés sont supérieurs à ceux indiqués par la norme (les mesures ont été réalisées jusqu'au rang 7 uniquement sur ce matériel informatique).

Tableau 4.3 – Taux d'harmoniques spécifiés par la norme (CEI 61000-3-2).

Rang harmonique	Courant harmonique maximal admissible en ampères (A) Classe D
Harmoniques impaires	
3	2,3
5	1,14
7	0,77
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times \frac{15}{n}$
Harmoniques paires	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times \frac{8}{n}$

4.3 Le contrat Émeraude

Les perturbations harmoniques nuisent aux réseaux de distribution électrique basse tension en dégradant la qualité de l'onde sinusoïdale fournie par le distributeur d'énergie électrique. Avec la généralisation de la prolifération des équipements électriques polluants sur le réseau basse tension, le distributeur EDF propose à ses clients une solution contractuelle pour améliorer cette situation.

Depuis 1996, EDF a mis en place un contrat d'abonnement baptisé contrat *Émeraude*, élaboré en concertation avec les représentants des consommateurs industriels d'énergie électrique. Le contrat Émeraude a pour but d'améliorer la fourniture de l'énergie électrique en tarif vert, et établit les règles de fourniture et d'exploitation de l'énergie entre le distributeur et l'utilisateur en terme de qualité de l'énergie électrique.

C'est en quelque sorte le compromis recherché, pour obtenir un meilleur réseau de distribution électrique entre les deux entités : distributeur-utilisateur avec un objectif assigné pour chaque partenaire (figure 4.7) :

- Améliorer la qualité de l'énergie électrique distribuée.
- Abaisser la distorsion en courant des récepteurs.

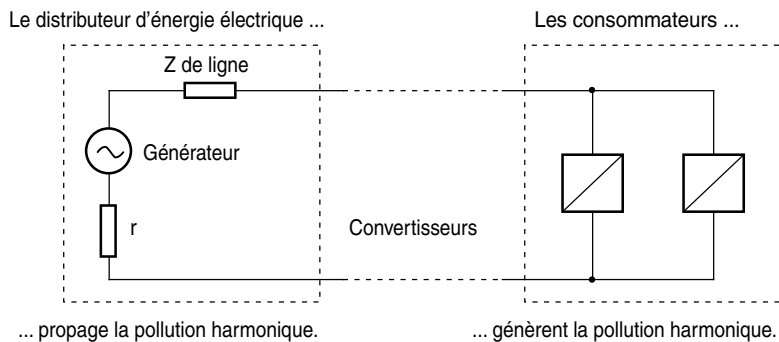


Figure 4.7 – Le dilemme pour une meilleure qualité du réseau électrique.

Dans le cadre du contrat *Émeraude*, Électricité de France, sur demande du client, s'engage à fournir à ce dernier l'énergie électrique nécessaire à l'alimentation de ses installations. En retour, le client accepte les conditions du contrat Émeraude. Ce dernier comprend un certain nombre d'articles associés à deux annexes.

Dans l'annexe numéro 2 du contrat *Émeraude*, Électricité de France dresse la liste des perturbations susceptibles d'affecter la qualité de fourniture. On peut citer les interruptions de fourniture, les fluctuations rapides et lentes de la tension, les déséquilibres de tension, la fréquence, les harmoniques et les surtensions impulsionnelles. Les différents titres du contrat évoquent ces perturbations en les définissant de manière succincte et précise aussi les modalités de mesure.

La nature des engagements d'EDF est précisée ainsi que les niveaux d'émission que le client s'engage à respecter en matière de perturbations générées par ses propres installations.

■ Les engagements respectifs du distributeur et du consommateur en matière de perturbations harmoniques

C'est le contrat *Émeraude* qui définit les engagements respectifs entre le fournisseur d'énergie électrique et l'utilisateur. Au sein de ce contrat sont précisés :

- les taux de tension harmonique que le distributeur s'engage à ne pas dépasser pendant 100 % du temps,
- les niveaux d'émission harmonique que les utilisateurs s'engagent à ne pas dépasser.

Le contrat *Émeraude*, chapitre *Performances standard du réseau*, sous chapitre 2.7 Électricité de France, précise les valeurs des taux de tensions harmoniques qui ne devraient pas dépasser les seuils donnés dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 – Taux de tensions harmoniques donnés à titre indicatif par le contrat émeraude.

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
Rang	Seuils (%)	Rang	Seuils (%)	Rang	Seuils (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15 et 21	0,5	6 à 24	0,5
13	3				
17	2				
19, 23 et 25	1,5				

Les taux de tensions harmoniques sont exprimés en pour cent de la tension de fourniture U .

Le taux global τ_g ne dépassant pas 8 % avec

$$\tau_g = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \tau_h^2}$$

D'une façon générale pour tous les types de perturbations listées dans le chapitre 2 du Contrat Émeraude, le respect par EDF des engagements décrits suppose que chaque utilisateur limite ses propres perturbations à un niveau raisonnable.

Ainsi, aux engagements d'EDF correspondent pour les abonnés des tolérances sur les niveaux harmoniques.

L'annexe numéro 2 du contrat *Émeraude*, chapitre *Conditions de raccordement et d'alimentation des clients*, sous chapitre 4.3 Électricité de France, précise la limitation des courants harmoniques injectés sur le réseau EDF.

Ces tolérances ne sont que des recommandations. Les limites fixées sont définies au prorata de la puissance souscrite par l'utilisateur.

À chaque harmonique de rang n est associé un coefficient de limitation k_n et donc une limite en ampères que l'on calcule de la manière suivante :

$$I_{hn} = k_n \times \frac{S_{\text{souscrite}}}{\sqrt{3} \times U_c}$$

où U_c est la valeur de la tension contractuelle.

Le tableau 4.5 précise la valeur de k_n en fonction du rang n de l'harmonique.

Tableau 4.5 – Valeurs du coefficient k en fonction des rangs d'harmonique ou taux d'émission harmonique limite des utilisateurs (en % du courant souscrit).

Rangs impairs	K_n (%)	Rangs pairs	K_n (%)
3	4	2	2
5 et 7	5	4	1
9	2	> 4	0,5
11 et 13	3		
> 13	2		

Les limites précédentes ne s'appliquent pas si la puissance souscrite est inférieure à 100 kVA.

■ Exemple

Un industriel ayant une puissance souscrite de 250 kVA sous 20 kV, doit limiter l'amplitude des rangs harmoniques aux valeurs calculées correspondantes.

Le courant efficace appelé sur la ligne est :

$$I_n = \frac{S_{\text{souscrite}}}{\sqrt{3} \times U_c} = \frac{250}{\sqrt{3} \times 20} = 7,22 \text{ A}$$

Pour l'harmonique 3 :

$$I_3 = k_3 \times \frac{S_{\text{souscrite}}}{\sqrt{3} \times U_c} = \frac{4 \times 7,22}{100} = 0,288 \text{ A}$$

La valeur efficace de l'harmonique 3 ne doit pas dépasser 288 mA.

Pour les harmoniques 5 et 7 :

$$I_{5,7} = k_{5,7} \times \frac{S_{\text{souscrite}}}{\sqrt{3} \times U_c} = \frac{5 \times 7,22}{100} = 0,361 \text{ A}$$

Les valeurs efficaces des harmoniques 5 et 7 ne doivent pas dépasser 361 mA. Dans le nouveau contexte de la dérégulation avec la mise en place d'un gestionnaire de réseau, le contrat Émeraude devrait être amené à évoluer notamment en ce qui concerne la détermination des seuils qui serait alors fixés par l'instance de régulation du réseau.

5 • LES TECHNIQUES DE FILTRAGE : UNE SOLUTION AUX PERTURBATIONS HARMONIQUES

Ce chapitre traite des solutions à mettre en œuvre pour pallier aux problèmes de pollution harmonique. Les solutions évoquées, dans ce chapitre, sont industrielles et pour cela nous nous appuyons sur des applications fournies par les sociétés ABB et Schneider Electric dans le cadre du filtrage d'harmoniques.

Il est important de préciser que la majorité des cas de pollution harmonique, à l'échelle industrielle, sont liés à la résonance due à la présence de condensateurs sur le réseau électrique. Bien entendu, les effets instantanés et les effets à long terme, décrits dans les précédents chapitres, sont aussi des préoccupations auxquelles il faudra s'attacher (échauffement du conducteur neutre, déclenchements intempestifs des dispositifs de protection, etc.). Les condensateurs sont souvent présents pour effectuer le relèvement du facteur de puissance d'une installation (compensation de l'énergie réactive). Pour certaines valeurs de fréquences harmoniques, ces charges capacitives peuvent entrer en résonance avec des charges inductives, et engendrer des surtensions et des surintensités destructives pour le matériel. Elles contribuent, dans ce cas, à la dégradation de la qualité de la tension du réseau électrique.

Cette préoccupation fera ainsi l'objet du premier sous chapitre dans lequel nous aborderons ces phénomènes de résonance.

Des solutions de filtrage d'harmoniques seront ensuite présentées dans ce chapitre afin de décrire les techniques mises en œuvre dans ce domaine et donneront lieu à des exemples concrets de remédiation.

5.1 Phénomènes de résonance

5.1.1 Notion d'impédance

Tel que nous l'avions évoqué dans un précédent chapitre, les tensions harmoniques, responsables de la dégradation de l'onde de tension sinusoïdale, sont proportionnelles au produit des courants harmoniques par l'impédance du réseau au nœud de l'installation considérée.

Un réseau de distribution industrielle présente en général, pour le domaine harmonique, un comportement inductif :

$$Z = \sqrt{r + X}$$

L'impédance Z d'un circuit est proportionnelle à la fréquence et se présente différemment suivant le rang harmonique (figure 5.1).

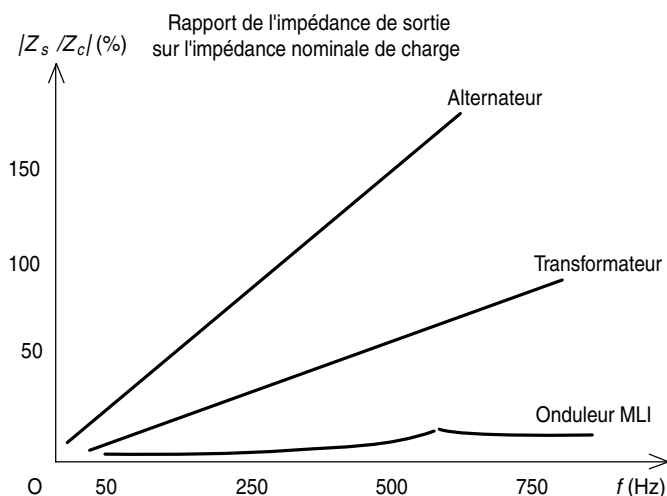


Figure 5.1 – Évolution de l'impédance en fonction de la fréquence.

On peut considérer, en première approche, que l'impédance se limite principalement à la réactance X du réseau, les résistances r étant négligeables :

$$X = L \times \omega = L \times (2 \times \pi f)$$

La réactance du circuit est dépendante de la fréquence ainsi que de l'inductance L des éléments du circuit.

La pollution harmonique générée est ainsi plus ou moins importante suivant la puissance de la charge polluuse (I_h) et est aussi fonction des caractéristiques du réseau (X_h) au nœud considéré de l'installation électrique :

$$V_h = X_h \times I_h$$

Cette pollution harmonique devra être limitée aux valeurs prescrites par la norme et qui sont précisées dans le chapitre 4 de notre ouvrage.

5.1.2 Intérêt du relèvement du facteur de puissance

L'énergie réactive appelée par un utilisateur en tarif vert sur le réseau de distribution électrique impose pour le fournisseur de l'énergie des moyens de production et de

transport plus conséquent et donc plus coûteux pour celui-ci. De ce fait, les consommateurs industriels voient leur énergie réactive facturée par le distributeur d'énergie électrique et ceci dans le but de réduire cette consommation d'énergie réactive en privilégiant la solution de compensation par l'abonné.

Dans le cadre du tarif vert, chaque mois de l'hiver tarifaire, la consommation d'énergie réactive est facturée dès lors qu'elle dépasse 40 % de la consommation d'énergie active en comptage HT. La facturation est donc effective lorsque celle-ci dépasse 40 % de l'énergie active, soit une tangente φ supérieure à 0,4 pendant les heures de pointe et les heures pleines, périodes de fortes consommations.

Dans tous les cas la compensation d'énergie réactive, apporte, indépendamment de l'allègement de la facturation pour l'abonné, une augmentation de la puissance disponible sur l'installation, une diminution des pertes ainsi qu'une réduction de la chute de tension en ligne.

L'exemple suivant met en évidence *l'intérêt d'une batterie de condensateurs* couplée sur une installation électrique en vue d'un relèvement du facteur de puissance.

L'installation en exemple est alimentée par un transformateur 20 kV/400 V d'une puissance apparente de 630 kVA.

- La puissance consommée par les équipements industriels est de 490 kW avec un facteur de puissance médiocre de 0,72.
- La puissance apparente absorbée est de :

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{490}{0,72} = 680 \text{ kVA}$$

Le transformateur est en surcharge et ne bénéficie plus de puissance disponible.

Le courant en ligne est relativement important :

$$I = \frac{P}{U \times \sqrt{3} \times \cos \varphi} = \frac{490}{400 \times \sqrt{3} \times 0,72} = 982 \text{ A}$$

La compensation du facteur de puissance est envisagée à 0,9.

Dans ce cas, la puissance apparente obtenue sera de :

$$S' = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{490}{0,9} = 544 \text{ kVA}$$

Le courant appelé en ligne est alors réduit à la valeur suivante :

$$I = \frac{P}{U \times \sqrt{3} \times \cos \varphi} = \frac{490}{400 \times \sqrt{3} \times 0,9} = 786 \text{ A}$$

Soit l'énergie réactive fournie par la batterie de condensateurs :

$$S_c = S - S' = 680 - 544 = 136 \text{ kVA}$$

Le courant en ligne est réduit dans ce cas de 20 % autorisant ainsi une diminution des pertes par effet Joule en ligne et assure, au transformateur, un fonctionnement dans des conditions normales.

Tel que nous venons de le décrire, l'utilisation des condensateurs va trouver tout son intérêt pour assurer le relèvement du cosinus φ au sein d'une installation électrique présentant un cosinus φ médiocre, soit une tangente φ inférieure à 0,4.

5.1.3 Risque de résonance en présence de condensateurs

Une installation électrique est constituée d'éléments impédants tels que la source, les câbles ainsi que les diverses charges. Une représentation schématisée est donnée à la figure 5.2.

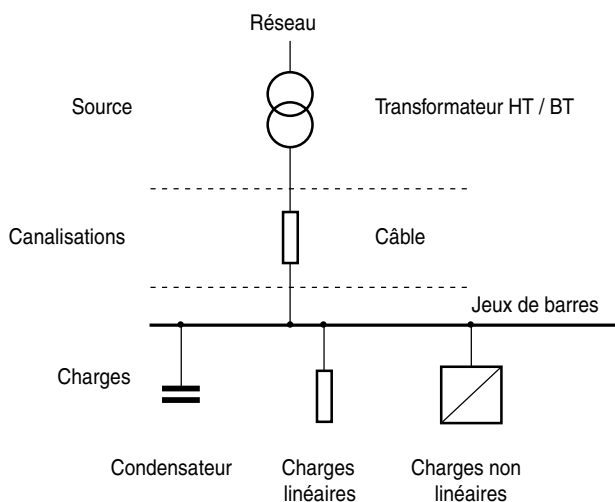


Figure 5.2 – Représentation schématisée d'une installation électrique.

Les éléments impédants d'une installation électrique traditionnelle comportent alors des composants résistifs, inductifs et capacitifs.

D'autre part, nous savons que l'impédance d'une inductance L est d'autant plus grande que la fréquence est élevée :

$$Z_L = L \times \omega = L \times 2 \times \pi \times f$$

et que l'impédance d'un condensateur C est d'autant plus petite que la fréquence est élevée :

$$Z_C = \frac{1}{C \times \omega} = \frac{1}{C \times 2 \times \pi \times f}$$

Aussi, dans un circuit intégrant notamment des éléments inductifs et capacitifs, sachant que l'impédance d'une inductance augmente avec la fréquence et que ceci

est l'inverse pour une capacité, il y aura pour une fréquence donnée (f_r) égalité de la valeur absolue de ces deux fréquences :

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

On parle ainsi de *fréquence de résonance* f_r .

Le phénomène de résonance, traduisant l'expression suivante : $L \times C \times \omega^2 = 1$, implique que les impédances capacitives et inductives ont ainsi des effets qui, en se combinant, donnent alors naissance à des valeurs extrêmes. Ces valeurs, selon la nature du schéma (résonance parallèle ou résonance série), peuvent être très fortes ou très faibles avec les répercussions correspondantes sur les courants et tensions.

Les surintensités et les surtensions qui en résultent peuvent occasionner de graves dommages sur l'installation (destruction de condensateurs par exemple).

Aussi, lorsqu'il y a présence de condensateurs de relèvement de facteur de puissance, le phénomène peut être observé et nécessite de s'intéresser à ce risque potentiel de résonance.

Le phénomène de résonance se réalise avec un ou des éléments inductifs en parallèle avec un condensateur (figure 5.2) mais aussi dans le cas d'un schéma de type série (figure 5.3) entre le condensateur et l'inductance constituée par la ligne et la source (sur le schéma : transformateur).

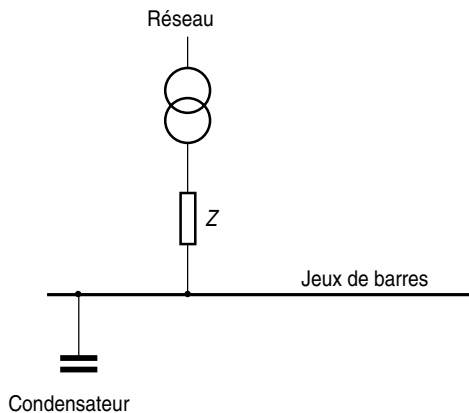


Figure 5.3 – Schéma série d'une installation.

Nous allons donc nous intéresser à ces deux types de schémas, parallèle et série, pouvant donner lieu au phénomène de résonance.

■ La résonance parallèle

L'analyse harmonique dans le cas de la résonance parallèle peut être réalisée à partir du schéma présenté à la figure 5.2. Considérons l'impédance harmonique Z de ce circuit au niveau du jeu de barres.

L'expression simplifiée de l'impédance globale, obtenue à partir des éléments L et C en parallèle, s'exprime par la relation suivante :

$$Z = \frac{L \times \omega_r}{1 - L \times C \omega_r^2}$$

À la résonance, $L \times C \times \omega^2 = 1$ ce qui équivaut à l'expression :

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

Le dénominateur $1 - L \times C \times \omega^2$ est égal à zéro, l'impédance Z tend alors vers une valeur infinie ; en pratique vers une valeur maximale de l'impédance et ceci à une fréquence f_r (figure 5.4).

Le résultat conduit à des surtensions harmoniques importantes :

$$(V_h = Z_h \times I_h)$$

Ces tensions présentes au niveau du jeu de barres contribuent à la déformation de l'onde de tension sinusoïdale (augmentation du taux de distorsion harmonique en tension) et peuvent nuire au fonctionnement des équipements raccordés sur ce même réseau électrique.

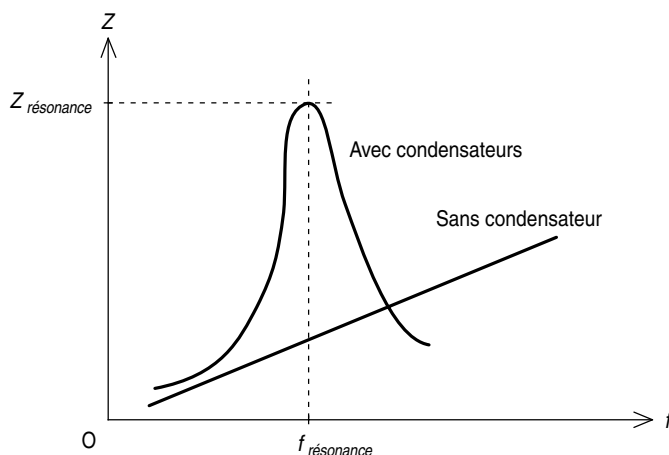


Figure 5.4 – Impédance harmonique vue du jeu de barres – résonance parallèle.

■ La résonance série

L'analyse harmonique dans le cas de la résonance série doit être considérée en amont du transformateur, soit du côté HTA (figure 5.3). Considérons ainsi l'impédance harmonique Z de ce circuit au niveau du primaire du transformateur. La capacité C se trouve alors en série avec l'impédance Z (figure 5.3).

L'expression simplifiée de l'impédance globale, obtenue à partir des éléments L et C en série, s'exprime par la relation suivante :

$$Z = \frac{1 - L \times C \times \omega_r^2}{C \omega}$$

À la résonance, le numérateur $1 - L \times C \times \omega^2$ est égal à zéro, l'impédance Z tend vers une valeur minimale (figure 5.5).

Aussi, pour cette fréquence particulière, le courant est uniquement limité par la faible résistance du circuit, celle-ci étant généralement faible, la valeur du courant sera donc élevée.

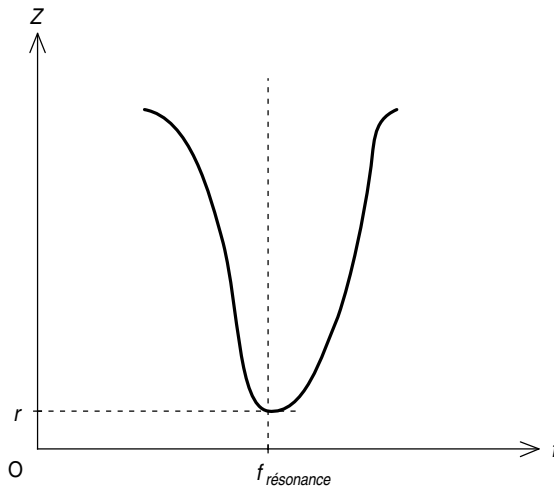


Figure 5.5 – Impédance harmonique vu du primaire du transformateur – résonance série.

■ Éviter la résonance

Le risque de résonance pouvant se produire, en présence de l'association de condensateurs et d'inductances, il est impératif de choisir la valeur de la capacité de relèvement du facteur de puissance de telle sorte que la fréquence de résonance soit éloignée des rangs harmoniques caractéristiques (rangs 3, 5, 7, etc.).

La fréquence de résonance peut ainsi être connue à l'avance afin de vérifier qu'elle ne coïncide pas avec une fréquence harmonique caractéristique (150 Hz, 250 Hz, 350 Hz, etc.).

La démarche est la suivante :

- L'inductance globale du circuit amont s'obtient à partir de la puissance de court-circuit S_{cc} et de la tension d'alimentation V suivant l'expression :

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V \times V}{V \times I} = \frac{V^2}{S_{cc}} = L \times \omega \text{ avec } S_{cc} = \frac{S_{\text{transformateur}}}{U_{cc}}$$

Soit l'inductance :

$$L = \frac{V^2}{S_{cc} \times \omega}$$

- La puissance réactive du ou des condensateurs est :

$$Q = C \times V^2 \times \omega$$

On en déduit la capacité :

$$C = \frac{Q}{V^2 \times \omega}$$

- L'expression de la fréquence de résonance étant connue :

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

On remplace, au sein de cette dernière relation, les expressions précédentes de L et de C :

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \frac{1}{\sqrt{\frac{V^2}{S_{cc} \times \omega} \times \frac{Q}{V^2 \times \omega}}} = \frac{\omega}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

et $\omega = 2 \times \pi \times f$ ou encore :

$$f = \frac{\omega}{2 \times \pi}$$

La fréquence de résonance s'écrit à présent :

$$f_r = f \times \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

Le risque de résonance est écarté lorsque cette fréquence est très élevée. Reprenons en exemple, *l'installation évoquée précédemment et présentant les caractéristiques* suivantes :

- puissance active absorbée par les récepteurs : 490 kW,
- puissance réactive déterminée pour la batterie de condensateurs : 136 kvars,
- puissance de court-circuit au niveau du jeu de barres : 10 MVA,
- réseau 400 V – 50 Hz.
- la fréquence de résonance prédéterminée est ainsi de :

$$f_r = f \times \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} = 50 \times \sqrt{\frac{10\,000}{136}} = 429 \text{ Hz}$$

Cette fréquence de 429 Hz, proche du rang 9 (450 Hz), devra faire l'objet d'une étude particulière afin de vérifier si le rang harmonique 9 est présent sur le réseau du fait des charges non linéaires raccordées sur l'installation en question.

Avant d'effectuer un choix technologique de la batterie de condensateurs, il faut donc vérifier que la fréquence de résonance calculée soit éloignée des fréquences harmoniques présentes sur le réseau. Dans le cas échéant, le réajustement de la puissance réactive de cette batterie devra être réalisé de façon à s'écarter de ces fréquences harmoniques.

5.2 Les solutions de filtrage

Avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour combattre les harmoniques, il faut s'intéresser au mode de raccordement du récepteur pollueur vis-à-vis de l'installation concernée et vis-à-vis des autres charges présentes sur le même réseau.

En effet, le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible (transformateur le plus puissant par exemple). Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques. Aussi, les charges polluantes doivent être raccordées le plus amont possible de la source afin de bénéficier du niveau le plus élevé de puissance de court-circuit.

D'autre part, il faut éviter de raccorder un récepteur sensible à proximité d'une charge déformante.

La position du branchement des charges déformantes au sein d'une installation revêt ainsi un double intérêt : assurer la séparation des charges et bénéficier de la puissance de court-circuit la plus élevée (figure 5.6).

La séparation des sources est aussi une solution employée bien que coûteuse. Elle consiste à attribuer un transformateur indépendant pour l'alimentation unique de la charge non linéaire.

D'autres solutions sont utilisées, notamment dans les convertisseurs d'énergie de type onduleurs ou variateurs de vitesse, mettant en œuvre une inductance en série avec le récepteur déformant (on parle dans ce cas d'inductance de ligne). L'inductance, dont l'impédance augmente avec la fréquence, conduit à réduire l'amplitude

des harmoniques de rangs élevés. Lorsque cette inductance est placée en amont du convertisseur polluant (figure 5.7), on observe une diminution sensible des courants harmoniques générés par l'équipement sur le réseau d'alimentation électrique et par conséquent le taux de distorsion harmonique en tension.

Une autre solution, utilisée pour la protection des condensateurs de relèvement du facteur de puissance, consiste à placer en série avec le condensateur une inductance appelée *inductance anti-harmonique* (figure 5.8). La valeur de la fréquence de résonance de l'ensemble du montage doit être placée en dessous des valeurs de fréquences harmoniques présentes, protégeant ainsi le ou les condensateurs de compensation d'énergie réactive contre les surcharges harmoniques comme le décrit la figure 5.9. Le fabricant ABB préconise la valeur de 210 Hz.

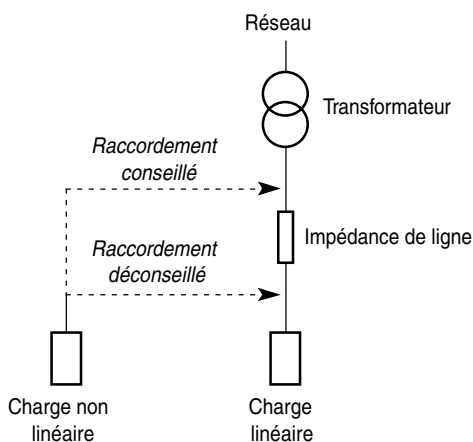


Figure 5.6 – Préconisation de raccordement des charges déformantes.

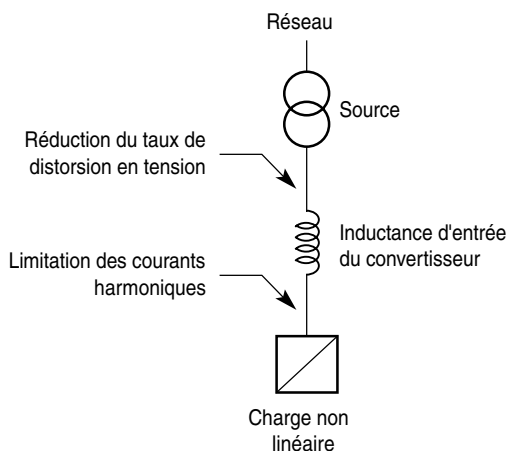


Figure 5.7 – Impédance d'entrée d'un convertisseur.

L'emploi d'une inductance anti-harmonique présente alors un double intérêt :

- elle supprime les risques de claquage de condensateur dus aux forts courants harmoniques (rappelons que l'impédance d'un condensateur diminue avec l'augmentation de la fréquence),
- elle réduit les taux de distorsion harmonique en tension sur le réseau considéré.

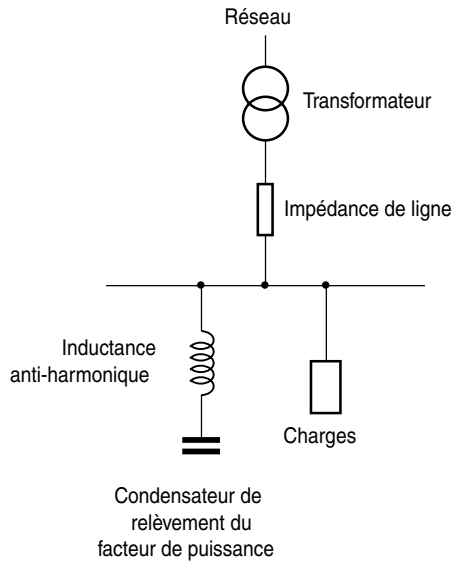


Figure 5.8 – Montage de l'inductance anti-harmonique.

La fréquence d'antirésonance est placée elle aussi en dehors du domaine des courants harmoniques présents sur ce réseau et l'on doit veiller aussi à ce que cette fréquence ne corresponde pas non plus à une fréquence de télécommande du distributeur (fréquence de 175 Hz par exemple).

La batterie de condensateurs assure ainsi, pour la fréquence fondamentale (50 Hz), la fonction de compensation d'énergie réactive tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courants harmoniques.

Les harmoniques de rang 3, émis principalement par des charges non linéaires alimentées en monophasé (charges informatiques, ballasts d'éclairage, etc.), sont en général bloqués au circuit aval du transformateur.

Du fait de leur couplage étoile-zig-zag ou triangle-étoile, les transformateurs HTA/BT représentent une barrière contre les harmoniques de rang 3.

Aussi, la mise en place d'un transformateur de séparation, dans le cas d'une installation tertiaire par exemple, composée de nombreux ordinateurs et matériels informatiques, peut constituer une solution efficace pour éliminer les harmoniques de rang 3.

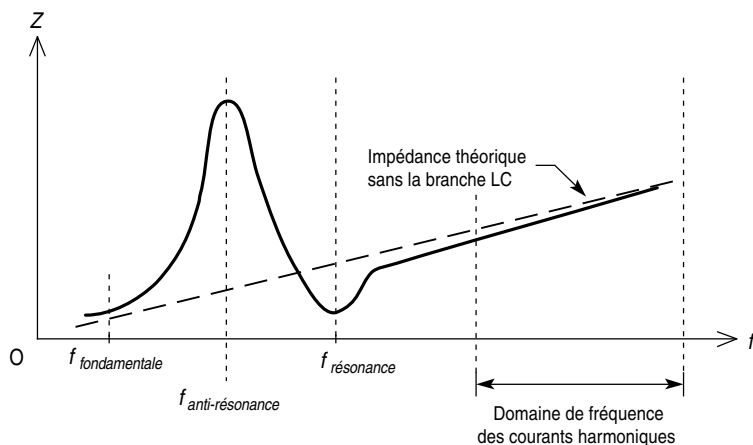


Figure 5.9 – Courbe de fréquence – inductance anti-harmonique.

5.2.1 Filtrage passif

Contrairement à l'utilisation présentée précédemment, le filtre passif associe un condensateur et une inductance placés en série, dans le but d'obtenir la fréquence de résonance sur un harmonique donné. Le filtre passif est donc défini au cas par cas afin d'être accordé sur un harmonique précis à filtrer.

Le filtre, une fois ajusté sur l'harmonique à éliminer, présente une impédance très faible privilégiant alors le passage de ce courant harmonique à évacuer. Ce courant harmonique s'oriente ainsi vers le filtre et non pas vers le reste du réseau.

On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- le filtre résonant (ou filtre de type shunt),
- le filtre amorti.

■ Le filtre résonant

Le filtre résonant (ou filtre *shunt*) est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C .

Les valeurs d'inductance L et de capacité C sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer.

Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est alors nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer (figure 5.10).

L'association de plusieurs filtres passifs, branchés entre phases, présente une impédance minimale (à la résonance, l'impédance Z est uniquement égale à la valeur de la résistance r du filtre) pour chaque rang d'harmonique à filtrer (figure 5.11).

Cet ensemble de filtres est accordé sur les différentes fréquences correspondant aux rangs harmoniques à supprimer. Aussi, les tensions harmoniques résultantes sont limitées, pour chacune d'entre elles, au produit de la faible résistance r par le courant harmonique au rang considéré.

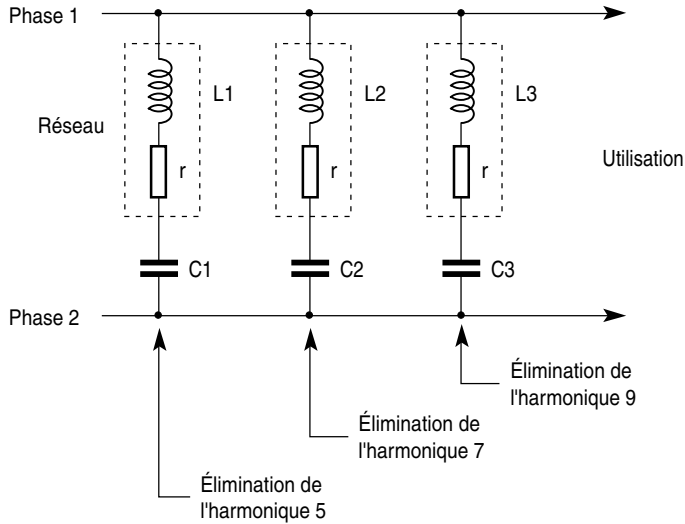


Figure 5.10 – Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

D'autre part, le filtre résonant réalise la compensation d'énergie réactive à la fréquence industrielle (50 Hz).

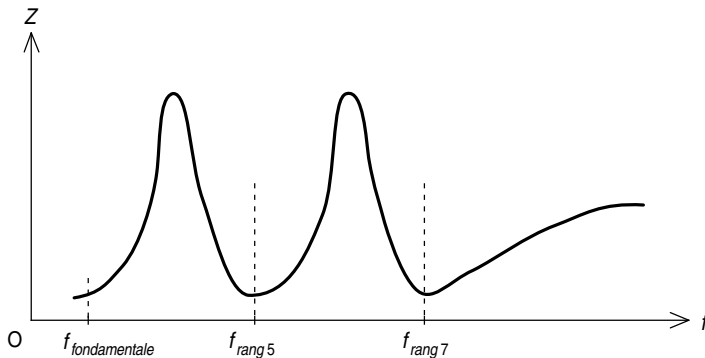


Figure 5.11 – Exemple de courbe d'impédance pour deux filtres résonants (h5 et h7).

Un filtre *shunt* efficace doit posséder un grand facteur de qualité Q . Celui-ci s'exprime par la relation suivante :

$$Q = \frac{Z}{r} \text{ avec } r \ll X, \text{ soit : } Q = \frac{X}{r}$$

L'ordre de grandeur de ce facteur de qualité est de 75.

La mise en œuvre d'un filtre passif nécessite une étude précise de l'installation concernée par cette modification structurelle. En effet, l'implantation d'un filtre

passif peut présenter des risques de résonance avec d'autres éléments inductifs de l'installation. On doit veiller à ce que les antirésonance ne se situent pas sur les rangs harmoniques présents sur le réseau.

Les performances du filtre passif sont obtenues dans la pratique en optimisant son réglage. En effet, l'étude théorique conduit à des imperfections qui se traduisent dans la réalité par un désaccord de ce filtre. Une pince harmonique permet alors de quantifier précisément la valeur des courants harmoniques et d'affiner le réglage du filtre, sur site, pour réduire efficacement les courants harmoniques choisis.

■ Le filtre amorti

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance (figure 5.12).

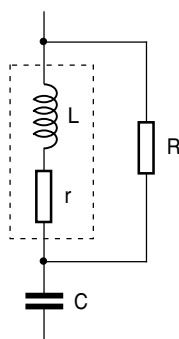


Figure 5.12 – Structure du filtre amorti.

Utilisé pour des applications susceptibles de générer des courants harmoniques proches de l'antirésonance, ce filtre :

- amortit les antirésonances (l'impédance à la fréquence d'antirésonance est plus faible comparativement au filtre résonant),
- réduit les tensions harmoniques de fréquences égales ou supérieures à son accord.

Le filtre amorti assure l'atténuation des harmoniques dans une plus large bande de fréquence que le filtre résonant mais sans éliminer concrètement ces perturbations. Il ne réalise donc pas la suppression de ces harmoniques mais contribue à améliorer sensiblement le taux de distorsion harmonique globale d'une installation polluée. Le filtre amorti peut être associé à un filtre résonant dans certaines applications industrielles.

Pour des installations utilisant le filtrage harmonique, on peut concevoir de mettre en œuvre un filtrage résonant pour les rangs 5 et 7 associé à un filtrage de type shunt pour les rangs les plus élevés.

5.2.2 Filtrage actif

Le filtrage actif, solution plus sophistiquée que le filtrage passif, constitue aujourd'hui une solution bénéficiant des technologies les plus performantes et en constante amélioration par les constructeurs de ces équipements.

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs, encore appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Le filtre actif est d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs d'harmoniques à la fois.

L'association d'un filtre passif avec un filtre actif est baptisée *filtre hybride* et nécessite de paramétrer, dans ce cas, le filtre actif sur les fréquences d'accord différentes de celles du filtre passif.

Le principe du filtre actif de type shunt (filtre actif le plus répandu) réalise l'injection d'un courant dit compensateur en opposition avec le courant déformé absorbé par la charge non linéaire. Le courant résultant en amont de la charge est un courant reconstitué proche de la sinusoïde classique, transformant alors, vis-à-vis du réseau, la charge non linéaire en une charge linéaire. Les effets néfastes des harmoniques sont ainsi annulés. La figure 5.13 donne une représentation schématique de ce type de filtre.

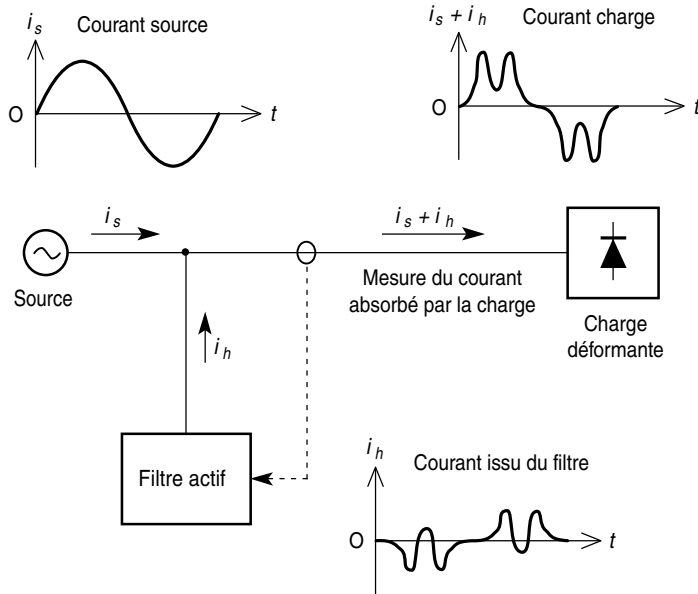


Figure 5.13 – Principe du filtrage actif.

Le filtrage actif constitue une solution intéressante pour la dépollution des réseaux industriels. Cet équipement, intégrant des technologies d'électronique de puissance à commutation rapide, est capable de s'adapter automatiquement aux valeurs des rangs harmoniques présents sur le réseau électrique de l'installation. D'autre part, ce dispositif n'affecte pas les caractéristiques d'impédance du réseau ou de résonance de celui-ci.

Le filtre actif peut être mis en œuvre, au sein d'une installation, en compensation globale, vis-à-vis de différents pollueurs ou encore en compensation locale pour une charge déformante importante en puissance.

Les filtres actifs trouvent de nombreuses utilisations notamment pour des convertisseurs d'énergie de type onduleur.

5.3 Étude de cas d'un filtrage passif sur un convertisseur de traitement de surface

L'étude expérimentale menée contre la pollution harmonique est réalisée ici à partir d'un ensemble de traitement de surface (zingage électrolytique) utilisant un générateur de courant intégrant un redresseur à thyristors.

5.3.1 Présentation du système

Le système de traitement de surface TS 3000 utilise le processus de dépôt électrolytique pour assurer la protection contre la corrosion des pièces métalliques. Le processus électrolytique est basé sur l'application stricte de la loi de Faraday dont la représentation mathématique est la suivante et traduit l'importance de la valeur du courant pour réaliser le dépôt de métal sur la pièce à traiter :

$$m = \frac{1}{k} \times \frac{A}{n} \times i \times t$$

Avec :

- m : masse de métal déposée à la cathode du générateur de courant (pièce à traiter),
- A : masse atomique du zinc,
- i : intensité du courant,
- t : temps d'immersion dans le bain électrolytique.

L'équipement effectue un traitement de surface dit à « l'attache » en mode de zingage acide. Les pièces traitées dans le bain de zingage sont recouvertes d'un dépôt de zinc pur. L'épaisseur du dépôt est proportionnelle au temps d'immersion des pièces dans le bain et à *l'intensité du courant délivré par le générateur*.

5.3.2 Schéma de principe du redresseur

Le schéma de principe du redresseur assurant la génération du courant pour l'électrolyse est fourni à la figure 5.14.

On remarquera la présence de thyristors au sein du générateur de courant, appelé redresseur PD2 (Parallèle double à deux branches). Ces semi-conducteurs de puissance sont responsables de la commutation en courant dans le redresseur et donc de la déformation de ce signal (figure 5.15).

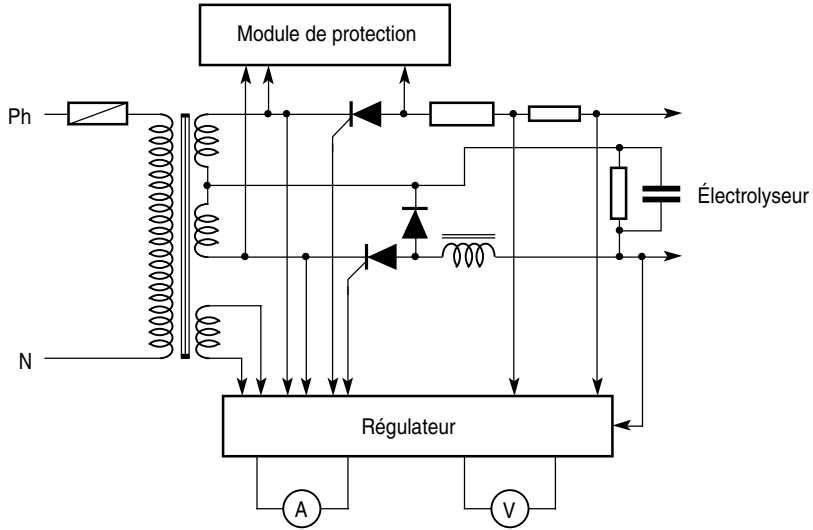


Figure 5.14 – Principe du filtrage actif.



Figure 5.15 – Générateur de courant.

5.3.3 Étude expérimentale du filtre

L'étude consiste à déterminer et à expérimenter un filtre de type passif sur l'alimentation du bain de dégraissage électrolytique du traitement de surface. Ce bain est

alimenté par un générateur 10 volts – 50 ampères de courant continu redressé et alimenté à partir du réseau alternatif monophasé.

■ Les mesures réalisées

La première démarche consiste à détecter et évaluer, par la mesure, la présence d'une distorsion harmonique en amont de l'alimentation.

Le dispositif de mesure mis en place à cet effet comprend :

- une pince harmonique permettant de qualifier la pollution harmonique par mesure directe du taux de distorsion globale (THD),
- un système d'acquisition assurant la récupération des signaux électriques et leur analyse harmonique par décomposition du signal afin d'obtenir l'amplitude de chaque rang harmonique existant.

Remarque

Dans ce contexte, le système d'acquisition aurait pu être remplacé par un simple oscilloscope raccordé sur la sortie analogique de la pince, si le but recherché étant simplement de visualiser l'allure des signaux électriques, courant et tension. En fait, le système d'acquisition permet ici de décomposer le signal afin d'obtenir l'amplitude de chaque rang harmonique. Précisons que cette décomposition harmonique peut être satisfaite en utilisant une pince harmonique (ce type de matériel est présenté dans le chapitre 6). celle-ci fournit l'amplitude de chaque rang harmonique à partir du signal mesuré.

Aussi, il est à noter que suivant l'équipement dont on dispose et le détail des mesures que l'on souhaite obtenir, l'équipement peut varier. Cela nécessite de bien appréhender la démarche et le niveau d'analyse désiré en ce qui concerne l'installation étudiée.

Le système de traitement de surface TS 3000 est installé dans un atelier comportant plusieurs équipements électriques de puissance. Le système TS 3000 est alimenté par un transformateur de 5,7 kVA sous un réseau triphasé de 400 volts.

Les mesures obtenues sont reportées dans le tableau 5.1 suivant.

Tableau 5.1 – Mesures réalisées en amont du générateur de courant.

Courant (en ampères)	THD (en %)	DF (en %)	Fc
1,44	30,9	29,5	1,53
Tension (en volts)	THD (en %)	DF (en %)	Fc
215,8	4,9	4,8	1,46

■ Analyse et interprétation des résultats

Les mesures obtenues ont été effectuées lorsque le générateur de courant débite 20 A sous 10 V dans le bain de dégraissage électrolytique. Les relevés indiqués dans le tableau précédent concernent le courant et la tension en entrée du générateur de courant, c'est-à-dire en amont du redresseur PD2.

La décomposition des signaux tension et courant est issue du logiciel de traitement des données dont les résultats sont communiqués dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 – Résultats issus de l'analyse harmonique.

Rang de l'harmonique	F	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
Taux d'harmoniques individuels en tension (en %)	100	0,9	3,2	0,3	3	0,4	1,4	0,2	0,8	0,2	0,3	0,3
Taux d'harmoniques individuels en courant (en %)	100	1,2	21	0,8	11	0,6	7	0,6	5,6	0,5	4,3	3,9

Les relevés effectués traduisent la présence d'harmoniques au regard du taux global THD (31 %) ainsi que du facteur de crête (1,53) à la lecture du tableau 5.1 et concernant le signal courant. Le courant n'a donc plus une allure sinusoïdale et est représenté à la figure 5.16.

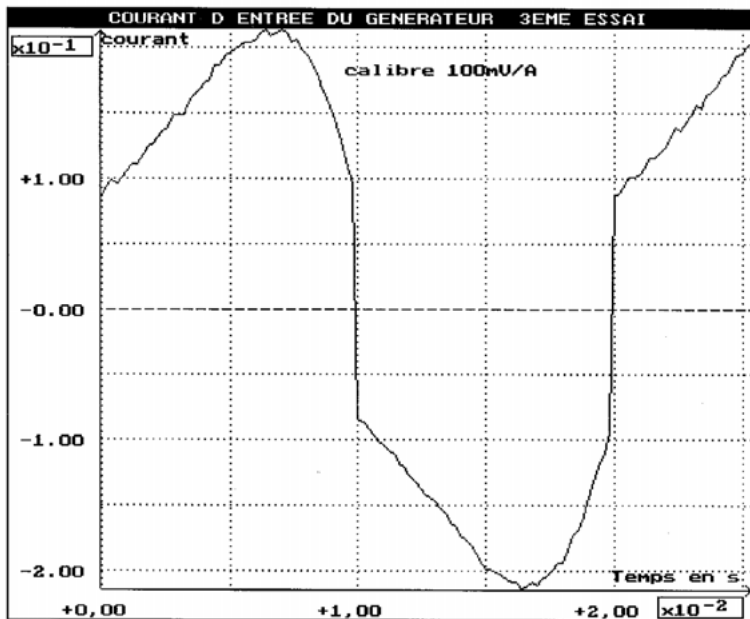


Figure 5.16 – Allure du courant absorbé par le générateur de courant.

L'alimentation du système est effectuée par un transformateur de 5,7 kVA. Celui-ci fait intervenir une impédance relativement forte de part sa puissance modérée et contribue ainsi à la génération d'harmonique tension qui se traduit par un taux global en tension de 4,9 %. La tension résultante est représentée à la figure 5.17. La tension à l'entrée du générateur de courant se trouve alors affectée par la pollution harmonique.

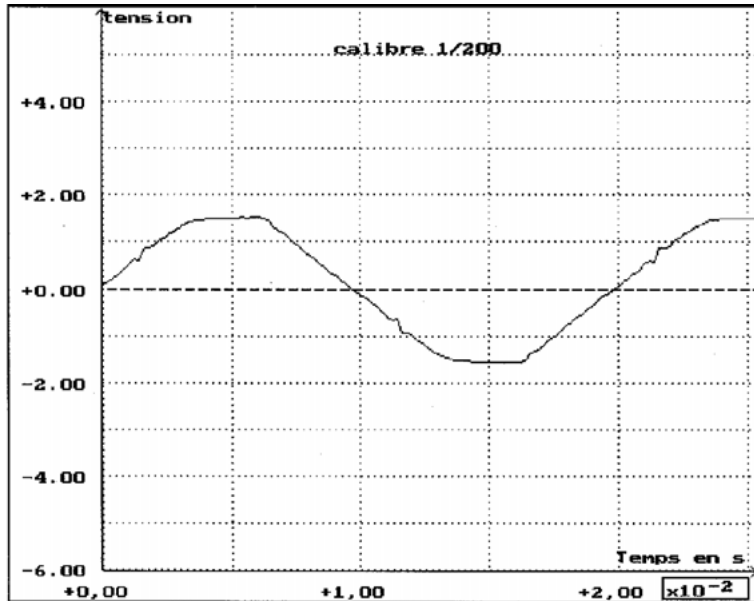


Figure 5.17 – Allure de la tension à l'entrée du générateur de courant.

L'analyse harmonique (tableau 5.2) met en évidence la présence des rangs harmoniques suivants : 3, 5, 7, 9, 11 et 13.

L'harmonique 3 représente 21 % du fondamental et l'harmonique 5 est de l'ordre de 11 % du fondamental.

■ Évolution de la pollution harmonique produite par l'équipement

Le taux global d'harmonique en tension, proche des valeurs limites préconisées dans ce domaine, risquerait de voir sa valeur augmenter lorsque le générateur est amené à débiter un courant plus important. En effet, les relevés ont été réalisés pour un courant débité par le redresseur de 20 A et celui-ci peut délivrer jusqu'à 50 A ! L'alimentation constituée par le redresseur à thyristors peut donc dans certaines conditions de fonctionnement être génératrice d'une pollution harmonique non négligeable. Les relevés de distorsion harmonique en courant vont permettre, dans le but d'atténuer la pollution, d'étudier le spectre du signal et de sélectionner les harmoniques représentatifs et responsables de la déformation du signal courant afin de mettre en place le filtrage de ces fréquences posant problème.

■ Filtrage proposé

La limitation des courants harmoniques sur ce réseau peut être envisagée grâce à l'emploi de filtres passifs de type shunt résonant. Il existe deux principales classes de filtres passifs permettant de réduire les phénomènes harmoniques :

- le shunt résonant,
- le filtre amorti.

Pour cette étude, c'est le principe du shunt résonant qui a été employé pour réduire la pollution harmonique. Ce filtre est constitué d'une branche L-C série dont la fréquence d'accord est donnée par l'expression suivante :

$$f_r = \frac{1}{2} \times \pi \times \sqrt{L \times C}$$

Cette fréquence d'accord doit être placée sur la fréquence de l'harmonique à éliminer. Le shunt résonant présente alors à la fréquence f_r , une impédance minimale réduite à la résistance r . Il dérive ainsi de lui-même la quasi-totalité du courant harmonique injecté par la source polluuse de fréquence f_r . Il doit y avoir en principe autant de shunts résonants que d'harmoniques à traiter.

□ **Les caractéristiques du filtre retenu**

L'impédance caractéristique :

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Le facteur de qualité :

$$Q = \frac{Z_c}{r} \text{ avec } r : \text{résistance de l'inductance.}$$

Tel que nous l'avons évoqué en amont dans ce chapitre, un filtre efficace doit avoir un grand facteur de qualité, supérieur à 75 pour les inductances à fer.

La bande passante :

$$\Delta f = \frac{r}{2 \times \pi \times L}$$

□ **Dimensionnement du filtre**

Dans cette étude, nous nous limiterons au filtrage des harmoniques de rang 3 et 5. Aussi, le montage des filtres est présenté au travers de la figure 5.18.

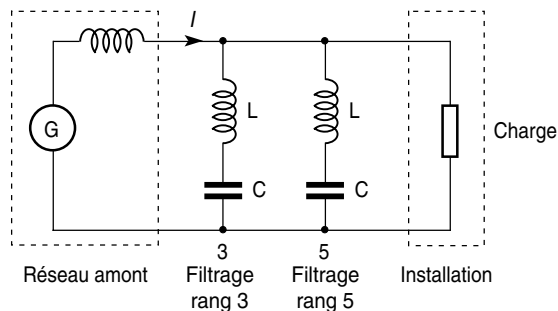


Figure 5.18 – Schéma du filtre résonant.

Les filtres, pour traiter les harmoniques de rang 3 et 5, doivent avoir respectivement les fréquences de résonance de 150 Hz et de 250 Hz tout en ayant chacun un facteur de qualité supérieur à 75. Pour une valeur de capacité choisie on obtient :

Filtre de rang 3	$f_r = 150 \text{ Hz}$	$C = 1 \text{ microfarad}$
		$L = 1,126 \text{ H}$
		$Z_c = 1061 \text{ Ohms}$
		$Q = 88,4$

Filtre de rang 5	$f_r = 250 \text{ Hz}$	$C = 0,5 \text{ microfarad}$
		$L = 0,8 \text{ H}$
		$Z_c = 1265 \text{ Ohms}$
		$Q = 105,4$

La mise au point du filtre passif à nécessité de réaliser des essais électriques de l'ensemble LC (tableau 5.3), sur une plage de fréquence allant de 30 à 700 Hz, afin de tracer la courbe d'impédance tracée à la figure 5.19.

Tableau 5.3 – Résultats des essais – courbe harmonique.

$f(\text{Hz})$	30	40	50	60	70	80	100	120	130	140	150
$U(\text{V})$	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47	1,46	1,44	1,41	1,28	0,61
$I(\text{mA})$	0,41	0,55	0,72	0,89	1,10	1,35	2,04	3,44	4,92	8,21	14,74
$Z(\Omega)$	3 585	2 673	2 042	1 652	1 336	1 088	716	419	286	156	41

160	170	180	199,1	200	210	222,2	230,3	241,7	250	261,5	278,6
1,12	1,27	1,36	1,31	1,48	1,46	1,28	1,24	1	0,66	1,04	1,24
8,16	3,98	2,15	0,37	0,37	1,09	2,69	4,46	9,12	12,74	9,55	5,62
137	319	605	3 540	4 000	1 339	476	278	110	52	109	221

304	320	351,3	380,8	409	451,5	500	551,6	600,5	650	700
1,29	1,31	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
3,58	2,98	2,28	1,9	1,65	1,39	1,19	1,04	0,93	1,32	1,32
360	439	579	695	800	950	1 110	1 269	1 419	1 571	1 714

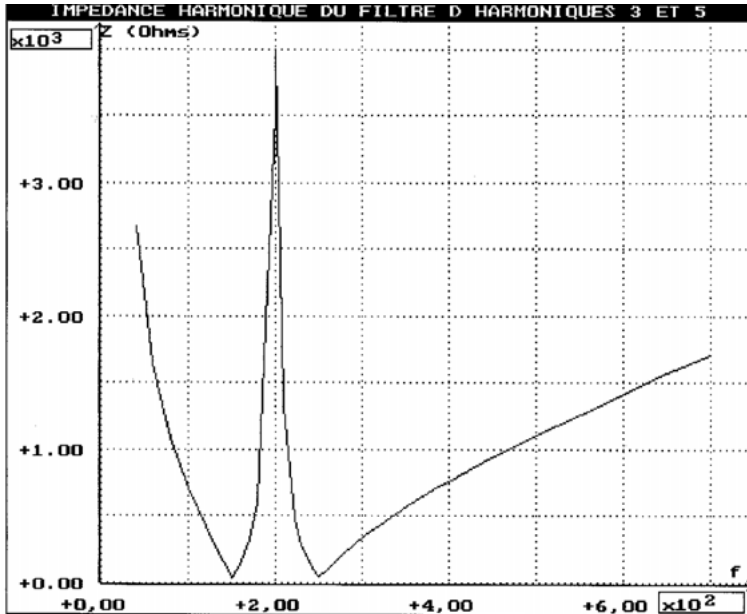


Figure 5.19 – Courbe d'impédance harmonique du filtre.

La courbe d'impédance harmonique caractéristique du filtre permet de visualiser les minima d'impédances obtenus pour les fréquences de 150 Hz et 250 Hz (figure 5.19). Les impédances de résonance à ces fréquences choisies assureront alors la réduction des harmoniques 3 et 5. On observe également sur le tracé, une antirésonance à 200 Hz. Celle-ci n'est pas préjudiciable pour l'installation, car cette fréquence de 200 Hz ne correspond pas à un rang harmonique caractéristique (4,5). L'antirésonance doit ainsi être placée sur un rang harmonique n'intervenant pas ou que faiblement dans la pollution harmonique du réseau.

■ Mise en œuvre du filtre

La mise en application du filtre sur l'équipement redresseur nécessite une phase de mise au point de ce dernier. En effet, la détermination théorique implique un ajustement en pratique consistant en un réglage de l'inductance afin d'optimiser le traitement de limitation des harmoniques.

Le filtre en action a permis de réduire les harmoniques de courant 3 et 5. Le résultat des mesures, une fois le filtre raccordé, a permis d'établir les données du tableau 5.4.

Tableau 5.4 – Résultats des essais – courbe harmonique.

Rang de l'harmonique	Fondamental	3	5
Taux d'harmoniques individuels en tension (en %)	100	1,8	1,7
Taux d'harmoniques individuels en courant (en %)	100	14	7

Le filtrage utilisé apporte une réduction sensible du niveau global d'harmonique, en réduisant ici d'environ 45 % les taux individuels des harmoniques tension 3 et 5. Ce dispositif de filtre, simple est d'une efficacité relative. Il autorise une atténuation des fréquences voulues et nécessite un réajustement à l'aide d'une phase réglage en agissant sur la valeur de l'inductance. Cette démarche impose de vérifier, *in situ*, à l'aide d'une pince harmonique, l'amplitude des harmoniques à éliminer afin d'optimiser la génération des harmoniques courants et ceci en régime de fonctionnement nominal.

Le shunt résonant constitue, à partir d'une étape de calcul simple, une réalisation aisée à mettre en application, pour filtrer une charge polluée et ceci dans l'objectif de limiter la production des harmoniques courants identifiés comme responsables de la pollution harmonique.

5.4 Les solutions de filtrage des industriels

Notre ouvrage, ayant pour but de présenter les techniques de dépollution mises en œuvre par les utilisateurs et constructeurs du secteur de l'électrotechnique, les sociétés ABB et Schneider Electric ont apporté leur contribution en nous fournissant leurs solutions de filtrage ainsi que des cas concrets de traitement des harmoniques dans des installations industrielles.

Les éléments présentés dans la suite de cette section sont issus des expériences de ces deux acteurs majeurs ayant acquis de solides références dans les solutions de filtrage d'harmoniques.

5.4.1 Les différents types de filtres

Il existe principalement quatre types de filtres dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5 – Les différents types de filtres.

Types de filtre	Description
Filtres passifs	<p>Les filtres passifs sont définis au cas par cas pour être accordés sur un harmonique précis à filtrer.</p> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> – Économique : faible coût du composant mis en œuvre. – Pas de surveillance à assurer en cours de fonctionnement. <p>Inconvénients</p> <ul style="list-style-type: none"> – La dépollution harmonique n'est efficace que pour l'installation présente (Ajout ou suppression de charges peut rendre la solution inopérante). – Mise en œuvre souvent difficile à réaliser dans les installations existantes : Solution ABB : Filtre THF et Solution Schneider Electric : En attente.
Filtres actifs	<p>Les filtres actifs annulent les harmoniques en injectant au point où ils prennent naissance des courants exactement égaux. Les filtres actifs réagissent en temps réel (de façon active) aux harmoniques présents pour les éliminer. Plus efficaces et souples d'emploi que les filtres passifs ils évitent leurs inconvénients et constituent une solution :</p> <ul style="list-style-type: none"> – plus performante (élimination totale possible des harmoniques jusqu'au rang 50) ; – souple, adaptable (on peut définir son action) et réutilisable : Solution ABB : Filtre PQF Solution Schneider Electric : Filtre SineWave™.
Filtres homopolaires	<p>Les filtres homopolaires réalisent le filtrage des harmoniques homopolaires (de rangs multiples impairs de 3) qui s'additionnent dans le conducteur neutre.</p> <p>Avantages</p> <ul style="list-style-type: none"> – Solution aux problèmes de courant dans le neutre, de plus en plus fréquents dans les installations de distribution de bureaux. – Élimination de tous les harmoniques de rang 3 k. – Rééquilibrage des phases. – Simplicité de mise en œuvre. – Solution économe : Solution Schneider Electric : CleanWave.

5.4.2 Les solutions de filtrage ABB

■ Le filtre passif THF

□ La résolution du filtrage de l'harmonique de rang 3

La présence d'un courant harmonique de rang 3 dans le conducteur de neutre entraîne de nombreux dysfonctionnements et occasionne des échauffements, des pertes d'énergie et des destructions de matériels. Cela affecte les réseaux de

distribution en général au travers des conducteurs électriques, dans les transformateurs et les condensateurs essentiellement.

Dans le domaine tertiaire, fortement équipé de matériels informatiques, le principal problème de pollution harmonique des réseaux de distribution est dû à l'harmonique de rang 3, donc de fréquence 150 Hz. Les équipements informatiques sont en grande partie responsable de ces perturbations, mais il faut également citer les lampes à décharge telles que les tubes fluorescents, lampes à vapeur de mercure, sodium haute pression ou encore les halogènes.

□ Sélection du filtre du troisième harmonique

Le constructeur ABB a mis au point le filtre THF qui élimine environ 95 % de l'harmonique courant de rang 3 (150 Hz) circulant dans le conducteur neutre.

Son principe de fonctionnement consiste à augmenter l'impédance du filtre pour le rang 3 à 150 Hz. On constate, pour ce fonctionnement, une légère distorsion du signal tension à 50 Hz, mais préserve ainsi le conducteur neutre de tout échauffement excessif.

Le filtre THF contribue aussi à l'élimination des harmoniques de rang 3 dans chaque phase, permettant alors de supprimer la majorité des problèmes évoqués précédemment.

Les deux applications suivantes montrent l'amélioration significative du signal courant et l'amélioration du spectre du réseau électrique en découlant :

- lampes à vapeur de sodium (figure 5.20) ;
- installation électrique dans un hôpital (figure 5.21).

■ La famille de filtres actifs PQF

Deux types de filtres actifs sont proposés par le fabricant ABB et permettent ainsi de répondre à l'ensemble de la demande en termes de filtrage d'harmoniques :

- Le filtre PQFA
- Le filtre PQFL

□ Généralités

Les solutions évoquées ici concernent le filtrage actif.

Un filtre actif doit être installé, de préférence, à l'emplacement même où la suppression d'harmonique est souhaitée. À titre d'exemple :

- dans un tableau alimentant les principales charges non linéaires pour épargner les appareils sensibles d'un circuit voisin,
- près du point de raccordement au réseau, lorsqu'il s'agit de limiter la propagation d'harmoniques sur le réseau afin d'être conforme à un contrat de type Émeraude par exemple, une réglementation ou une norme.

Le filtre actif est d'utilisation plus large et plus facile que le filtre passif. Un filtre actif assure la compensation de plusieurs rangs harmoniques.

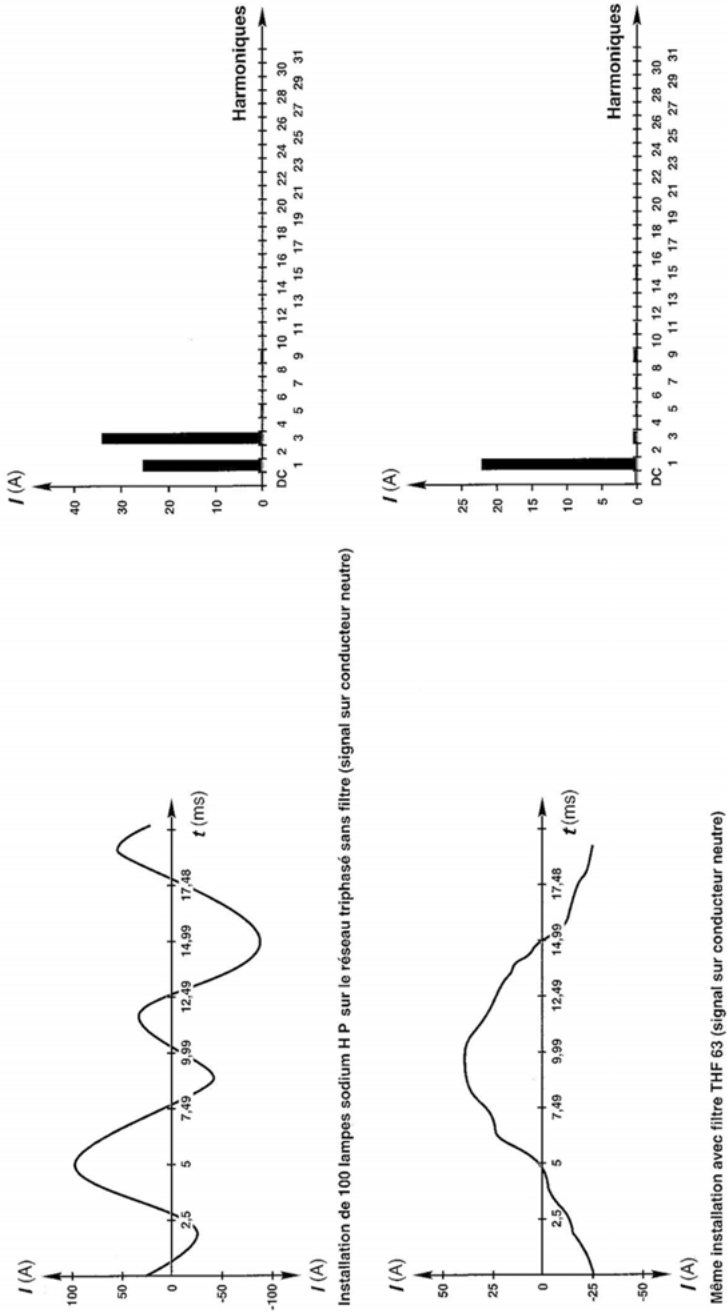


Figure 5.20 – Pollution et filtrage sur lampes à sodium.

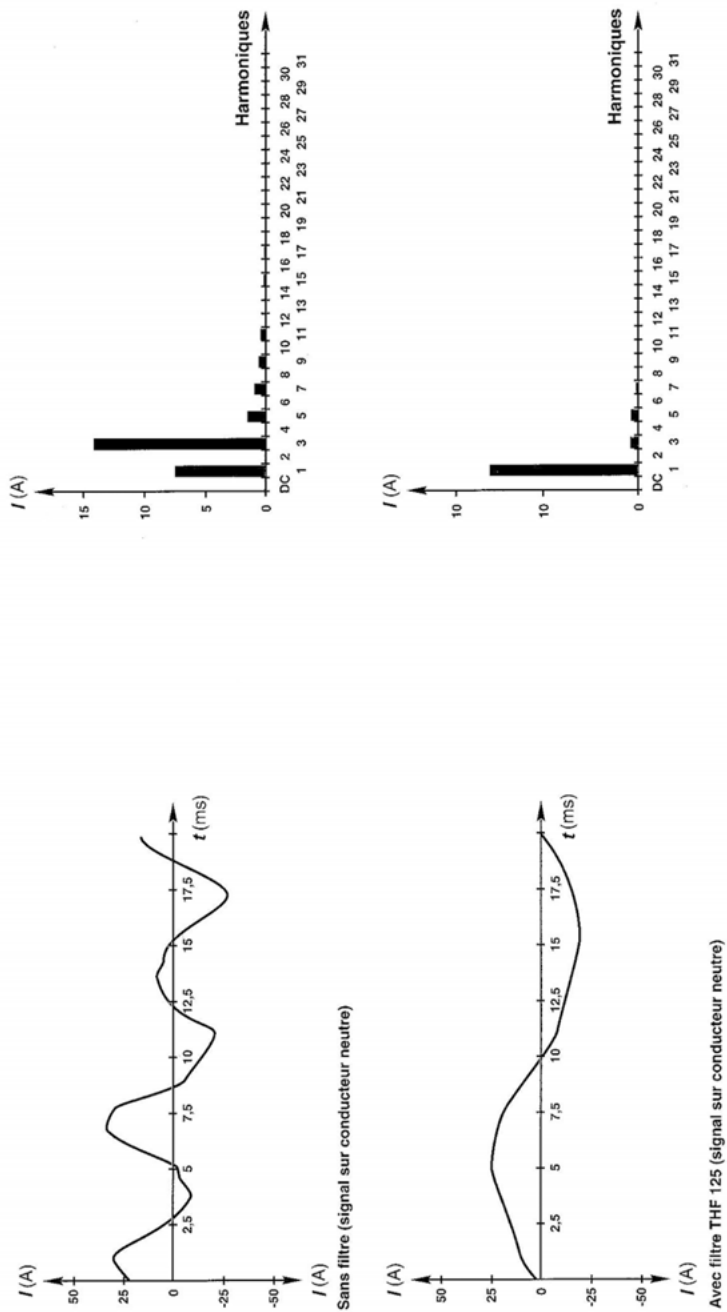


Figure 5.21 – Pollution et filtrage sur une installation électrique d’hôpital.

Le filtre actif constitue une source de courant indépendante de l'impédance du réseau et présente les caractéristiques suivantes :

- temps de réponse tel que la compensation harmonique est effective non seulement en régime établi, mais encore en régime transitoire.
- sa puissance permet d'atteindre des objectifs de dépollution fixés, ce qui ne signifie pas nécessairement la compensation totale et permanente des harmoniques générées par la charge ou l'ensemble de charges.

Dans ces conditions, on peut considérer que le filtre actif PQF (fabricant ABB) est un excellent dépollueur, car il est auto adaptatif et ne présente aucun risque d'interaction avec le réseau.

□ Description

La solution développée par le fabricant ABB est un filtre actif de type PQF offrant la possibilité de désensibiliser le réseau des harmoniques. Le filtre PQF élimine ces harmoniques de façon contrôlée.

Celui-ci est de conception modulaire et s'adapte aux modifications du réseau. Le filtre actif contrôle le courant de ligne, absorbé par les charges, en temps réel et traite les harmoniques mesurées sur le réseau.

Le filtre actif PQF se compose de deux ensembles : une partie puissance et une partie commande.

La partie puissance est constituée :

- d'un filtre d'entrée,
- d'un convertisseur PWM (*Pulse Width Modulated*) ayant pour mission de créer un signal qui sera injecté au travers de selfs de lignes pour former des harmoniques de courant en opposition de phase aux harmoniques à filtrer.
- d'un dispositif de stockage pour créer une source de tension.

La partie commande est traitée à l'aide d'une électronique de technologie DSP (*Digital Signal Processor*). Elle a pour rôle essentiel de piloter les semi-conducteurs de la partie puissance. Pour ce faire, cet ensemble de commande doit :

- piloter la charge des condensateurs à la mise sous tension,
- réguler la tension aux bornes des condensateurs,
- générer des ordres de conduction et de blocage du convertisseur PWM de telle façon qu'à chaque instant, le filtre actif fournisse un courant qui compense les courants harmoniques pollueurs.

La figure 5.22 donne le principe de fonctionnement du filtre actif vu par ABB.

La figure 5.23 montre l'évolution du spectre du signal courant avant et après l'intervention du filtre actif.

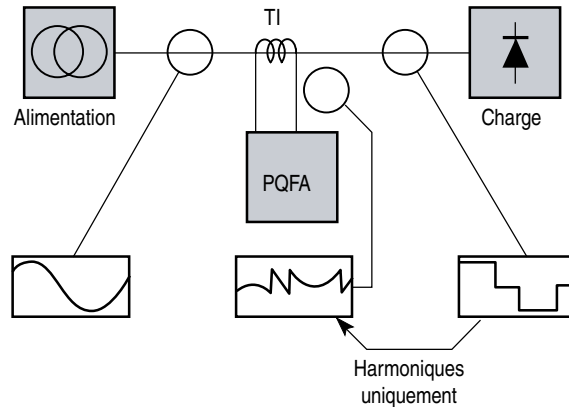


Figure 5.22 – Principe du filtre actif de type PQF (ABB)

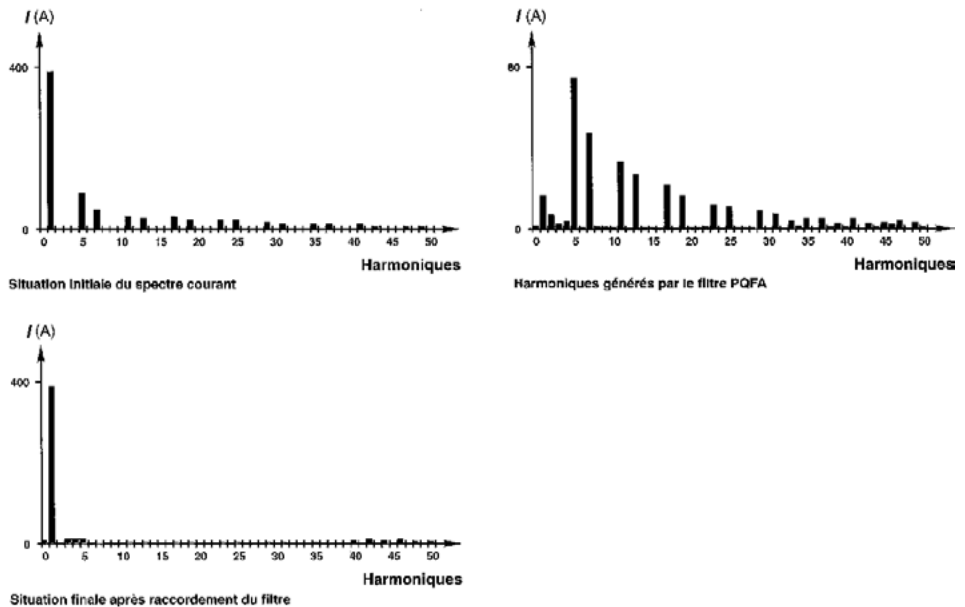


Figure 5.23 – Principe du filtre actif de type PQF (ABB)

□ Avantage de la technologie du filtre actif PQF

L'effet escompté du filtre actif, vis-à-vis du réseau, est l'élimination des harmoniques afin d'obtenir un retour à une sinusoïde propre.

L'utilisation de la technologie *Digital Signal Processor* (DSP) associée à un contrôle-commande en boucle fermée apporte au filtre actif une flexibilité et une précision sans précédent. Et ceci, notamment, en comparaison avec le filtre passif. Le convertisseur PWM intégré utilise des interrupteurs de l'électronique de puissance à technologie IGBT (*Insulated Gate Transistor Bipolar*) permettant de couvrir tous types d'alimentations spécifiques pour les charges pouvant être raccordées avec le filtre.

Le filtre actif PQF est connecté directement en parallèle sur le réseau électrique basse tension.

La figure 5.24 donne l'allure de la qualité du signal mesuré après filtrage sur un réseau perturbé.

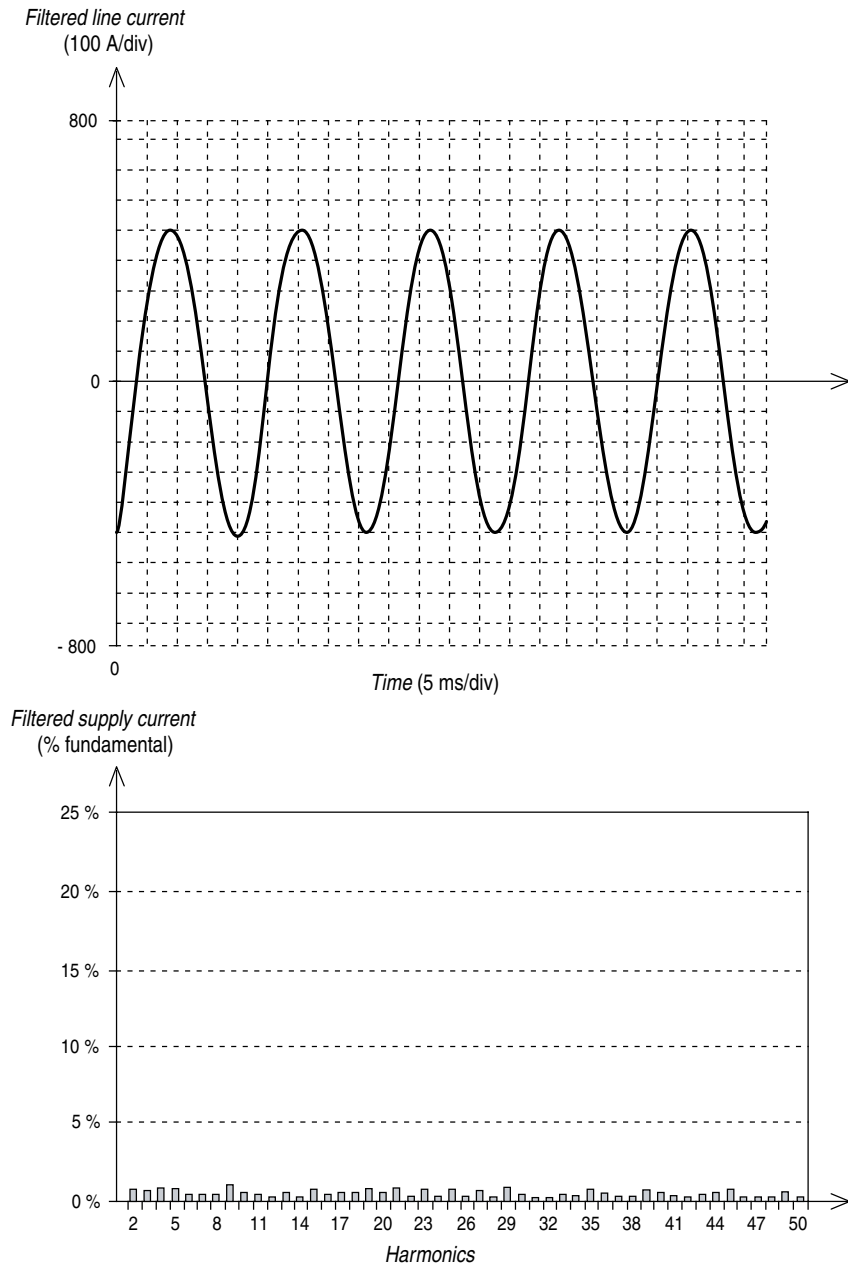


Figure 5.24 – Courant de ligne après filtrage.

Le filtre actif PQF offre les fonctionnalités suivantes :

- filtrage jusqu'au 20^e harmonique et de manière simultanée,
- filtrage jusqu'au 50^e rang,
- filtrage en boucle fermée pour une plus grande précision,
- sélection de la stratégie de filtrage et choix des harmoniques,
- filtrage sans compensation d'énergie réactive,
- compression du facteur de puissance,
- définition du filtre à partir d'une simple mesure,
- facilité de mise en œuvre,
- solution modulable et extensible.

□ **Le filtre actif PQFA**

Le filtre actif multi-harmonique PQFA (figure 5.26) est constitué d'une unité de contrôle pouvant piloter jusqu'à huit modules de puissance installés dans des armoires appropriées. Le filtre actif PQF est testé et assemblé en usine.

Chaque armoire est constituée des éléments suivants, représentés dans la figure 5.25.

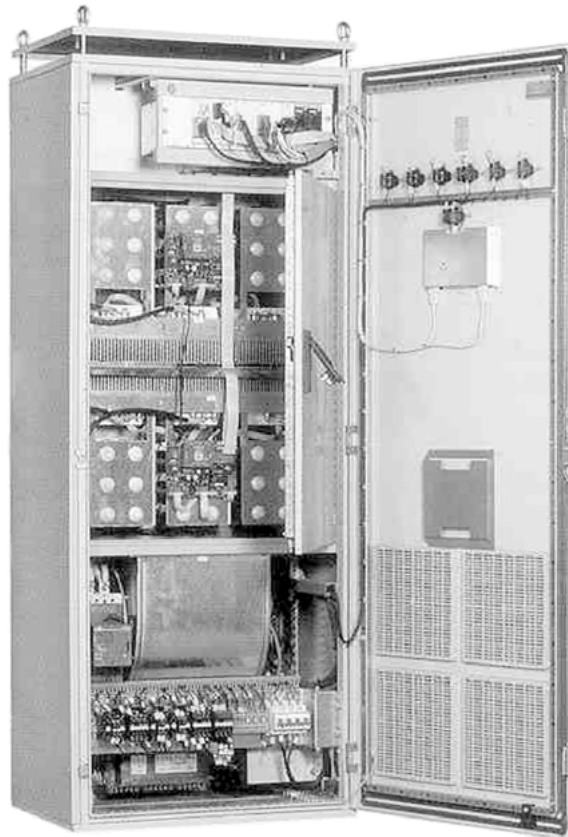


Figure 5.25 – Composition du filtre actif PQFA.

Les modules de puissance du filtre PQFA sont disponibles jusqu'à 600 V pour les fréquences industrielles allant de 50 Hz à 60 Hz.

Le courant nominal thermique d'un module est de 225 A RMS.

Les modules de puissance sont disponibles pour des tensions allant de 400 à 600 V, en 50 et 60 Hz.

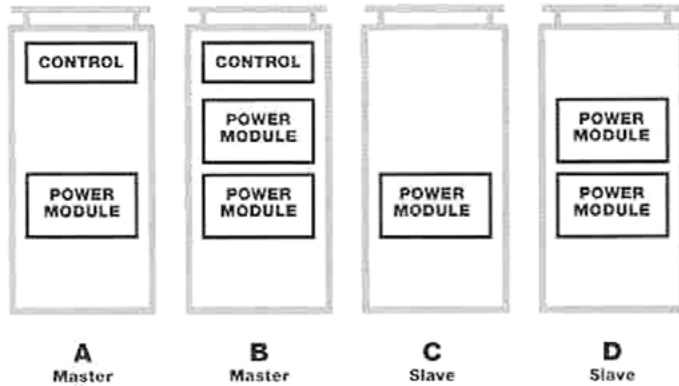


Figure 5.26 – Présentation du filtre actif PQFA.

□ Le filtre actif PQFL

Le filtre actif multi-harmoniques PQFL est constitué d'unités de contrôle et d'un module de puissance. Celui-ci peut être disponible en armoire ou version platine nue.

Le filtre PQFL est extensible jusqu'à quatre modules de puissance (figure 5.27).

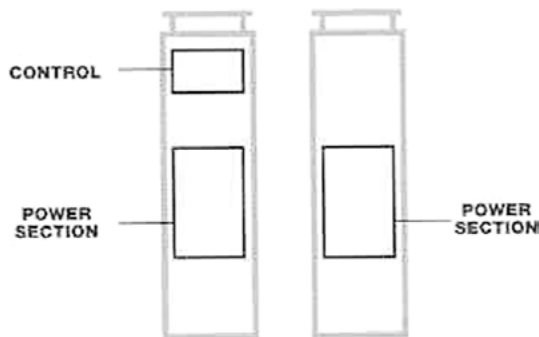


Figure 5.27 – Composition du filtre actif PQFL.

L'ensemble PQFL réalise le filtrage jusqu'à 20 harmoniques en 50 Hz (figure 5.28).

Le niveau de filtrage des harmoniques peut être librement choisi de 0 à 100 % de sa capacité. Dans ces limites de capacité, le filtre actif pourra jouer aussi un rôle de compensation d'énergie réactive.

La programmation du filtre est faite à travers un équipement de type PC associé à un logiciel fourni avec le filtre PQF.

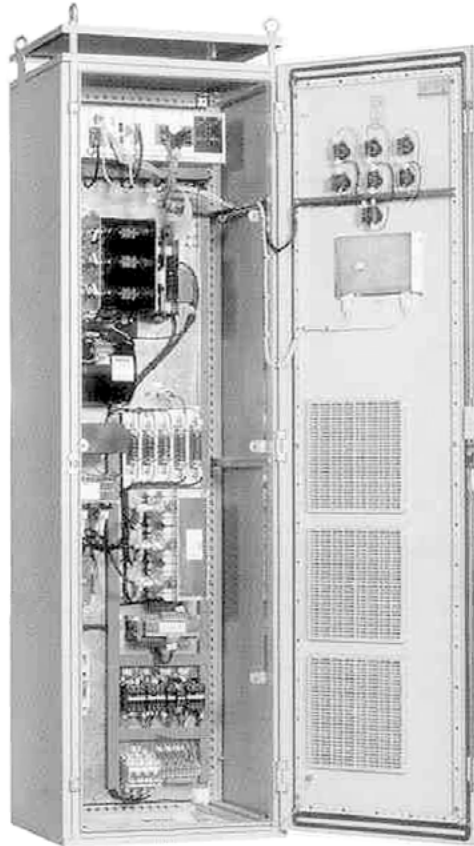


Figure 5.28 – Présentation du filtre actif PQFL.

■ Exemples d'application

Les différents cas industriels présentés ci-après sont issus des études, mesures, adaptations et mises en œuvre de filtres conçus et installés par la société ABB.

Ces extraits de cas concrets mettent l'accent sur l'allure des signaux déformés *avant et après filtrage* et traduisent à l'aide du spectre des signaux analysés le *contenu en harmoniques*.

□ Variation de vitesse

Harmoniques et qualité

Les harmoniques causés par des charges non linéaires comme des variateurs de vitesse, redresseurs, onduleurs, ordinateurs... sont un problème en constante progression pour les utilisateurs et fournisseurs d'électricité.

Les conséquences des harmoniques dans une installation électrique :

- échauffement des câbles, moteurs et transformateurs
- équipements sensibles endommagés,
- déclenchements intempestifs des dispositifs de protection,
- destruction des condensateurs,
- vieillissement prématuré des installations.

L'exemple d'une application de variation de vitesse est présenté figure 5.29.

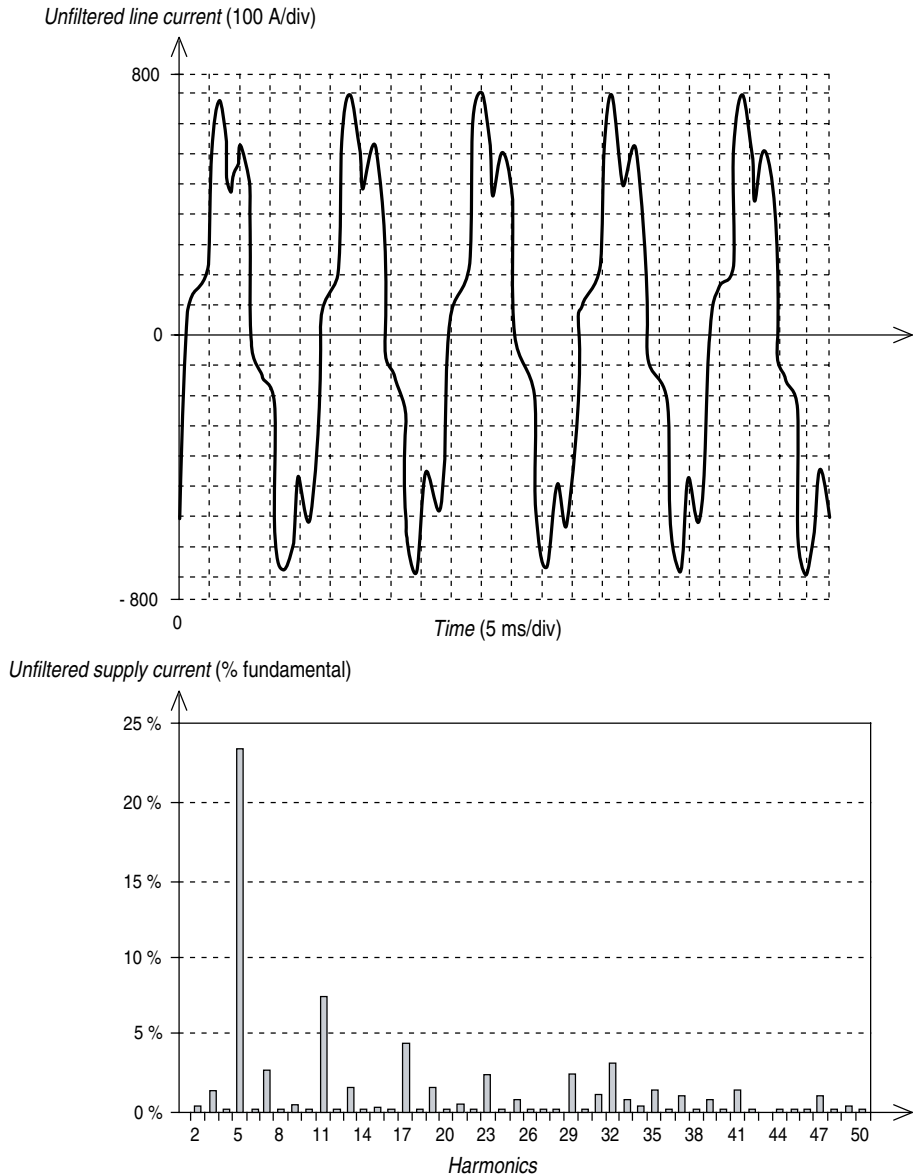


Figure 5.29 – Cas de variation de vitesse.

□ Électrolyse

Les équipements d'électrolyse sont fréquents dans le domaine de l'électrotechnique. Le dispositif présenté ici, d'une puissance apparente de 6×600 kVA, est un convertisseur de l'électronique de puissance dont la position dans l'installation électrique est représentée dans le schéma unifilaire donné à la figure 5.30.

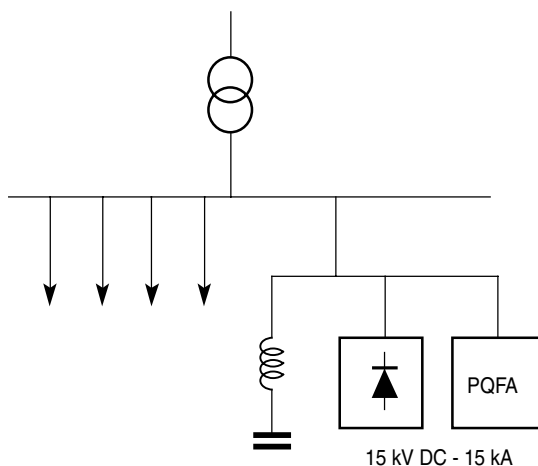


Figure 5.30 – Place du convertisseur au sein de l'installation électrique.

L'allure du courant absorbé par ce convertisseur (figure 5.31), soit en amont du jeu de barres représenté sur le schéma précédent, traduit une importante déformation riche en harmoniques (essentiellement 5 et 7) tel que le représente le spectre fourni à la figure 5.32.

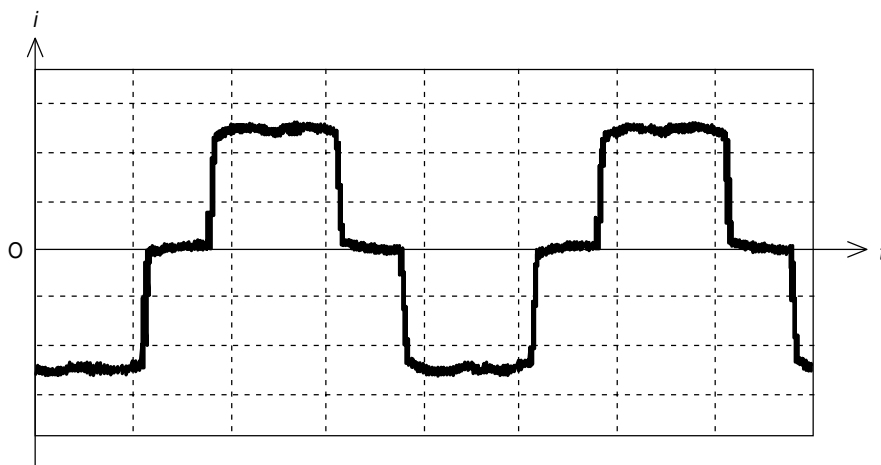


Figure 5.31 – Courant en amont du convertisseur avant filtrage.

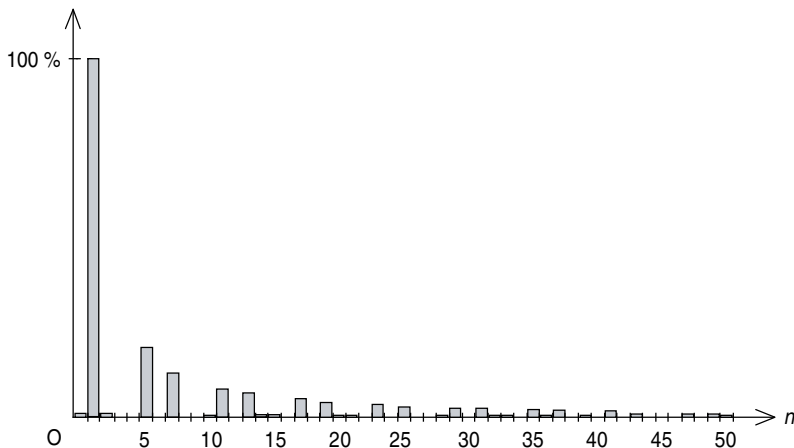


Figure 5.32 – Spectre du courant en amont du convertisseur avant filtrage.

La mise en place du filtre actif, de type PQFL, réalise un filtrage efficace permettant d'obtenir en amont du convertisseur, le courant absorbé représenté à la figure 5.33 et sensiblement identique à une sinusoïde.

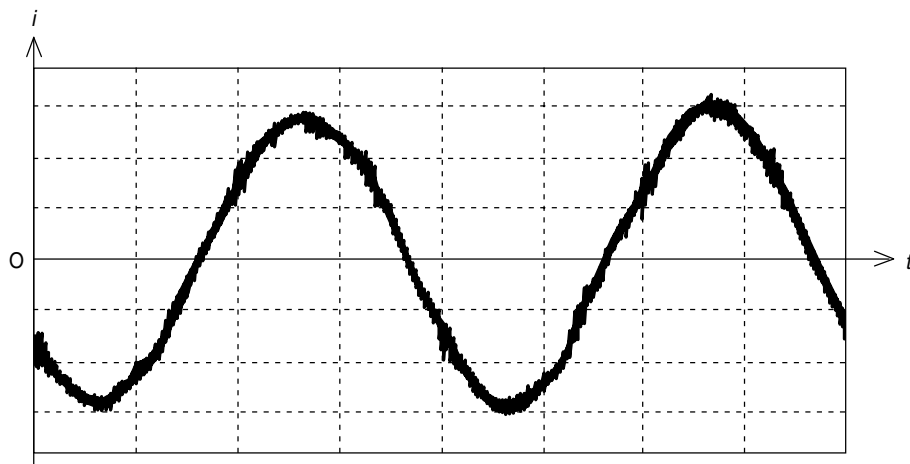


Figure 5.33 – Courant en amont du convertisseur après filtrage.

Le spectre du signal courant, résultant de ce filtrage, présente alors que de très faibles amplitudes harmoniques de rang 3 et 5 (figure 5.34).

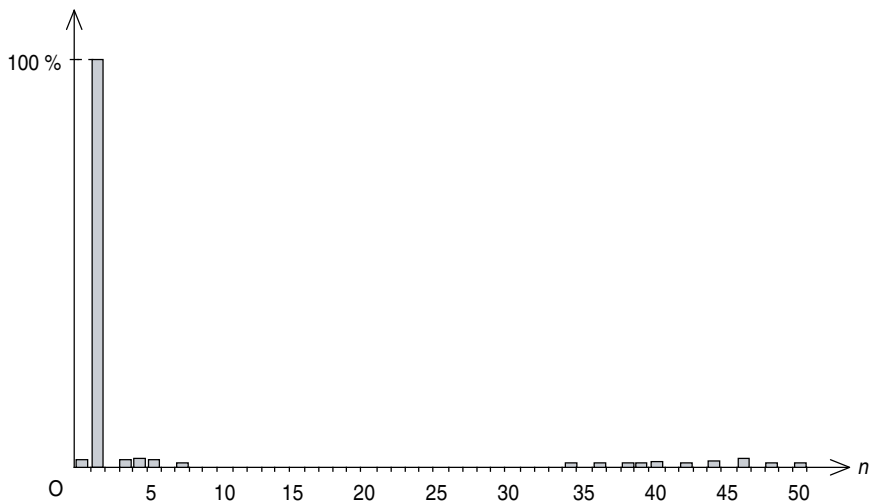


Figure 5.34 – Spectre du courant en amont du convertisseur après filtrage.

5.4.3 Les solutions de filtrage de Schneider Electric

■ Les filtres passifs LC

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés.

On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Il convient également de coordonner ses caractéristiques avec les besoins en puissance réactive des charges ; enfin, il est souvent difficile de concevoir les filtres de manière à éviter un facteur de puissance avance (capacitif) pour certaines conditions de charge.

Cette solution est d'une efficacité moyenne et sa conception dépend entièrement de la source d'énergie et des charges concernées : elle n'offre très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. Son utilisation peut créer des résonances, qui dépendent des caractéristiques spécifiques du réseau.

Note : lorsqu'il est bien conçu, ce type de filtre peut aussi être utilisé pour éliminer la distorsion harmonique déjà présente sur le réseau électrique du distributeur d'énergie, sous réserve d'un sur-dimensionnement significatif pour l'absorption des harmoniques issus du réseau.

Les paragraphes suivants présentent les principaux types de filtres passifs.

□ **Filtre LC non compensé**

Le circuit LC est accordé ($LC\omega^2 = 1$) sur le rang à éliminer. Son impédance est nulle pour l'harmonique de courant IH5, le plus important, et faible pour IH7.

Lorsque l'installation comporte un groupe électrogène, ce filtre ne convient pas si le groupe n'accepte pas un courant capacitif égal à 30 % du courant du redresseur.

□ **Filtre LC compensé**

Il comporte une self supplémentaire en parallèle avec le condensateur qui le rend adapté aux installations avec groupe électrogène. Ce dispositif diminue en effet l'énergie capacitive que doit fournir le groupe électrogène au démarrage et en régime établi.

□ **Filtre LC non compensé à contacteur**

Il comporte un contacteur qui permet la mise en service de la branche LC. Il est adapté aux installations avec un groupe électrogène de puissance limitée par rapport à la charge de l'onduleur. Le contacteur ne met en service la branche LC qu'à partir d'un taux de charge de l'onduleur acceptable pour le groupe.

La figure 5.35 illustre les trois types de filtres passifs LC.

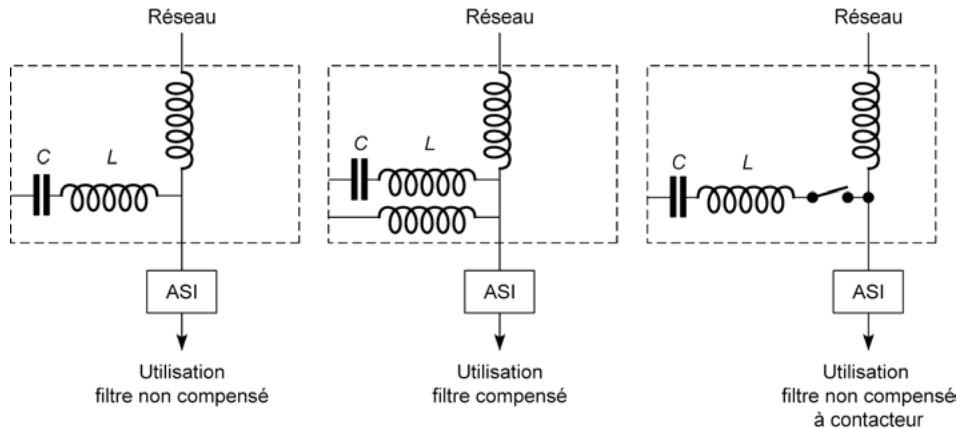


Figure 5.35 – Les trois types de filtres passifs LC.

□ **Avantages des filtres passifs LC**

- Simples et fiables.
- Installation possible après la mise en exploitation.
- Performances satisfaisantes, notamment pour la fréquence d'accord.
- Relèvent, dans une certaine mesure, le facteur de puissance en entrée.

□ Inconvénients des filtres passifs LC

- Limités en spectre : efficaces pour des fréquences voisines de l'accord (élimine H5, une partie de H7, mais peu H11 ou H13). Le THDI obtenu est $\leq 5\%$.
- Mal adaptés à l'évolutivité de la charge : efficacité divisée par deux lorsque l'ASI est à mi-charge (le THDI passe de 5 % à 10 %).
- Mal adaptés aux solutions d'ASI en parallèle, car il faut un filtre par redresseur.
- Dépendants de la source : avec groupe électrogène, il faut parfois envisager une version compensée, voire à contacteur.

■ Les filtres passifs double pont (confinement d'harmoniques)

Leur mise en œuvre s'applique aux alimentations Sans Interruption (ASI) unitaires ou en parallèle. Le principe, illustré par la figure 5.36, consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur triphasé. On obtient ainsi un redressement dit dodécaphasé. Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur le secondaire des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques générés par chacun des redresseurs au primaire des transformateurs. Le déphasage choisi permet d'éliminer les harmoniques de rang $6k \pm 1$ (H_5 , H_7 , H_{17} et H_{19}) et seuls les harmoniques de rang $12k \pm 1$ (H_{11} , H_{13} , H_{23} et H_{25}) subsistent. Le courant obtenu a une forme plus proche d'une sinusoïde que celle obtenue avec un seul redresseur (figure 5.36).

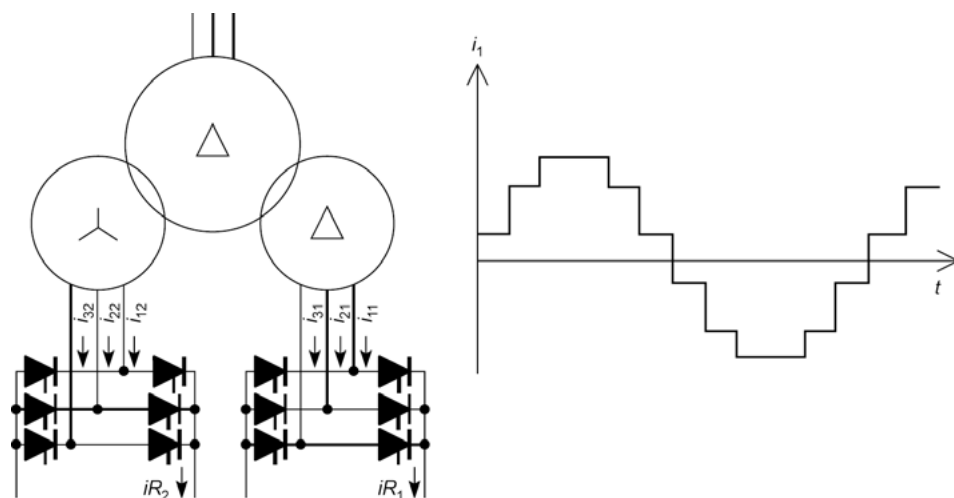


Figure 5.36 – Filtre double pont et courant obtenu.

□ Différentes versions de filtres passifs double pont

- Double pont avec transformateur à deux secondaires.
- Double pont avec autotransformateur.
- Montage en série ou en parallèle des redresseurs.

□ **Avantages des filtres passifs double pont**

- Performances acceptables, mais inférieures à celle du filtre passif ($\text{THDI} \leq 10\%$).
- Isolation galvanique complète en entrée de l'ASI (version avec transformateur).

□ **Inconvénients des filtres passifs double pont**

- À prévoir à l'origine de l'étude.
- Complexes (équilibrage des tensions, des I_{cc} , des courants des redresseurs).
- Coûteux (double redresseur, transformateur double secondaire ou autotransfo.).
- Mal adaptés à l'évolutivité de la charge. Leur efficacité diminue quand le taux de charge diminue (le THDI passe de 10 % à pleine charge à 15 % à mi-charge).
- Non conforme aux prescriptions du guide CEI 61000-3-4 pour les rangs H_{11} et H_{13} .

■ **Les filtres actifs THM**

Les filtres THM (*Total Harmonic Management*) réagissent en temps réel (de façon active) pour éliminer les harmoniques présentes jusqu'au rang 25. Ils utilisent pour cela le principe du compensateur actif SineWave dont il constitue une version simplifiée et optimisée pour les ASI de type Galaxy et Galaxy PW. Basé sur la technologie « Active 12 pulse », le THM est composé d'un double pont actif hybride :

- un pont redresseur composé de six thyristors dédié à l'alimentation de l'onduleur,
- un pont à « IGBT », dédié au management de la sinusoïde de courant, et à la réduction des harmoniques.

La figure 5.37 illustre le principe de la technologie « Active 12 pulse ».

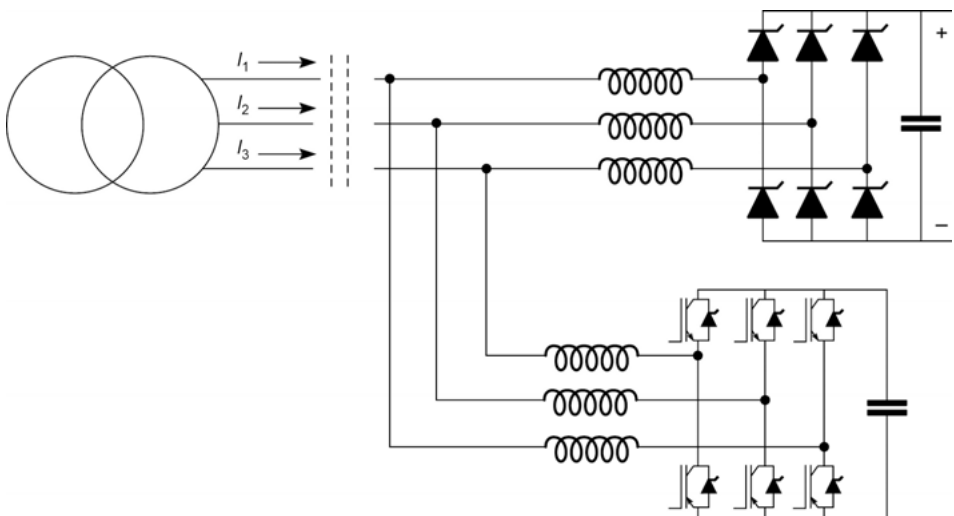


Figure 5.37 – La technologie « Active12 pulse ».

□ Avantages des filtres actifs THM

- Forte réduction des harmoniques (THDI < 4 %).
- Niveau de performance constant quel que soit le taux de charge onduleur.
- Haut niveau de fiabilité (ponts indépendants).
- Amélioration du facteur de puissance λ (de 0,95 jusqu'à 0,98) et du facteur de déphasage ($\cos \varphi = 1$) par compensation du réactif.

□ Inconvénients des filtres actifs THM

Le seul inconvénient relatif aurait pu être le coût, dû à l'électronique de puissance. En fait, les progrès technologiques, la chute des prix des composants et l'optimisation réalisée pour les ASI font que, à puissance égale, ce type de filtre a un coût inférieur à celui d'un filtre double pont, avec des performances et des possibilités bien supérieures.

■ Les filtres actifs de type SineWave™

Les filtres actifs de type SineWave™ permettent de dépolluer globalement une installation. Ils sont particulièrement bien adaptés pour les installations d'infrastructures et industrielles de moyenne puissance, avec des courants de compensation de 20 à 480 A dans des distributions 3 Ph+N et 3 Ph, charge mono. Le tableau 5.6 résume les principales caractéristiques des filtres actifs de type SineWave™.

Tableau 5.6 – Caractéristiques des filtres SineWave™

Gamme	Courants compensés	Réseaux 50/ 0 Hz	Principales caractéristiques
Filtre actif de type SineWave™	20 à 480 A	380 à 415 V 3 Ph+N 3 Ph	Filtrage jusqu'à H25 Compensation active numérique avec : – analyse compensation rang par rang ; – réponse aux fluctuations de charge : 40 ms.

□ Principe du filtre actif de type SineWave™

La source fournit la seule composante fondamentale (IF) du courant de charge. Le filtre encore appelé compensateur actif mesure en temps réel et fournit les harmoniques (IH) consommés par cette charge. En amont du point A de raccordement du compensateur, le courant fondamental IF est conservé ainsi qu'en aval de ce point le courant de charge non linéaire IF + IH, tel qu'illustré par la figure 5.38.

□ Fonctionnement du filtre actif SineWave™

La figure 5.39 illustre le schéma de fonctionnement du filtre actif de type SineWave™.

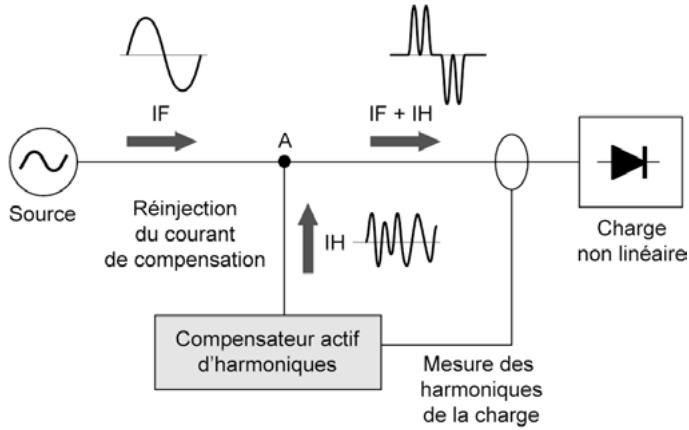


Figure 5.38 – Principe du filtre SineWave™

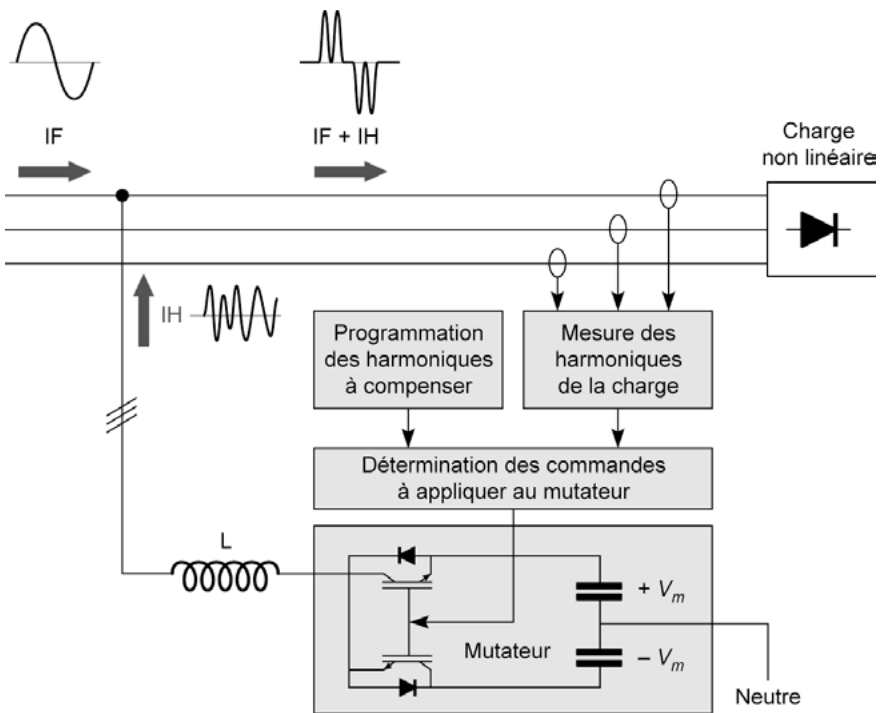


Figure 5.39 – Fonctionnement du filtre SineWave™

La base du fonctionnement du filtre actif de type SineWave™ est digitale, avec :

- capteur de courant,
- conversion analogique/numérique de la mesure du courant,
- calcul en temps réel du spectre.

Ceci permet de déterminer les commandes à appliquer au mutateur, en fonction des rangs individuels à compenser, pour la réinjection. Le temps de réponse aux variations de charge est de 40 ms (deux cycles).

L'énergie nécessaire à la compensation est prélevée sur le réseau triphasé, stockée dans la self L et les condensateurs chargés respectivement à $+V_m$ et $-V_m$ (voir figure 5.39).

Selon le sens du courant harmonique à fournir, on module en largeur d'impulsions l'un ou l'autre transistor. Ceci permet d'utiliser la même liaison au réseau pour le prélèvement d'énergie sinusoïdale et pour l'injection des harmoniques.

L'énergie est restituée à la charge selon :

- Les valeurs harmoniques mesurées.
- Les souhaits de l'utilisateur par le biais de la programmation : rangs des harmoniques à éliminer et compensation ou non du $\cos\varphi$.

Le transformateur de courant associé à un convertisseur analogique/digital extrait le spectre (fondamental + harmoniques) du courant alimentant la charge. En fonction de ces dernières valeurs et de la programmation choisie, un processeur élabore les commandes à appliquer au mutateur, une période après les mesures.

La compensation du $\cos\varphi$ est obtenue en générant un courant fondamental déphasé de $+90^\circ$ par rapport à la tension.

L'utilisateur peut choisir de compenser sur des réseaux 3 Ph ou 3 Ph+N :

- Tous les harmoniques ou certains d'entre eux jusqu'au rang 25.
- Le $\cos\varphi$.
- L'alimentation de SineWave™ est toujours triphasée mais il peut compenser des charges monophasées, et donc les harmoniques homopolaires de rang 3 k.

□ Mode d'installation

Le filtre actif de type SineWave™ s'installe selon les modes suivants :

- Mode parallèle,
- Mode cascade ou série,
- Mode multi-départs.

Installation en mode parallèle

Un maximum de quatre filtres actifs SineWave™ peuvent être installés au même point d'insertion. Ce mode permet d'augmenter la capacité de compensation des harmoniques et/ou la disponibilité de l'installation de compensation.

La mise en parallèle requiert un seul jeu de capteurs sur le départ à dépolluer et des liaisons filaires entre les compensateurs pour échanger la mesure du courant absorbé par la charge. En cas d'arrêt d'un compensateur, ceux restant en service continuent d'assurer la dépollution globale de l'installation, avec pour limite leur capacité nominale de compensation.

La figure 5.40 illustre l'installation de trois filtres actifs de type SineWave™ en mode parallèle.

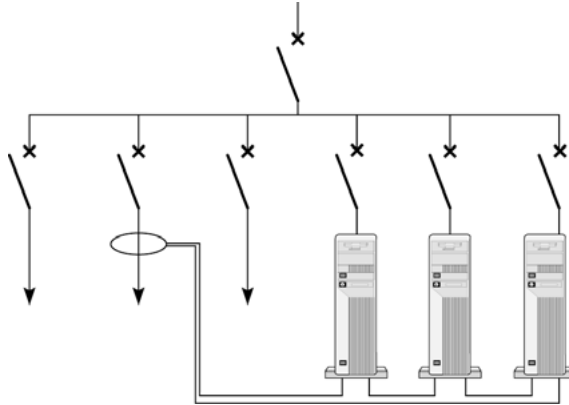


Figure 5.40 – Trois filtres SineWave™ en mode parallèle.

Installation en mode cascade ou série

L'installation en mode cascade ou série est possible moyennant un paramétrage spécifique évitant toute interaction entre les différents compensateurs :

- Le compensateur aval dépollue généralement une application de forte puissance.
- Le compensateur amont assure la compensation des autres départs de faible puissance et éventuellement de la pollution résiduelle non compensée par le premier.

La figure 5.41 illustre l'installation de filtres actifs SineWave™ en mode cascade.

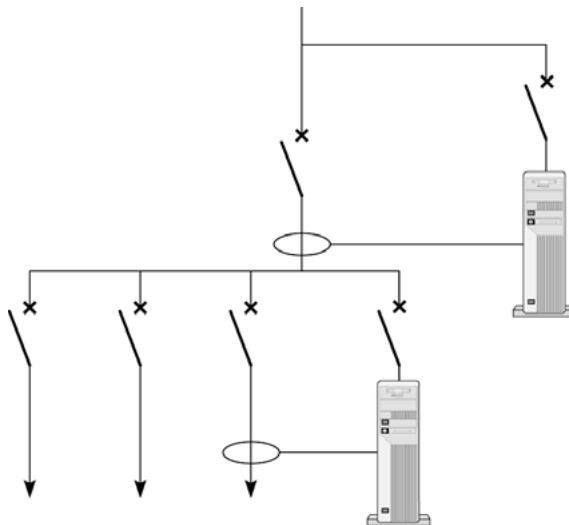


Figure 5.41 – Filtres SineWave™ en cascade.

Installation en mode multi-départs

L'installation en mode multi-départs permet de compenser jusqu'à trois départs avec un seul compensateur. Dans ce mode de fonctionnement, trois jeux de capteurs sont nécessaires et sont raccordés au filtre actif de type SineWave™. Cette configuration est intéressante lorsque la pollution est concentrée sur quelques départs. La figure 5.42 illustre une installation en mode multi-départs pour la dépollution de plusieurs départs.

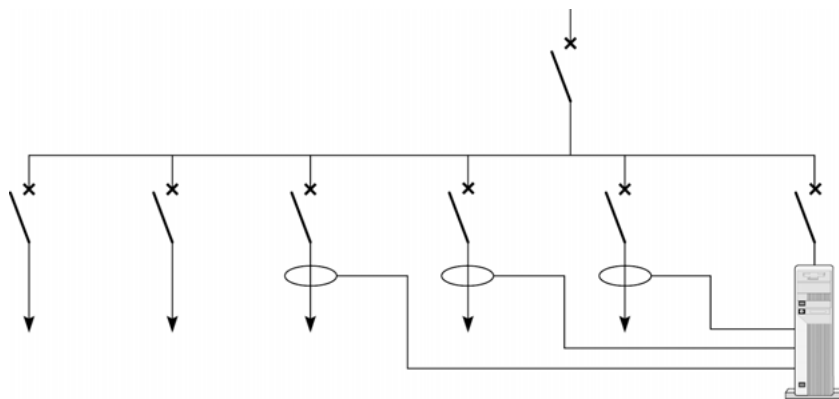


Figure 5.42 – Filtres SineWave™ en mode multi-départs.

□ Les trois types de compensation

Le filtre actif de type SineWave™ peut se raccorder pour assurer :

- une compensation globale ou « en tête »,
- une compensation mixte,
- une compensation locale.

Compensation globale ou « en tête »

Le filtre actif de type SineWave™ est raccordé immédiatement en aval des sources, généralement au niveau du TGBT.

Compensation mixte

Le filtre actif de type SineWave™ est raccordé au tableau de distribution divisionnaire ou général et assure la compensation d'un groupe de récepteurs.

Compensation locale

Le filtre actif de type SineWave™ est raccordé directement aux bornes de chaque récepteur.

La figure 5.43 illustre les types de raccordement possibles en fonction de l'objectif recherché.

Le tableau 5.7 décrit les avantages et les inconvénients des trois types de raccordement.

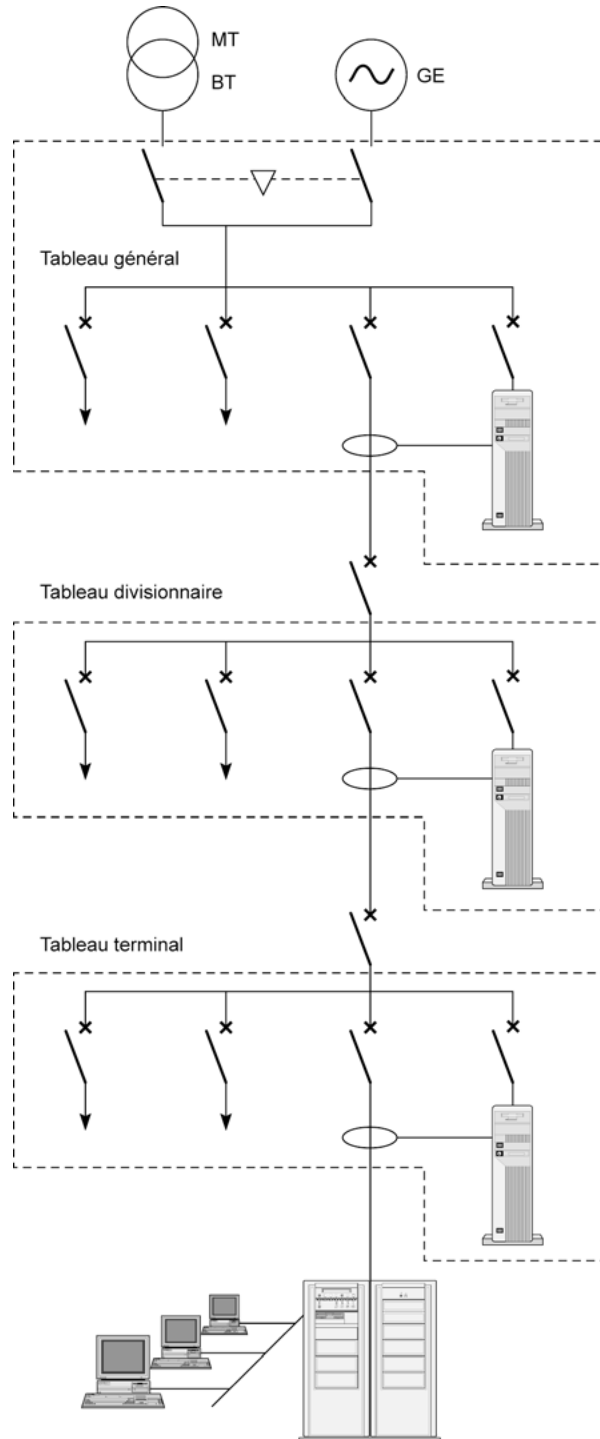


Figure 5.43 – Types de raccordement des filtres SineWave™.

Tableau 5.7 – Avantages et inconvénients selon le type de raccordement.

Type de compensation	Avantages	Inconvénients	Indications
Global ou en tête (Niveau du TGBT)	<ul style="list-style-type: none"> – Économique – Soulage les générateurs (transformateurs ; alternateurs). 	<ul style="list-style-type: none"> – Les harmoniques subsistent en aval de l'installation. – Nécessité de surdimensionner tous les câbles. 	<ul style="list-style-type: none"> – Respecter les normes du fournisseur. – Ne pas propager la pollution en amont de l'installation.
Mixte (Niveau du TDBT)	<ul style="list-style-type: none"> – Optimisation des câbles entre le TGBT et le tableau divisionnaire. – La recombinaison de certains harmoniques peut réduire le calibre du filtre actif. 	<ul style="list-style-type: none"> – Les harmoniques subsistent du tableau divisionnaire jusqu'à la charge polluante. – Surdimensionnement du câble de départ vers la charge. 	<ul style="list-style-type: none"> – Pour l'alimentation de grands immeubles. – Mise en œuvre par étage ou groupe d'étages. – Départs multiples alimentant des charges déformantes.
Local (Niveau de la charge)	<ul style="list-style-type: none"> – Suppression des harmoniques à l'origine. – Réduction des pertes dans tous les câbles, jusqu'au générateur. 	<ul style="list-style-type: none"> – Solution onéreuse en raison du nombre de filtres. 	Adapté : <ul style="list-style-type: none"> – si les charges polluantes sont peu nombreuses et d'une puissance significative par rapport au reste de l'installation. – pour des applications telles que baies de serveurs, éclairage, ASI de forte puissance, rampes d'éclairage fluorescents.

□ **Position des TI (Transformateurs d'intensité/de courant) amont ou aval**

La mise en œuvre du filtre actif de type SineWave permet pour la plupart des types de compensation décrits ci-avant d'utiliser deux types d'installation de capteurs TI.

Installation à un TI en amont de la charge

C'est l'installation la plus courante telle qu'illustrée par la figure 5.44.

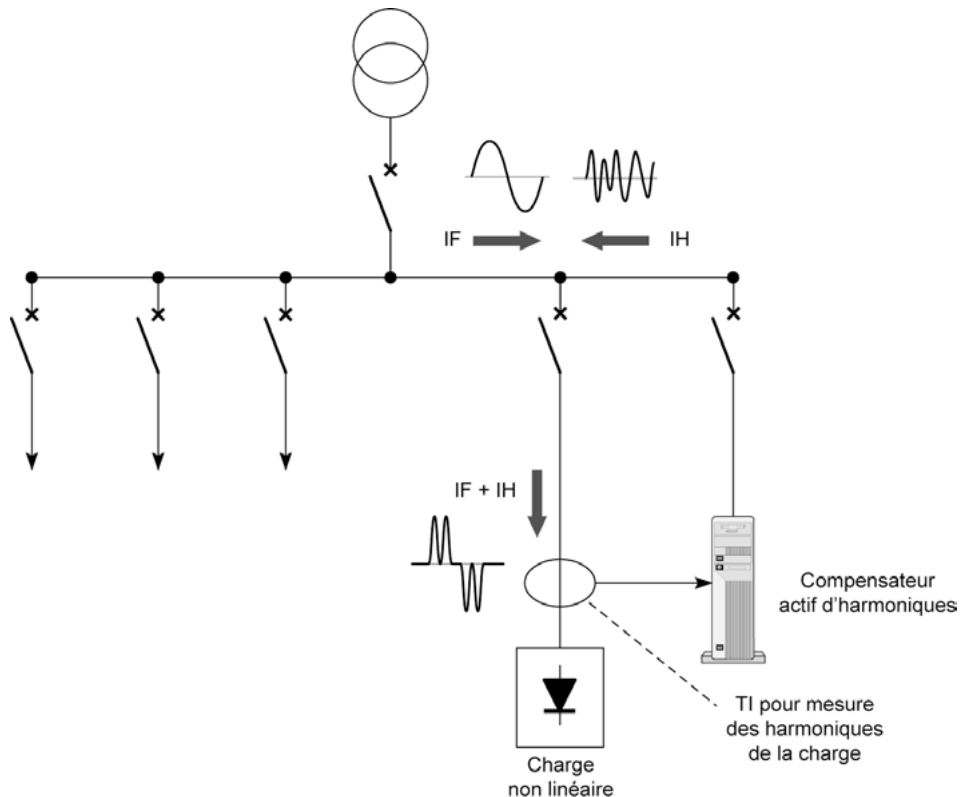


Figure 5.44 – TI en amont de charge.

Installation à un TI en amont du filtre actif et un TI en arrivée tableau

Ce type d'installation est adopté lorsque la mise en œuvre du TI sur le départ en amont de la charge est difficile à réaliser. Les deux TI utilisés doivent avoir des caractéristiques compatibles et complémentaires. Ils permettent de déterminer par différence le courant nécessaire à la compensation.

La figure 5.45 illustre une installation à 2 TI, l'un en arrivée de tableau, et l'autre en amont du filtre actif.

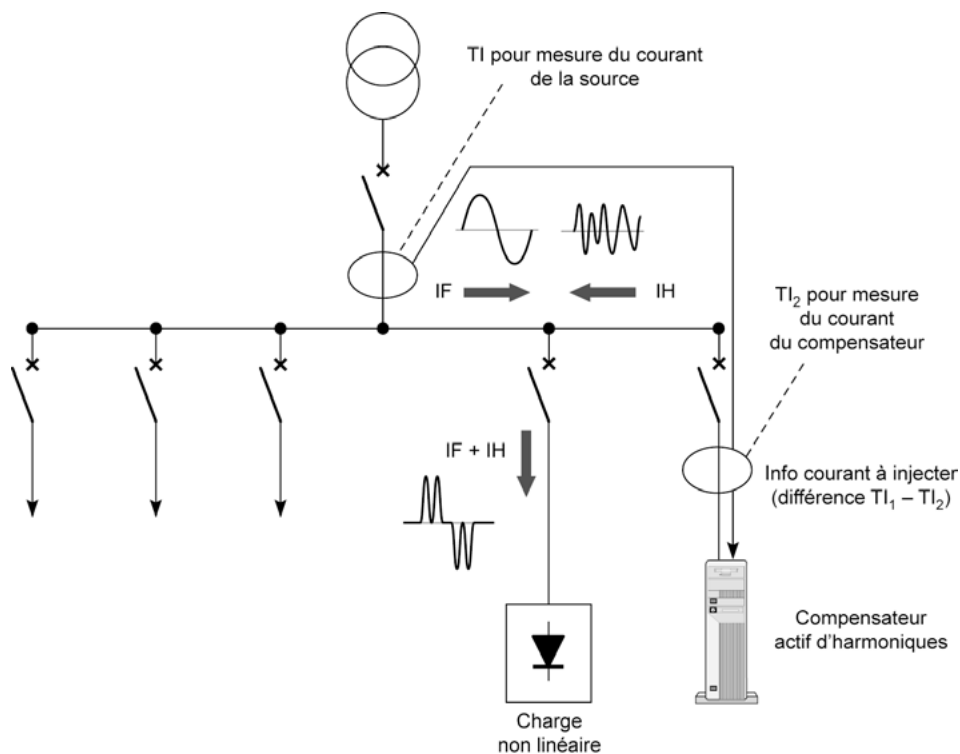


Figure 5.45 – Un TI en arrivée de tableau/Un TI amont de filtre.

□ **Les avantages d'une mise en œuvre de filtre actif de type SineWave™**

La mise en œuvre d'un filtre actif de type SineWave présente deux avantages majeurs :

- l'annulation des courants harmoniques compensés,
- la diminution du THDU au point d'insertion.

Annulation des courants harmoniques compensés

Le filtre actif de type SineWave™ fournit, par sa conception et pour les rangs harmoniques sélectionnés, un chemin d'impédance quasi nulle pour les courants harmoniques par rapport à celui de la source. Ceci supprime leur circulation en amont vers la source.

La figure 5.46 présente le cas d'une implantation de filtre actif de type SineWave™ entre deux tronçons de ligne ZL_1 et ZL_2 alimentant une charge classique RCD qui peut être monophasée ou triphasée (alimentations à découpage ou variateur de vitesse).

Les courants harmoniques IH_n qui traversaient les impédances Z_s et ZL_1 en amont du point de raccordement du compensateur sont supprimés. Seul demeure le courant fondamental équivalent IF.

C'est filtre actif de type SineWave™, qui mesure en permanence les courants harmoniques de la charge, qui fournit les courants harmoniques I_{H_n} à la charge par la boucle de faible impédance pour ces harmoniques qu'il constitue avec la charge.

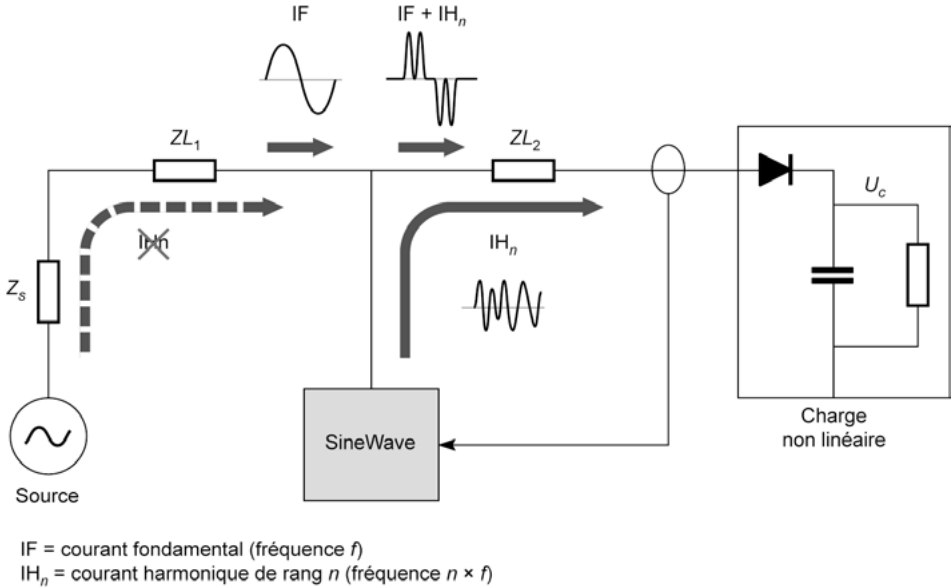


Figure 5.46 – Un TI entre deux tronçons de ligne ZL_1 et ZL_2 .

Diminution du THDU au point d'insertion

En amont du point d'insertion de SineWave, les courants harmoniques I_{H_n} sélectionnés (qui peuvent comporter tous les harmoniques jusqu'au rang 25) ne circulent plus vers la source.

Le taux global de distorsion en amont du point d'insertion, est :

$$\text{THDU \%} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} UH_n^2}}{UH_1}$$

ou UH_n est la chute de tension correspondant à l'harmonique I_{H_n} .

La suppression du courant harmonique d'un rang donné supprime la tension harmonique de rang correspondant. Il s'en suit une diminution importante du THDU, en sélectionnant les harmoniques les plus importants.

Comme à partir du rang 25 les taux individuels d'harmoniques sont négligeables, le THDU est pratiquement nul et la distorsion totalement éliminée si l'on choisit de compenser jusqu'au rang 25.

■ Le filtre homopolaire de type CleanWave®

Le filtre homopolaire de type CleanWave® permet de traiter les problèmes de courant dans le neutre en assurant :

- une réduction des courants dans le neutre dans un rapport de 10,
- une atténuation des courants harmoniques de rang 3 dans un rapport de 10,
- un rééquilibrage du courant dans les phases,
- une fiabilité exceptionnelle par une conception simple et fiable, s'apparentant à celle d'un transformateur sec et ne comportant :
 - aucun équipement électronique de puissance : seulement des selfs avec couplage magnétique et isolement galvanique,
 - aucun condensateur : pas de risque de résonance
- une mise en parallèle possible,
- des pertes négligeables : aucun apport de chaleur notable dans un local de serveur,
- une mise en œuvre simple et sûre.

La gamme de filtre homopolaire de type CleanWave® est conçue pour des installations dont le courant neutre est jusqu'à 1,8 fois supérieur au courant dans les phases. Le tableau 5.8 résume les caractéristiques principales d'applicabilité de la gamme de filtres homopolaires de type CleanWave®.

Tableau 5.8 – Caractéristiques principales de la gamme CleanWave®

Gamme	Puissance (kVA)	Courant Phase (A eff)	Courant neutre max (A eff)
Filtre homopolaire de type CleanWave®	12 à 280	16 à 401	29 à 722

□ Principe du filtre homopolaire de type CleanWave®

Le filtre homopolaire de type CleanWave® comporte deux éléments principaux :

- un élément L_0 connecté en série avec la charge,
- un élément Z_0 connecté en parallèle avec la charge.

Pour le fondamental et les courants harmoniques directs (I_{H_7} , $I_{H_{13}}$, $I_{H_{19}}$...) et inverses (I_{H_5} , $I_{H_{11}}$, $I_{H_{17}}$...) le filtre n'a pas d'effet. L_0 présente une impédance nulle et Z_0 agit comme une impédance très élevée et ne conduit pas le courant. Pour les courants harmoniques homopolaires (I_{H_3} , I_{H_9} ...), la situation est inverse :

- Z_0 est comparable à un court-circuit,
- L_0 présente une impédance élevée.

Les courants homopolaires sont donc court-circuités par Z_0 et seulement une infime partie (typiquement 10 %) est rejetée sur le réseau électrique. Par ailleurs les déséquilibres de courant de phases dus aux charges monophasées sont également en partie corrigés par le filtre.

Les figures 5.47 et 5.48 illustrent le principe de fonctionnement du filtre homopolaire de type CleanWave®.

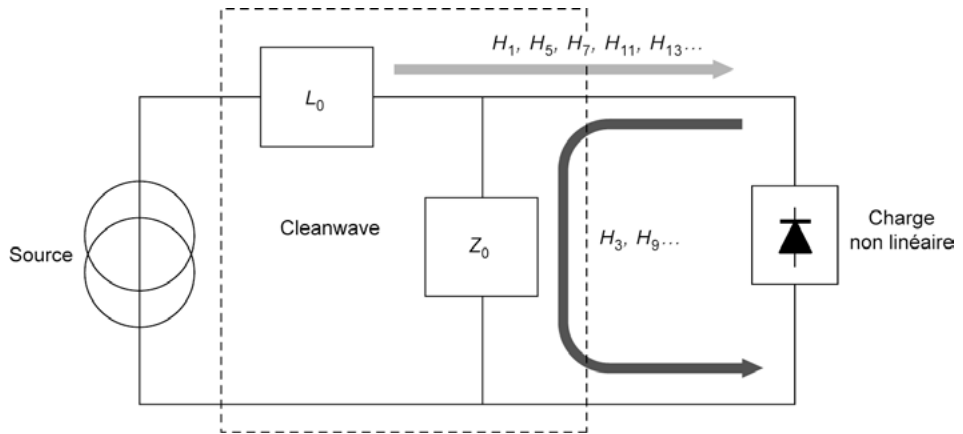


Figure 5.47 – Principe de fonctionnement du filtre CleanWave® (1)

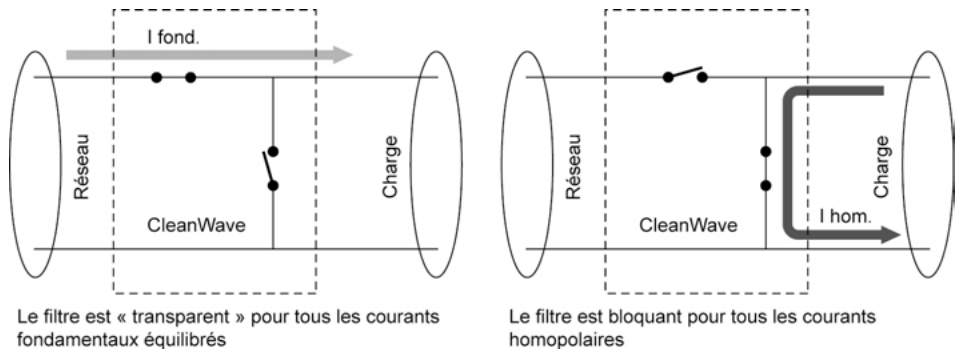


Figure 5.48 – Principe de fonctionnement du filtre CleanWave® (2)

□ **Conformité aux normes**

Le filtre homopolaire de type CleanWave® répond aux normes suivantes :

- NFC15-100
- CEI 61000-3-2, CEI 61000-3-4
- IEEE 519-2

□ **Les avantages d'une mise en œuvre de filtre homopolaire de type CleanWave®**

En plus de ses caractéristiques générales, le filtre homopolaire de type CleanWave® présente les avantages suivants :

- pas d'étude particulière avant installation,
- aucun risque de résonance,
- indépendance de la puissance de court-circuit,
- intégration en tout point de l'installation, indépendamment de la puissance du court-circuit,

- conducteur neutre libre de toute impédance,
- aucune maintenance requise.

5.5 Les solutions de l'avenir

La présence de charges déformantes sur de nombreux réseaux industriels nécessite d'apporter les solutions adaptées pour remédier à ces perturbations harmoniques par la mise de filtres passifs, actifs ou encore hybrides.

L'augmentation constante de ce type de charge sur les réseaux, associée aux exigences fixées par les distributeurs d'énergie électrique, imposent de nouvelles stratégies de la part des fabricants d'équipements d'électronique industrielle.

Les techniques, déjà opérationnelles au sein de nombreux dispositifs sur le marché, mettent en œuvre la technique de modulation de largeur d'impulsion dans les convertisseurs d'énergie électrique (MLI). Ce type de convertisseur est qualifié de propre puisqu'il ne pollue pas le réseau d'alimentation. Il agit en permanence pour réguler et pallier à la déformation du signal courant absorbé par la charge en question en réalisant la technique dit du prélèvement sinusoïdal et en reconstituant alors la sinusoïde courant. Le dispositif nécessite une régulation très rapide rendue possible aujourd'hui grâce aux nouveaux composants de l'électronique de puissance.

Lorsque ces convertisseurs sont évolués, ils associent à cette démarche une compensation auto adaptative du facteur de puissance de l'installation, améliorant ainsi les performances électriques de l'équipement dans sa globalité.

6 • LA MESURE DE LA QUALITÉ

L'analyse et le diagnostic d'une installation électrique passent avant tout par la mesure, qui constitue la clef de voûte de la réussite de l'optimisation recherchée d'une démarche qualité réseau.

Les résultats numériques identifiés des creux de tension, flicker, variations de fréquence ou surtension ainsi que ceux des harmoniques sont les indicateurs nécessaires pour analyser une installation électrique en termes de qualité réseau (les critères et définitions de ces paramètres ont été présentés dans le chapitre 4).

Les appareils de mesure actuels, portables ou fixes, autorisent une collecte et une analyse simplifiées pour permettre aux exploitants de sites, industriels ou tertiaires, de diagnostiquer les dysfonctionnements électriques constatés sur leurs installations.

Nous vous présentons, dans ce chapitre, un échantillonnage non exhaustif de ces équipements de mesure, indispensables aujourd'hui pour les relevés des paramètres de la qualité réseau d'une installation électrique. La pollution harmonique constituant aujourd'hui à ce jour une problématique grandissante dans les installations électriques basse tension, nous nous attachons particulièrement à développer au sein de ce chapitre les moyens et les outils mis en œuvre pour identifier et remédier à cette pollution réseau.

La mesure est un élément fondamental dans l'optimisation énergétique d'une installation, placée au cœur donc de l'efficacité énergétique. Cet aspect sera bien entendu conforté dans les chapitres suivants en visant l'objectif double d'associer optimisation de la production et réduction de la facture énergétique.

6.1 Spécificités de la pollution harmonique

La détection de la présence de pollution harmonique sur un réseau d'alimentation est rendue possible grâce à la mesure des tensions harmoniques agissant sur la qualité de l'onde sinusoïdale de tension de l'installation électrique concernée.

La localisation des charges déformantes dans ce cas est obtenue grâce à la mesure des courants harmoniques circulant dans les différentes branches du réseau électrique permettant ainsi d'identifier les charges à l'origine de la génération d'harmoniques.

La photo de la figure 6.3 montre une application de mesure de courants harmoniques sur une charge déformante.

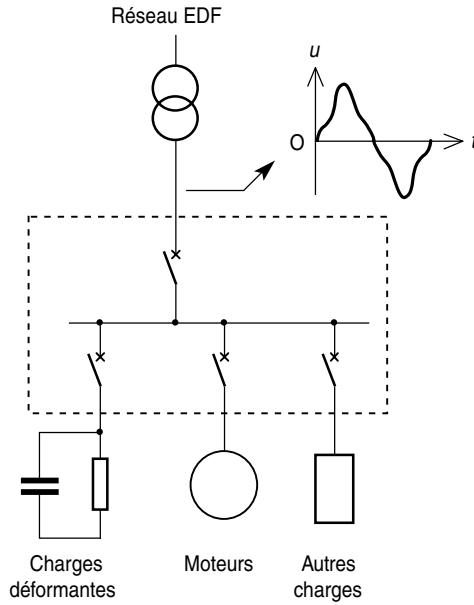


Figure 6.1 – Mesure de tensions harmoniques.

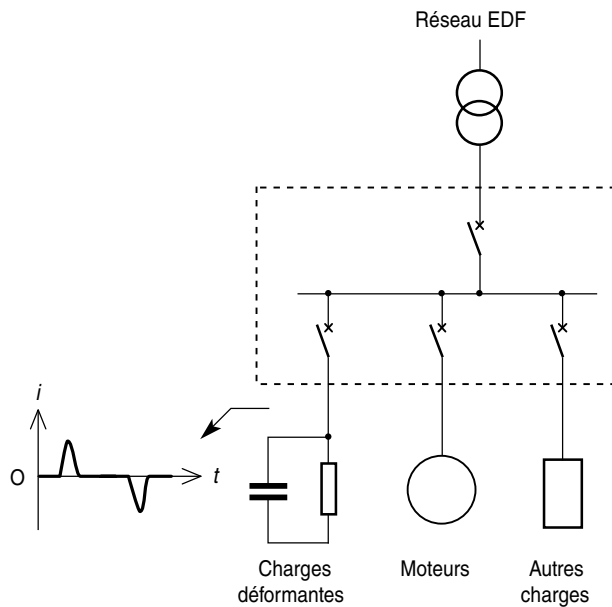


Figure 6.2 – Mesure de courants harmoniques.

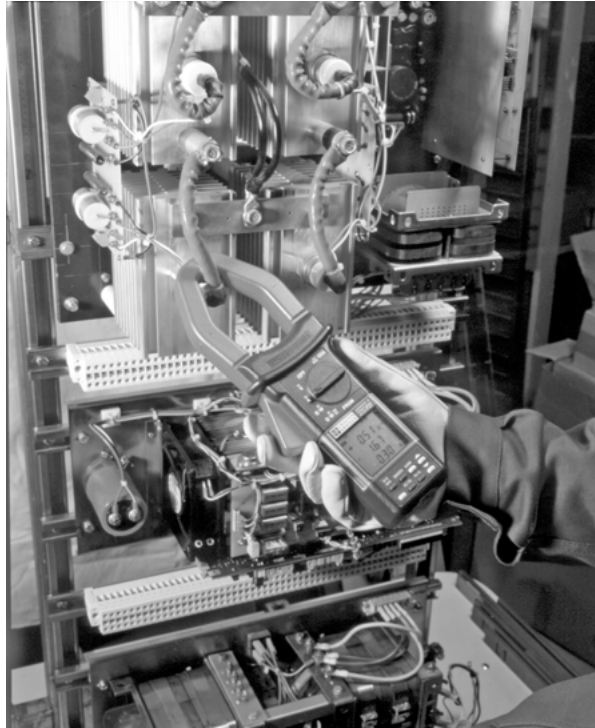


Figure 6.3 – Mesure de courants harmoniques sur équipement pollueur. © Chauvin Arnoux

La valeur du taux de distorsion harmonique globale en tension qui sera mesuré sur une installation peut être rapprochée du tableau 6.1 suivant, tableau élaboré à la suite de travaux menés au travers de nombreuses interventions et expérimentations d'experts dans ce domaine. Bien entendu, les valeurs normalisées ont été précisées dans un précédent chapitre de notre ouvrage. Il s'agit là de se forger une première idée, dès la mesure effectuée, de la présence ou non de pollution harmonique sur le réseau électrique intéressé par la mesure.

Tableau 6.1 – Conséquences liées aux valeurs typiques des taux d'harmoniques globaux.

Taux global de distorsion harmonique en tension	Conséquence en termes d'harmoniques
$THD \leq 5 \%$	Problèmes inexistant dans la plupart des cas.
$5 \% \leq THD \leq 7 \%$	Apparition de dysfonctionnements sur les matériels anormalement sensibles.
$7 \% \leq THD \leq 10 \%$	Présence de dysfonctionnements sur des appareils de conception plus robuste.
$THD \geq 10 \%$	Les effets néfastes à long terme sont pratiquement certains.

L'identification de la cause et donc des équipements perturbateurs sur un réseau va pouvoir s'effectuer par la mesure des courants harmoniques afin de remonter en amont de la charge déformante.

On veillera à réaliser les mesures dans les périodes de fonctionnement supposées fortement « polluées » ou lorsque les charges non linéaires sont en fonctionnement.

On relève ainsi les périodes critiques dans les plages de fonctionnement suivantes :

- pour le domaine du domestique : entre 20 h et 22 h 00 (équipement TV, halogène, machine à laver),
- pour le secteur tertiaire et la petite industrie : entre 10 h 00 et 18 h 00 (informatique, machines-outils),
- pour le secteur industriel (grosse industrie) : génération d'harmoniques constants quel que soit l'horaire.

D'autre part, il faudra prendre en compte le fonctionnement simultané ou non des charges polluées et interroger l'utilisateur du réseau pour connaître la période critique pendant laquelle les perturbations sont maximales.

De nombreux équipements existent à ce jour dans le domaine de la mesure des harmoniques afin de permettre la mesure de ces données. Ces mesures sont rendues facilement accessibles notamment grâce au développement des instruments portables et de technologie numérique répondant aux exigences de terrain des techniciens et des artisans électriciens.

6.2 Différents niveaux d'analyse harmonique

Lors d'un précédent chapitre, nous avons déjà évoqué la nécessité d'utiliser des appareils de mesure de technologie adaptée, c'est-à-dire capables de mesurer la valeur réelle efficace du signal courant ou du signal tension. Pour l'appareil de mesure, le calcul de la valeur réelle efficace d'un signal composé d'harmoniques, implique un échantillonnage rapide, une modélisation et un calcul numérique de cette valeur efficace. Cela se traduit par un équipement de mesure quelque peu plus coûteux à l'achat mais indispensable pour quantifier précisément la valeur efficace du signal courant et tension dans une installation électrique et produire une analyse adaptée.

Les technologies en question font référence aux technologies récentes des appareils de mesure intégrant l'échantillonnage rapide du signal, la modélisation et le calcul numérique de la valeur efficace. Il est à noter que certains appareils de mesure, moins récents, intègrent déjà la valeur réelle efficace du signal mesuré lorsqu'ils sont dotés de la technologie ferromagnétique.

Dans ce chapitre, nous allons développer les techniques de mesures associées à l'utilisation des appareils de mesure portatifs de terrain au travers de cas concrets sur des équipements individuels ou des installations. Ceci de manière à bien situer la nature de la pollution harmonique dans le cas où elle est présente sur l'installation étudiée. De ce fait, l'analyse et l'interprétation des données mesurées pourront se faire de manière claire à partir d'un équipement approprié et sans équivoque sur la situation en termes de pollution harmonique de l'installation.

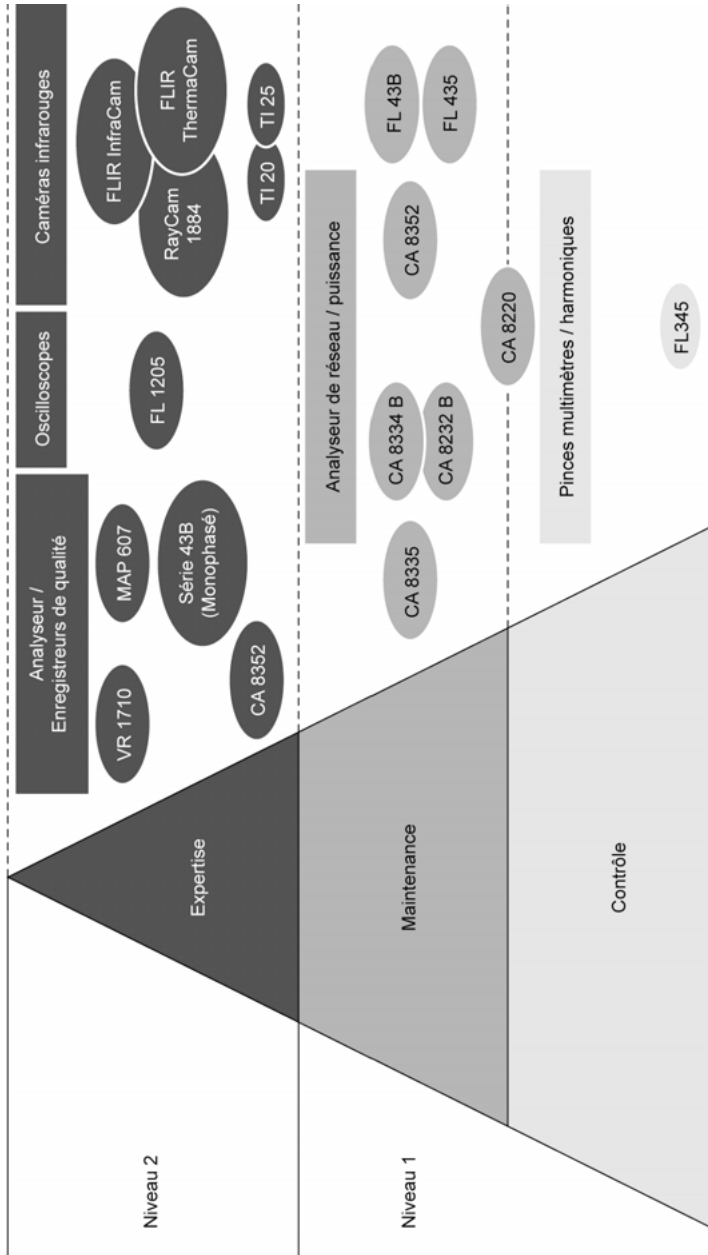


Figure 6.4 – Deux niveaux d'analyse harmonique.

Les pratiques de mesure présentées ici mettent l'accent sur l'exploitation des outils de mesures ainsi que sur les données à relever (U efficace, I efficace, $THD...$) de manière à pouvoir les exploiter ultérieurement :

- soit dans le but d'évaluer la situation d'une installation en termes de qualité de l'énergie électrique ;
- soit dans le cadre de la remédiation (remontée vers un bureau d'études, calcul de filtres).

Les études de cas présentant les solutions de remédiation sont développées dans le chapitre 5 Les techniques de filtrage.

Dès à présent on peut considérer deux niveaux d'analyse de la pollution harmonique, dont la mesure est réalisée à l'aide des appareils appropriés, tels que représentés dans la figure 6.4.

Les deux niveaux d'analyse harmonique consistent en :

- **Niveau 1 – Évaluation globale de l'installation électrique en terme de pollution harmonique (Contrôle et maintenance)**
 - Mesure du facteur de crête F_c et du taux d'harmonique global en tension THD .
 - Comparaison avec la norme (voir chapitre 4) et les recommandations en vigueur.
 - Statuer sur la présence significative ou non de la pollution harmonique au sein de l'installation.
- **Niveau 2 – Remédiation à la pollution harmonique sur une installation électrique (Expertise)**
 - Mesure des taux individuels d'harmonique en courant pour les rangs considérés.
 - Intégration des éléments du réseau électrique (impédance source, impédance câbles, etc.).
 - Étude des solutions de filtrage.
 - Mise en œuvre, réglage des filtres.
 - Vérification de l'efficacité de la remédiation par mesure du taux global d'harmonique en tension.

Le positionnement des appareils de mesure associés aux deux niveaux d'analyse est indicatif et non exhaustif. Les équipements mentionnés peuvent être opérationnels pour d'autres niveaux d'intervention, de même que d'autres références sont proposées sur le marché par les fabricants d'appareils de mesure.

6.3 Appareils de mesure des harmoniques et de la qualité des réseaux

6.3.1 La mesure des harmoniques

Différentes techniques et méthodes de mesure peuvent être utilisées pour évaluer la pollution harmonique sur un réseau industriel ou une installation électrique quelle que soit.

Il est tout d'abord nécessaire de resituer dans quel cadre et dans quel objectif vont s'effectuer les mesures : simple évaluation globale de l'état d'un réseau de distribution en vue de statuer sur la qualité de celui-ci, remontée des données de mesures harmoniques vers un bureau d'études en vue du dimensionnement du filtre approprié, essais en laboratoire des caractéristiques de matériels.

Aussi, il est impératif de choisir le niveau de sophistication de l'équipement en fonction du type de mesure à réaliser. Notons que la publication CEI 61000-4-7 précise les conditions de mesures et d'essais pour les harmoniques.

Il est à noter, de manière pratique, qu'une simple mesure du facteur de crête du signal, courant ou tension, permet de savoir si l'on a affaire à un signal déformé ou non. En effet, lorsque l'on s'éloigne de la valeur fatidique de $\sqrt{2}$ (1,414) pour le facteur de crête, on est en présence d'un signal déformé. D'autre part, la visualisation de la déformation de l'onde du signal, tension ou courant, peut être observée à l'aide d'un oscilloscope et d'une pince de mesure appropriée (voir exemple figure 6.5).

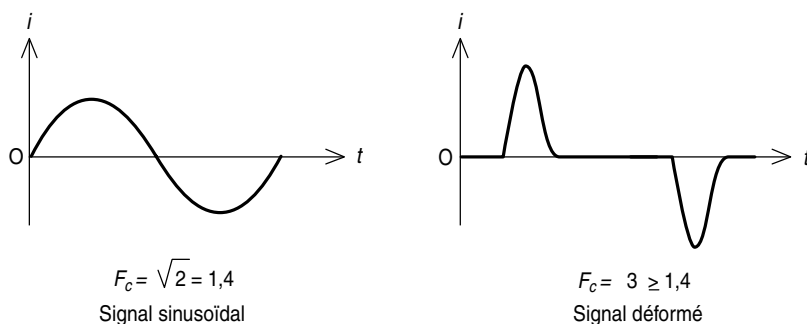


Figure 6.5 – Exemple de déformation d'un signal courant.

Dans la pratique hebdomadaire du technicien en électrotechnique ou de l'artisan électricien, on distingue deux niveaux de tâches relatifs aux problèmes de la pollution harmonique :

- **Une analyse de premier niveau** : repérer, identifier, qualifier le niveau de pollution harmonique sur une installation électrique et comparer avec la norme ou les recommandations en vigueur.
- **Une analyse de deuxième niveau** : quantifier le niveau de pollution harmonique par rang harmonique afin de définir le type de filtrage à mettre en œuvre ou de fournir ses indications à un bureau d'études compétent dans le domaine du calcul de filtres.

De ce fait, le matériel de mesure pris en référence tout au long de ce chapitre répond à ces deux niveaux d'exigence et va nous permettre de réaliser les mesures sur des équipements de natures diverses comportant plus ou moins d'électronique intégrée dans le dispositif de commande ou dans le dispositif d'alimentation.

Les principales grandeurs restituées par les instruments de mesure nous intéressant sont les amplitudes des tensions et des courants harmoniques, caractérisées par les valeurs suivantes :

- taux harmonique pour chaque rang des courants et tensions,
- taux de distorsion harmonique global du courant et de la tension,
- puissance harmonique ou déphasage entre tension et courant harmoniques de même rang.

La mise en évidence de ces valeurs requiert un matériel de mesure adapté tels que :

- caméras infrarouges,
- analyseur de réseau,
- pinces harmoniques.

Ces outils de mesure s'adressent au technicien, à l'artisan électricien ou encore à l'étudiant en cours de formation.

Les matériels auxquels nous faisons référence dans le chapitre présent sont fabriqués par les sociétés Chauvin-Arnoux, Fluke et Flir Systems. Tous ces appareils répondent aux deux normes EN 50160 et CEI 61000-4-30 de façon à mesurer les paramètres de la même manière et fournir ainsi des résultats comparables quel que soit le constructeur.

La norme EN 50160 fixe les paramètres qui qualifient la tension délivrée par un réseau électrique (tension efficace, coupure, creux de tension, surtension, flicker, fréquence, harmoniques, déséquilibre du système triphasé, etc.).

La norme CEI 61000-4-30 fixe les critères de qualité de la mesure d'une alimentation électrique. Elle spécifie des directives de conception et de fabrication pour les appareils de mesure. Elle décrit les effets de transducteurs, les précautions à prendre pour installer des instruments de mesure sur des circuits sous tension. À la date de publication de cet ouvrage, la norme CEI 61000-4-30 dispose de deux versions qui distinguent le niveau de précision des paramètres mesurés : version A pour la vérification contractuelle de la conformité aux normes et version B pour la supervision qualitative et le dépannage où une certaine incertitude est tolérable. Prochainement, une version F devrait fixer un niveau de précision plus sévère (supervision statistique et contractuelle sans risque d'opposition de tiers),

À noter que seuls les instruments conformes à l'IEC 61000-4-30 classe A peuvent faire office de preuves irréfutables en cas de conflit.

6.3.2 Les pinces harmoniques

La plupart du temps la mesure des harmoniques n'est qu'une possibilité parmi d'autres offerte par les pinces de puissance et d'harmoniques. La grande majorité des offres sur le marché de ce type d'appareil de mesure consiste dans la mise à disposition d'un ampèremètre, d'un voltmètre, d'un wattmètre monophasé et triphasé, et enfin d'une fonction de mesure des harmoniques. Certaines de ces pinces fonctionnent en courant alternatif et continu.

La fourchette de mesure ainsi que la précision varie selon les modèles et les constructeurs.

Les principales grandeurs mesurables sont listées ci-après.

- Valeur Vraie (True RMS),
- Intensité,
- Tension,

- Facteur de puissance et de déplacement de puissance,
- Mesure des harmoniques rang par rang,
- Affichage sur écran rétro éclairé,
- Interface de communication pour export des données de mesure vers PC ou imprimante,
- Logiciel de traitement et de présentation des données,
- Conformité IEC 1010-2-032.

À titre d'exemple, Fluke propose la pince multimètre 345 (figure 6.6) à haute immunité EMC. Elle réunit les fonctions d'un énergimètre, d'un enregistreur de qualité d'énergie et d'une pince multimètre, pour la surveillance des charges électroniques.

Son affichage en couleur lumineux permet la visualisation du spectre des harmoniques, et son filtre passe-bas élimine les bruits de haute fréquence.



Figure 6.6 – La pince Fluke 345.

Pour toutes les caractéristiques des pinces harmoniques Fluke : www.fluke.fr.

6.3.3 Les analyseurs de qualité réseau

Selon les modèles, les analyseurs de réseau proposent toutes ou partie des fonctions suivantes :

- **Mesure de grandeurs électriques** : U , V , I , P , S , Q , Fp , V_{cc} , F , Q_{comp} , en valeurs maximales, minimales et moyennes.
- **Analyse de perturbations** : microcoupures, variations lentes de tension, pic de tension, flicker, bruit haute fréquence, saut de fréquence, symétrie des tensions, etc.
- **Analyse d'harmoniques** : au maximum jusqu'au 50^e rang, THD global et rang par rang, déphasage de chaque harmonique, etc.

- **Traitement de l'information** : ports de communication pour la télérelève, programmation de campagne de mesures, logiciels associés pour stockage et suivi des valeurs, rédaction de rapports en temps réel (représentation vectorielle ou temporelle, dépouillement et tri statistique, etc.).

■ L'offre des principaux constructeurs

Les principaux industriels proposant des analyseurs de réseau sont :

- Chauvin Arnoux
- Fluke

□ L'offre de Chauvin Arnoux

Le modèle CA 8335 (figure 6.7) offre quatre entrées Tension et quatre entrées Courant pour la mesure de tous les paramètres de tension, courant et puissances jusqu'au diagnostic complet d'une installation électrique. Il capture et enregistre simultanément tous les paramètres, transitoires, alarmes et forme d'ondes. Ces données sont affichables en temps réel sur un écran couleur de 6" en mode graphique ou tableau. Sa capacité mémoire permet l'enregistrement de tous les paramètres sur une durée de plus d'un mois.



Figure 6.7 – L'analyseur de réseau CA 8335.

© Chauvin Arnoux

Les modèles CA 8332 et 8334 (figure 6.8) sont spécifiquement conçus pour le contrôle et la maintenance des réseaux de bâtiments industriels ou administratifs. Tous deux sont compacts et maniables, couvrent les mêmes normes EN 50160 et IEC 61000. Ils se différencient par leur capacité mémoire (2 ou 4 Mo) et d'enregistrement d'écrans (8 ou 12).



Figure 6.8 – L'analyseur de réseau CA 8334.

© Chauvin Arnoux

Le modèle CA 8352 (figure 6.9) se distingue par un mode oscilloscopique, une capacité de stockage de 10 Go, un écran de 10" et propose des fonctions d'analyse développées des courants harmoniques :

- Décomposition jusqu'au 50^e rang.
- Mesure de tension et de courant H_n par rapport au fondamental et en absolu.

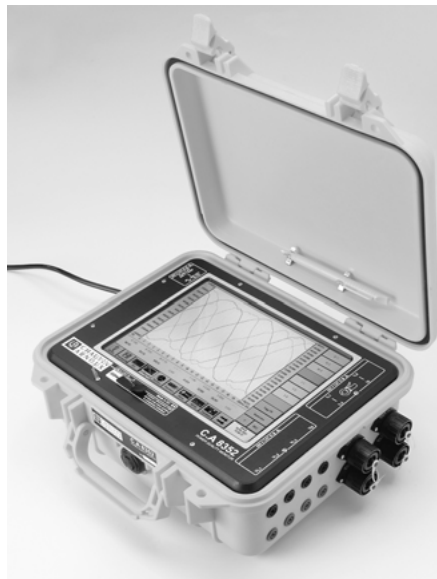


Figure 6.9 – L'analyseur de réseau CA 8352.

© Chauvin Arnoux

- Déphasage de chaque harmonique.
- THD global et rang par rang (taux total de distorsion H_n).
- Reconnaissance du sens de chaque rang harmonique.
- Représentation FFT des tensions et courants.
- Dépouillement statistique.

Pour toutes les caractéristiques des analyseurs Chauvin Arnoux :
www.chauvin-arnoux.fr.

□ L'offre de Fluke

Le modèle 43B (figure 6.10) regroupe l'ensemble des fonctions proposées par les analyseurs de réseaux.



Figure 6.10 – L'analyseur de réseau Fluke 43B.

La gamme Série 430 propose un ensemble d'appareils portatifs conformes aux standards du marché, mais aux caractéristiques démultipliées comme la vitesse d'échantillonnage de 200 paramètres par seconde sur les trois phases, la possibilité d'enregistrer 400 paramètres à une résolution allant d'une minute à un mois, une autonomie de sept heures, la visualisation en mode oscilloscope.

Les appareils 1735, 1740 et 1760 sont plus spécialement destinés aux techniciens chargés de réaliser des études énergétiques et de qualité de réseaux en effectuant des enregistrements de paramètres conventionnels et de leurs harmoniques sur 85 jours.

Ils offrent également la possibilité de produire des rapports via un logiciel spécifique fourni avec l'appareil.

Pour toutes les caractéristiques des analyseurs Fluke : www.fluke.fr.



Figure 6.11 – L'analyseur de réseau Fluke 435.

6.3.5 Les enregistreurs de qualité réseau

Les enregistreurs de qualité réseau ont pour vocation de collecter et mémoriser les caractéristiques d'un réseau monophasé et/ou triphasé. Ils répondent à une approche d'observation continue afin de qualifier en permanence le réseau supervisé.

Les enregistreurs de qualité réseau se déploient à poste fixe, la plupart du temps à proximité du transformateur du point de livraison. Leur mise en œuvre est très facile par simple branchement sur une prise domestique 230 V.

Les paramètres de qualimétrie mesurés sont conformes au standard EN 50160 et CEI 61000-4-30, classe A. L'interprétation des données collectées est réalisée via les logiciels d'analyse et de visualisation associés.

■ L'offre des principaux constructeurs

Les principaux industriels proposant des enregistreurs de qualité réseau sont Chauvin Arnoux et Fluke.

□ L'offre de Chauvin Arnoux

La gamme MAP 600 offre un spectre très large d'acquisition et d'analyse pour les réseaux moyenne et basse tension. Le modèle MAP 607, analyseur de qualité réseau monophasé de classe A (CEI 61000-4-30) (figure 6.12), dernier né des enregistreurs monophasés de Chauvin Arnoux permet d'enregistrer et d'analyser la plupart des paramètres de qualimétrie d'un réseau et présente les caractéristiques suivantes :

- Tension de fonctionnement : 90 à 264 V
- Gamme de fréquence : 50 Hz
- Niveau de sécurité : Cat III 300 V

- Nombre de voies enregistrées : deux (Phase au neutre – Phase/Neutre à la terre)
- Nombre d'événements : 16 000
- Harmoniques jusqu'au 50^e rang (Conformité EN 61000-4-7)
- Harmonique en puissance
- THD
- Flicker (Conformité EN 61000-4-15)
- Tension min/moy/max
- Creux/Surtension
- Transitoires
- Variation rapide de tension
- Signaux de télécommande
- Logiciels associés pour la visualisation en temps réel et l'analyse des fichiers rapatriés.

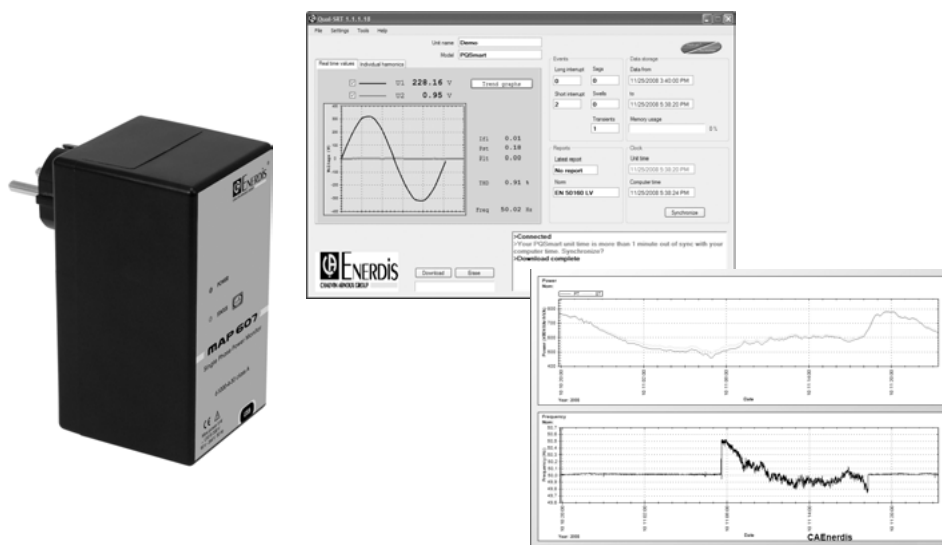


Figure 6.12 – Le MAP 607 et deux exemples d'écrans de visualisation et d'analyse.

© Chauvin Arnoux

L'analyseur de réseau MAP 607 peut être utilisé comme instrument de référence conformément au standard CEI 61000-4-30 Classe A. Il se branche simplement sur une prise monophasée 230 Volts et mesure la qualité du réseau selon le standard spécifié (EN50160).

Il dispose de deux logiciels associés :

- **Qual-SRT** : pour la configuration, la visualisation en temps réel et le rapatriement des données,
- **Qual-View** : pour l'analyse des fichiers rapatriés, la génération de rapports standard de type EN50160.

Pour toutes les caractéristiques des enregistreurs de qualité réseau Chauvin Arnoux : www.chauvin-arnoux.fr.

□ L'offre de Fluke

Le modèle VR 1710 monophasé (figure 6.13) présente les caractéristiques générales et les possibilités d'enregistrement suivantes :

- Tension de fonctionnement : de 70 à 300 V
- Gamme de fréquence : 50 Hz et 60 Hz
- Niveau de sécurité : Cat II 300 V
- Nombre de voies enregistrées : deux (Phase au neutre – Phase/Neutre à la terre)
- Nombre d'événements : 17 500
- Durée d'enregistrement : de 1 à 339 jours selon le temps de moyennage d'une seconde à vingt minutes.
- Creux/coupures
- Surtensions
- Fréquence
- Transitoires
- Harmoniques jusqu'au 32^e rang (Conformité à EN 61000-4-7)
- Flicker (Conformité à EN 61000-4-15)
- Logiciel associé : Power Log

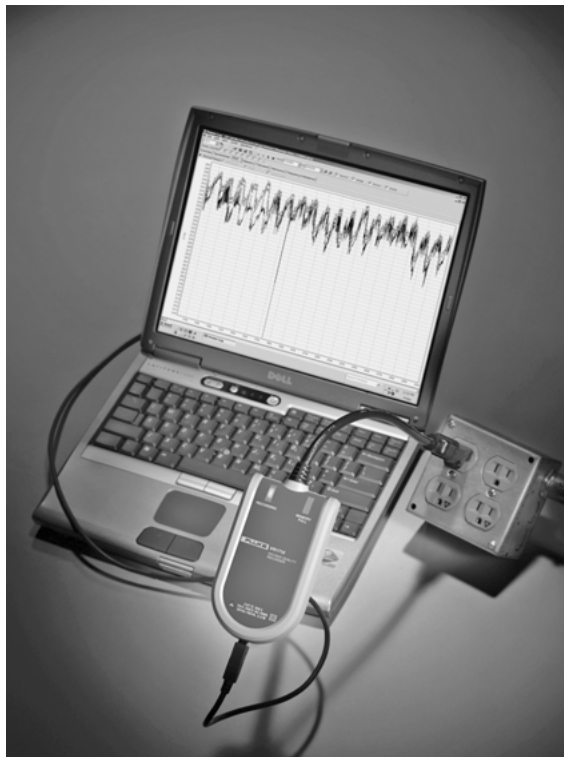


Figure 6.13 – Le VR 1710 interfacé avec un PC pour l'exploitation des enregistrements.

Pour toutes les caractéristiques des enregistreurs de qualité réseau Fluke : www.fluke.fr

6.3.5 Les caméras infrarouges

Les développements récents des technologies de l'infrarouge et la généralisation de ses applications rendent plus accessibles à l'achat les caméras infrarouges. Elles ont un rôle de plus en plus important à jouer en matière de maintenance préventive en anticipant les problèmes avant qu'ils n'apparaissent et ne provoquent des dysfonctionnements dans les installations. L'intérêt des caméras infrarouges réside principalement dans la possibilité de réaliser des mesures sans contact et de collecter en toute sécurité des données d'un système en fonctionnement ou d'un système sous tension.

Les caméras infrarouges utilisent le rayonnement infrarouge pour la mesure de la température de surface et de ses variations temporelles et spatiales. La caméra est conçue pour transformer une image captée dans le domaine infrarouge en fonction de la luminance de l'objet observé, en une image visible et analysable par l'œil humain.

L'information de température est un indicateur précieux de l'état d'un système mécanique ou électrique, dont les variations permettent de localiser visuellement les points chauds qui signalent ou annoncent des symptômes de pannes ou de problèmes. Les figures 6.14 et 6.15 illustrent comment l'usage de caméras infrarouges permet de localiser des échauffements anormaux dus à un défaut de connexion, ou l'échauffement anormal d'un moteur.



Figure 6.14 – Échauffement anormal résultant d'un défaut de serrage de bornes sur un contacteur de lignes.

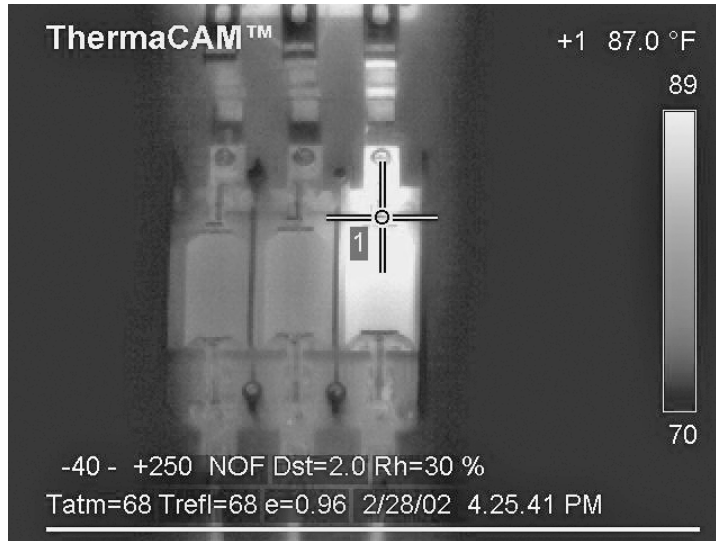


Figure 6.15 – Échauffement anormal lié à la surcharge d'une phase.

Les caméras infrarouges s'imposent donc de plus en plus comme incontournables pour détecter des problèmes de mauvaise connexion, de conducteurs en surcharge, de courts-circuits et défaut à la terre ou de problèmes mécaniques.

Utilisées dans le cadre d'une évaluation de courants harmoniques, les caméras infrarouges permettent de détecter des surchauffes significatives dans les réseaux de distribution du courant électrique, particulièrement dans les conducteurs à la masse.

■ Quelques notions théoriques essentielles

Un matériau émet naturellement ou non de la chaleur qui consiste en un rayonnement d'ondes électromagnétiques caractérisées par leur énergie et leur longueur d'onde. Pour des niveaux de température courants sur Terre (de -50 °C à $2\,000\text{ °C}$ environ), les ondes émises naturellement par les matériaux se positionnent dans une zone appelée l'infrarouge thermique (figure 6.16).

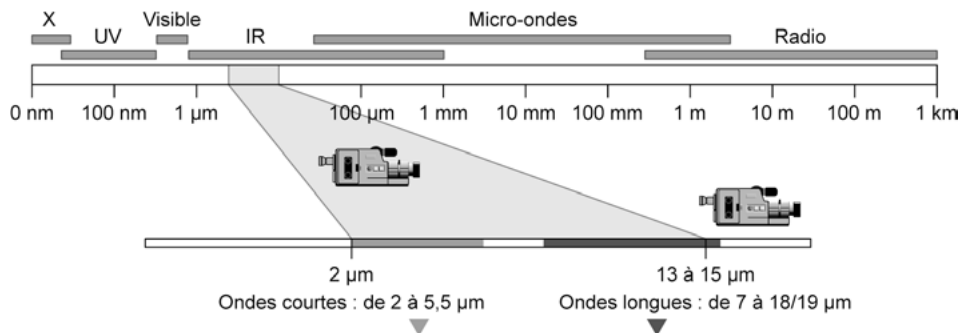


Figure 6.16 – L'infrarouge thermique.

La thermographie infrarouge est basée sur une technologie de détection du rayonnement, permettant à un utilisateur de visualiser et/ou de mesurer de faibles écarts de température. Selon la technologie du détecteur utilisé, le rayonnement est mesuré dans une fourchette de longueurs d'ondes comprise entre 2 et 5 μm ou entre 7 et 19 μm auxquelles l'œil humain est absolument insensible. La figure 6.17 illustre le spectre électromagnétique dans sa totalité.

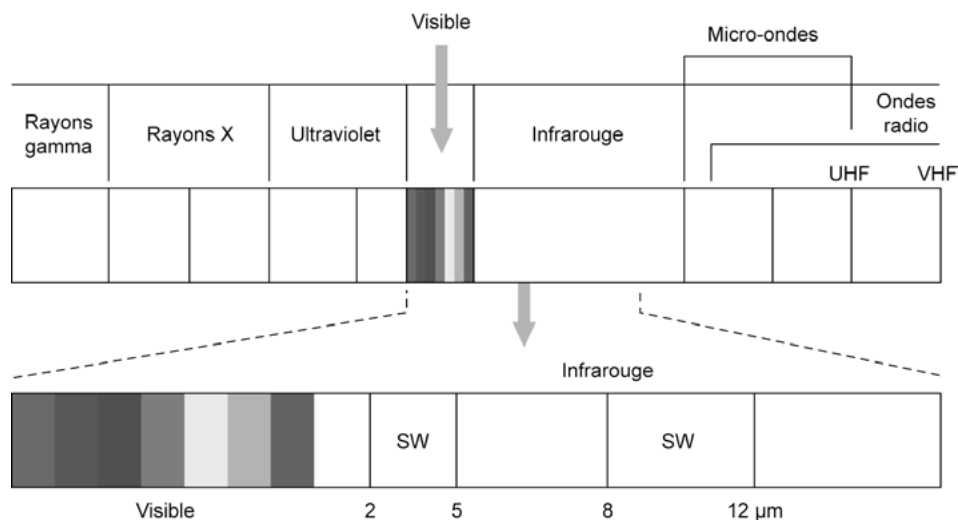


Figure 6.17 – Le spectre électromagnétique.

■ Les critères de choix d'une caméra infrarouge

La fréquence de manipulation par le ou les techniciens dans leurs campagnes de mesure nécessite de tenir compte du poids, de l'encombrement, de la robustesse et de l'ergonomie de la caméra. L'autonomie en alimentation est aussi un critère important.

Les caractéristiques métrologiques suivantes sont essentielles.

□ Le type de détecteur

Une matrice de 160×120 pixels suffit pour des applications de maintenance.

Une matrice de 320×240 pixels est réservée aux solutions expertes (étude de petits objets à grande distance ou des lignes à haute tension par exemple).

□ La résolution optique d'une caméra infrarouge

La résolution optique de mesure est la notion essentielle pour caractériser la capacité de mesure d'une caméra infrarouge. Cette performance de mesure s'exprime soit par la valeur du plus petit élément mesurable soit par un ratio D/S , D étant la distance caméra-objet et S le diamètre du spot de mesure.

Une résolution optique de mesure inadaptée entraîne une erreur de mesure pouvant avoir de graves conséquences sur le diagnostic réalisé.

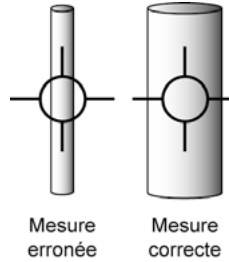


Figure 6.18 – Mesure erronée/Mesure correcte.

Dans la figure 6.18, la mesure erronée, effectuée à 1 m avec un coefficient de 0,9, donne une valeur de 50,9 C, alors que la mesure correctement réalisée à 30 cm du câble donne 60,1 C. Soit une erreur de 10 C sur la mesure.

Le Pouvoir de résolution spatiale d'observation (PRSO)

Le PRSO est le produit du nombre de détecteurs sur une ligne (dite horizontale), ndH et du nombre de détecteurs sur une colonne (dite verticale), ndV : $ndH \times ndV = 320 \times 240$ (par exemple)

L'IFOV

L'IFOV (*Instantaneous Field Of View*) désigne l'angle sous lequel un « pel » (point élémentaire carré) de la matrice voit sa surface élémentaire ΔS de la scène thermique :

$$IFOV (^{\circ}) = HFOV/dH = VFOV/dV$$

Pour des raisons pratiques, on préfère exprimer l'IFOV en mrad ou en millimètres à la distance de mesure : mm@Dm. Ainsi, le PRSO d'une caméra disposant d'un objectif de HFOV = 18 ° et d'une matrice de 160 × 120 détecteurs peut ainsi être exprimé par la valeur de l'IFOV : 2 mrad ou 2 mm@1mètre ou encore 4mm@2mètres (ce qui est plus parlant pour le technicien qui effectue la mesure). À ce titre, dans le cas de la mesure de la température d'un fil isolé de 1,2 mm de diamètre, si on dispose d'une caméra avec un IFOV de 1,2 mm@60 cm, l'image du fil couvre intégralement la surface d'un « pel ».

La résolution thermique

Elle définit le contraste thermique et donne à l'image une certaine netteté. Cette caractéristique est à associer à la fréquence d'analyse.

La fréquence d'analyse

Elle correspond au temps d'intégration nécessaire pour obtenir une image convenable sur l'affichage de la caméra. Avec un temps d'intégration important, on peut améliorer la netteté de l'image sans pour autant obtenir une bonne résolution thermique.

L'étendue de mesure aux basses températures

Elle prouve l'aptitude du capteur à être sensible aux faibles flux thermiques.

□ L'incertitude de mesure

C'est un critère non déterminant dans les applications de maintenance, car les caméras thermiques sont alors utilisées pour mettre en évidence le dépassement d'un seuil critique de température et non pour effectuer des mesures précises de température.

■ Comment utiliser les caméras infrarouges

Pour utiliser une caméra infrarouge dans meilleures conditions, les quelques règles suivantes doivent être respectées :

- L'objet ciblé pour la mesure doit avoir une émissivité suffisante.
- L'objet ciblé doit avoir une taille suffisante.
- L'objet ciblé doit être vu dans un angle de $\pm 45^\circ$ par rapport à un axe frontal.
- S'assurer que l'environnement ne vient pas perturber la mesure (courants d'air, etc.).
- Avant de réaliser une mesure, l'image de l'objet ciblé doit être nette ;
- Composer l'image thermique en adaptant la gamme de température, la gamme d'étalonnage, l'intensité de l'affichage.

■ L'offre des principaux constructeurs

Les principaux industriels proposant des caméras infrarouges sont :

- Chauvin Arnoux
- Fluke
- Flir System

□ L'offre de Chauvin Arnoux

La RayCam CA 1884 illustrée en figure 6.19 satisfait à toutes les mesures nécessaires pour élaborer des rapports complets de maintenance électrique.



Figure 6.19 – La RayCam CA 1884.
© Chauvin Arnoux

Son ergonomie garantit une simplicité d'utilisation dans les lieux difficilement accessibles grâce à son écran couleur orientable, ainsi qu'une capacité de mesure à partir de 10 cm.

Associées au logiciel RayCam Report, les mesures réalisées peuvent être exploitées pour la création de rapports et d'analyse.

Pour toutes les caractéristiques de la CA 1884 : www.chauvin-arnoux.fr.

□ L'offre de Fluke

Les caméras TI25, TI10 et TIR répondent aux besoins d'analyses d'installations électriques et de fourniture d'énergie. Elles sont résistantes aux chocs, à l'eau et à la poussière. Elles disposent d'une capacité de stockage considérable et d'un dispositif d'enregistrement de commentaires vocaux. Équipées de la technologie IR-Fusion, elles permettent de capturer et d'associer un thermogramme à une photo numérique pour les fusionner en une seule image. Le logiciel SmartView permet de visionner, d'annoter et de retravailler les thermogrammes. SmartView prend en charge intégralement la technologie IR-Fusion.

Les figures 6.20 et 6.21 illustrent les caméras TI25 et l'utilisation d'une TI10 lors d'un contrôle de points chauds dans une armoire électrique.



Figure 6.20 – Caméra infrarouge TI 25.

Pour toutes les caractéristiques de la gamme TI et TIR : www.fluke.fr.



Figure 6.21 – Utilisation d'une TI 10 pour contrôle de points chauds.

□ L'offre de Flir Systems

Les caméras InfraCam et ThermoCam (figures 6.22 et 6.23) couvrent les besoins de diagnostics rapides, de maintenance ou d'expertise. Elles peuvent être couplées à toute une série de suites logicielles pour générer des rapports (ThermaCam Reporter), gérer les données thermographiques (ThermaCam Database) ou composer des images complexes entièrement radiométriques (ThermaCam Image Builder).



Figure 6.22 – L'InfraCam.



Figure 6.23 – La ThermoCam série T.

Pour toutes les caractéristiques de la gamme InfraCam et ThermoCam : www.flir.fr

6.4 Mesures, analyse et interprétation

Les mesures présentées ici, ont été réalisées sur des équipements à caractère industriel et permettent de transposer ces exemples dans des situations courantes pouvant être rencontrées au travers de l'activité professionnelle de tout un chacun. La diversité de ces exemples n'a pas la prétention de faire le tour de la question en termes de pollution harmonique, mais de se rapprocher des préoccupations du technicien en terme de recherche de diagnostic et d'interprétation face aux problèmes liés à la pollution harmonique.

Des cas d'études industrielles plus complexes et plus développées, en terme de pollution harmonique, aboutissant aux solutions mises en jeu, font l'objet du chapitre 5 *Les techniques de filtrage*.

Les différents cas concrets sont explicités, tant au niveau de la structure de l'installation étudiée, qu'aux niveaux des relevés effectués pour en faire une exploitation et une comparaison avec les taux d'harmoniques prescrits par la norme.

Les paramètres nous intéressant lors des mesures sont obtenus grâce aux montages décrits dans la figure 6.24.

On mesure ainsi les paramètres suivants :

- valeur efficace du courant en ampères : I_{RMS} ,
- taux de distorsion harmonique en % : THD,
- valeur crête du courant en ampères : I_{PEAK} ,
- facteur de crête sans unité : CF

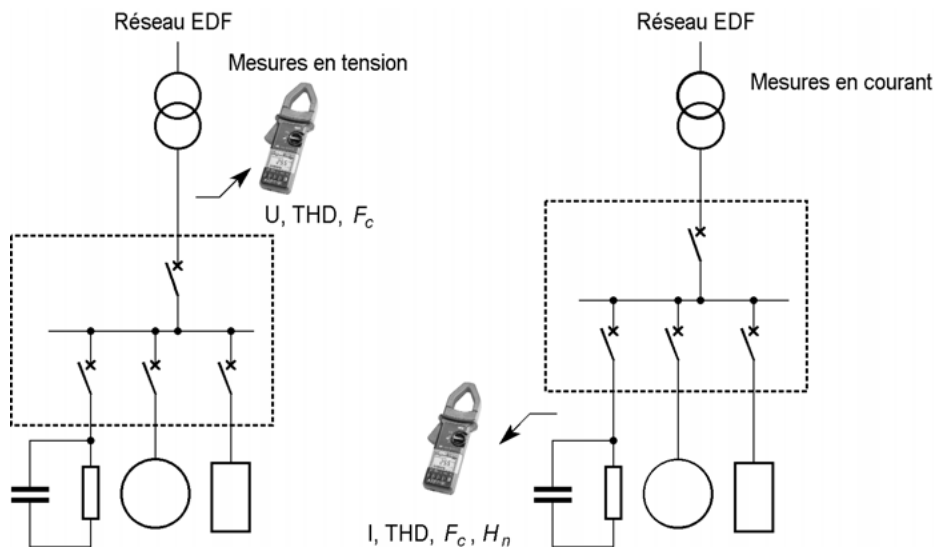


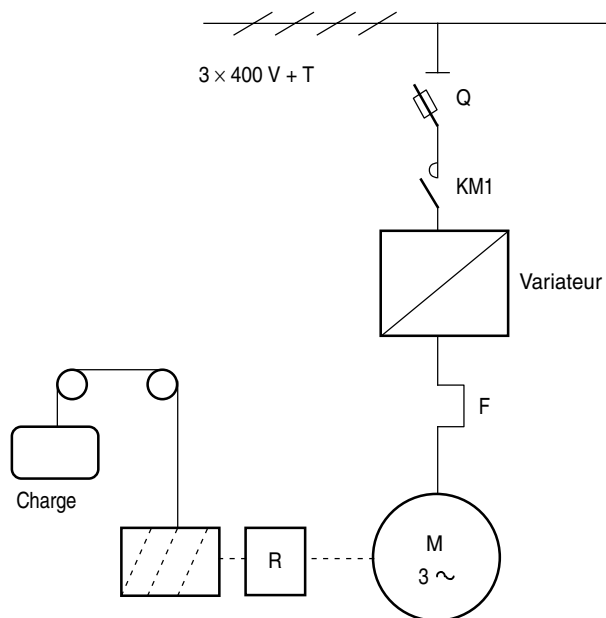
Figure 6.24 – Utilisation des pinces harmoniques.

6.4.1 Démarrage par variation de vitesse d'un système de levage

■ Mise en situation

L'équipement électrique de levage est constitué cette fois-ci d'un variateur de vitesse réalisant ainsi un démarrage progressif associé à une vitesse réglable du moteur asynchrone triphasé d'entraînement. Le schéma structurel est fourni à la figure 6.25.

Figure 6.25 – Schéma structurel de l'équipement de levage.



■ Mesures réalisées

Toutes les mesures ont été réalisées à l'aide d'une pince harmonique en amont du variateur de vitesse du moteur asynchrone triphasé et ceci pour différentes valeurs de fréquences de fonctionnement du variateur de vitesse.

Démarrage par variation de vitesse d'un système de levage		
I (A)	THD (%)	CF
$I_1, 41$ (40 Hz)	163,5	3,2
I_2 , toutes les fréquences sont de 50 Hz (50 Hz)	157,6	2,87
$I_3, 07$ (60 Hz)	152,5	2,85
U (V)	THD (%)	CF
$U_1, 6$ (40 Hz)	2,8	1,47
U_2 (50 Hz)	2,9	1,48
$U_3, 2$ (50 Hz)	2,9	1,46

Avec :

- Taux global d'harmonique : *THD*
- Facteur de crête : *CF*

■ Analyse et interprétation des relevés

L'analyse des relevés fait apparaître un taux global élevé d'harmoniques courants. Le facteur de crête correspondant est largement supérieur à la fatidique valeur de 1,414 et traduit la déformation du signal courant. La sortie analogique de la pince harmonique autorise la récupération du signal courant vers un oscilloscope. Ce signal est alors reproduit à la figure 6.26.

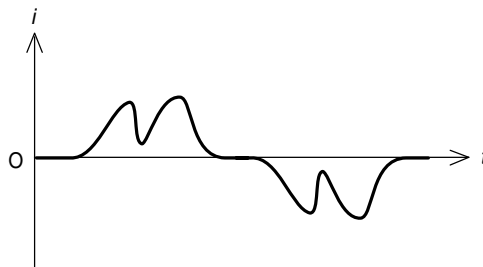


Figure 6.26 – Courant absorbé par le variateur de vitesse.

Les mesures du taux global d'harmonique en tension effectuées pour différents régimes de fonctionnement du variateur indiquent une valeur moyenne de 2,9 ce qui reste dans des limites raisonnables.

Notons que les valeurs élevées de taux d'harmoniques en courant auraient pu présager d'une dégradation significative de la tension. Cependant, il est utile de rappeler qu'il faut prendre en considération aussi l'impédance du réseau et plus particulièrement celle de la source (transformateur BT/BT en général). En effet, les courants harmoniques génèrent des tensions harmoniques dont l'importance dépend des impédances des circuits et des réseaux traversés par ces courants harmoniques.

Dans le cas présent, l'impédance de la source est faible (transformateur de 20 kVA) comparativement à la puissance du variateur raccordé sur le réseau. Ceci est vrai particulièrement pour les rangs harmoniques considérés, et ne donne pas lieu à la génération de tensions harmoniques significatives. Il n'y a donc pas de dégradation marquée de la tension du réseau de distribution électrique.

Remarque

Les équipements sur lesquels nous retrouverons un comportement similaire du point de vue harmonique concernent certains variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones.

6.4.2 Variation de vitesse d'un moteur à courant continu

■ Mise en situation

L'alimentation électrique d'un moteur à courant continu s'effectue à l'aide d'un variateur constitué d'un pont mixte monophasé (figure 6.27).

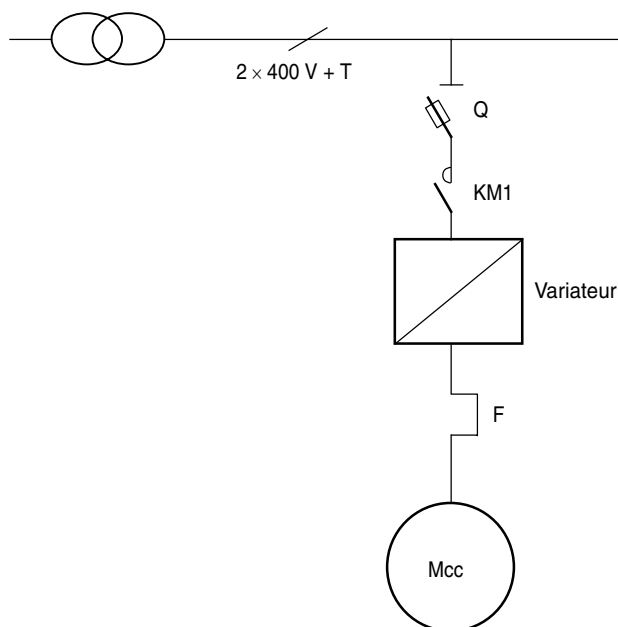


Figure 6.27 – Schéma structurel du moteur à courant continu associé à son variateur de vitesse.

■ Mesures réalisées

Les mesures ont été réalisées pour deux réglages de vitesse différents correspondant à deux valeurs de courant absorbés.

Variation de vitesse d'un moteur a courant continu		
I (A)	THD (%)	CF
1,74	27,6	1,66
1,16	64	2,03
U (V)	THD (%)	CF
222	8,4	1,50
222	8,4	1,50

Avec :

- Taux global d'harmonique : *THD*
- Facteur de crête : *CF*

■ Analyse et interprétation des relevés

L'analyse des relevés fait apparaître la présence d'harmoniques courants. Le facteur de crête, ayant pour valeur 1,50, traduit la déformation du signal courant. La déformation est d'autant plus importante lorsque le dispositif est à vitesse faible. En effet, la consommation en courant, peu importante dans ce cas, révèle une déformation plus forte en raison du découpage du signal par l'électronique de puissance du convertisseur. La sortie analogique de la pince harmonique autorise la récupération du signal courant vers un oscilloscope afin d'obtenir le signal représenté à la figure 6.28.

Les relevés des valeurs de taux global d'harmonique révèlent une dégradation sensible de la tension d'alimentation : THD tension de l'ordre de 8,4 %. Cette valeur excessive peut conduire à l'apparition de dysfonctionnements d'équipements et appareils raccordés sur ce même réseau électrique, tel que nous l'avons décrit dans les précédents chapitres.

Remarque

Les équipements sur lesquels nous retrouverons un comportement similaire du point de vue harmonique concernent certains variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu.

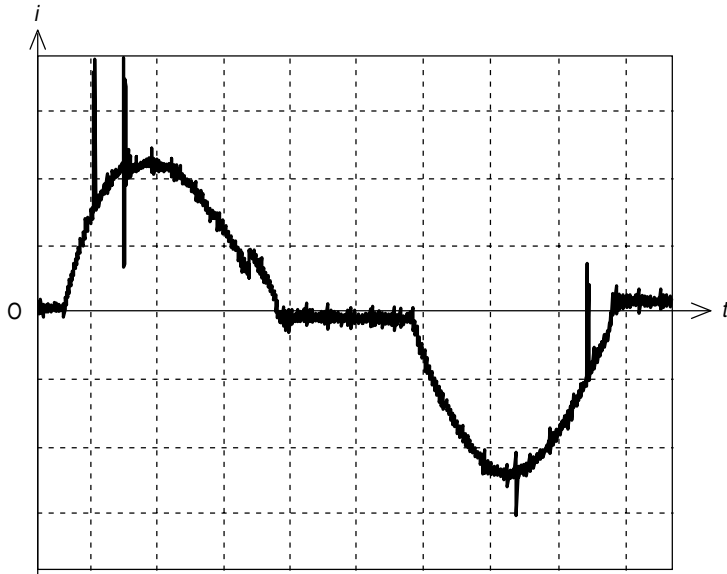


Figure 6.28 – Allure du courant en amont du variateur.

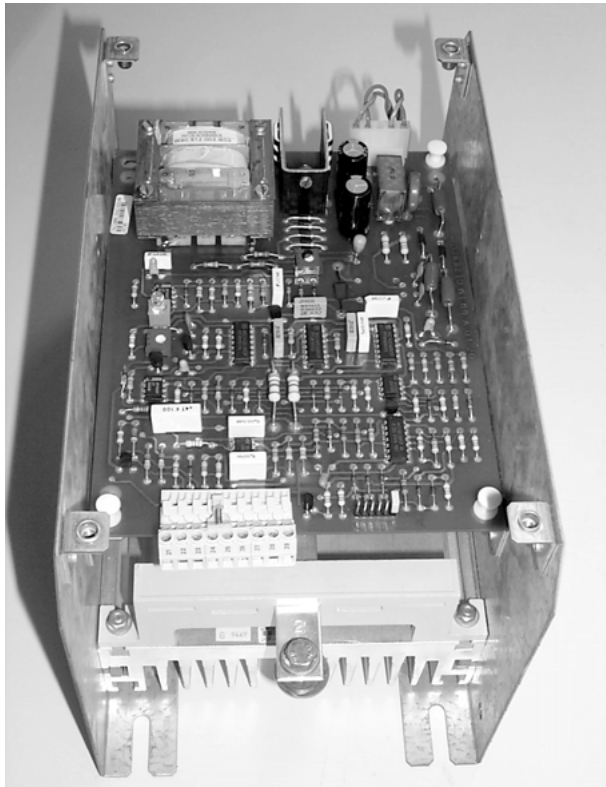


Figure 6.29 – Variateur de vitesse.

6.4.3 Équipement informatique dans le tertiaire

■ Mise en situation

Les équipements informatiques, fortement implantés dans les entreprises tertiaires donnent lieu à des dysfonctionnements tels que les déclenchements intempestifs de disjoncteurs ou encore les échauffements de câbles. La figure 6.30 donne l'allure du courant déformé dans une phase. Celui-ci étant issu de la consommation des micro-ordinateurs.

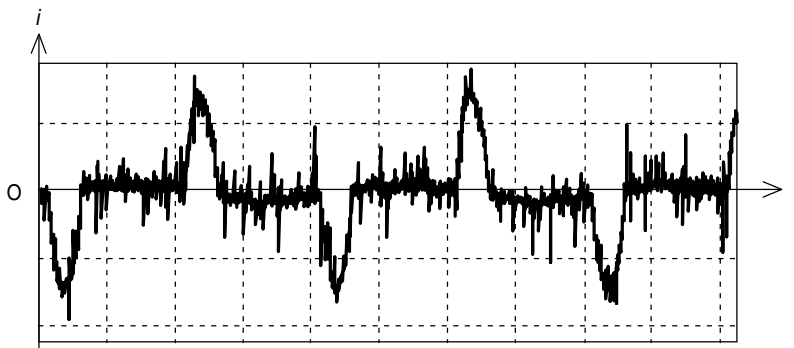


Figure 6.30 – Allure du courant dans une phase.

Pour cette installation, l'échauffement du conducteur neutre est repéré et donne lieu à une série de mesures pour évaluer l'amplitude des courants par conducteurs.

■ Mesures réalisées

Les mesures réalisées vont permettre d'analyser cette situation propre aux installations utilisant une dominante de matériels informatiques. La salle en question comprend plusieurs postes informatiques raccordés sur le même réseau électrique.

Tableau 6.5 – Mesures sur des équipements informatiques.

Équipement informatique dans le tertiaire		
I (A)	THD (%)	CF
4,74 (avec 16 postes effectifs) In = 7,56 A*	126,1	2,74
7,62 (avec 24 postes effectifs) In = 11,02 A*	136,4	2,97
U (V)	THD (%)	CF
417,2 (avec 16 postes effectifs)	1,7	1,45
409,7 (avec 24 postes effectifs)	2,8	1,46

* Courants mesurés dans le conducteur neutre (150 Hz relevé).

Avec :

- Taux global d'harmonique : THD
- Facteur de crête : CF

■ Analyse et interprétation des relevés

L'analyse des relevés fait apparaître un taux élevé d'harmoniques courants. Néanmoins, l'impédance faible du réseau contribue à conserver un taux raisonnable pour la tension : 2,8 dans le cas le plus défavorable.

Cependant, la valeur du courant dans le conducteur neutre est non négligeable et égale à 70 % de la valeur du courant dans le conducteur de phase !

Les difficultés rencontrées pour ce type de pollution harmonique concernent la surcharge du conducteur neutre en raison du cumul des harmoniques, essentiellement de rang 3, générés par les appareils et équipements informatiques. On notera au travers de la figure 6.31 l'allure du courant dans le conducteur neutre de fréquence 150 Hz.

Cette situation tend à reconsidérer la valeur de la section du conducteur neutre dans le cas de charges déformantes. En effet, la norme prévoit la possibilité de réduire ce conducteur de moitié de celle des conducteurs de phase. Cette règle n'est applicable que dans le cas où les matériels électriques ne produisent pas d'harmonique où bien que la valeur de ces harmoniques ne soit sensiblement réduite.

Lorsqu'un circuit fournit l'alimentation d'équipements susceptibles de générer des courants harmoniques, la section des conducteurs doit prendre en compte la valeur efficace du courant circulant dans ces conducteurs. Et ceci, aussi bien pour le conducteur de phase que pour le conducteur neutre de l'installation.

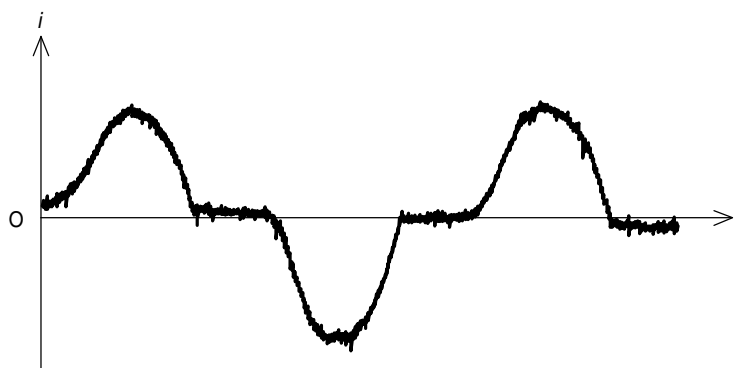


Figure 6.31 – Allure du courant dans le conducteur neutre.

6.4.4 Ensemble d'éclairage

■ Mise en situation

L'éclairage des locaux est de plus en plus sujet aux problèmes de pollution harmonique et ceci en raison de l'évolution récente des technologies de lampes (lampe à vapeur de mercure notamment).

Le schéma équivalent de l'alimentation d'une lampe est représenté grâce à la figure 6.32.

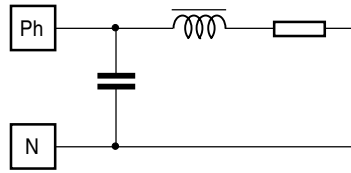


Figure 6.32 – Schéma équivalent pour une lampe.

L'allure du courant appelé sur le réseau est fournie à la figure 6.33 suivante.

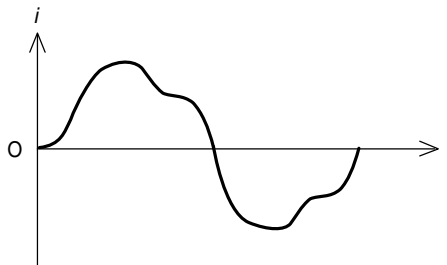


Figure 6.33 – Allure du courant dans une phase.

■ Mesures réalisées

Les mesures réalisées sur le signal courant ainsi que sur la tension d'alimentation fournissent les résultats suivants :

– Mesures sur le courant :

- $F_c = 1,8$
- $THD_i = 43 \%$

– Mesures sur la tension :

- $F_c = 1,47$
- $THD_u = 3 \%$

■ Analyse et interprétation des relevés

L'analyse des relevés fait apparaître un taux d'harmoniques courant non négligeable. Néanmoins, le taux de distorsion harmonique en tension conserve un taux raisonnable pour le réseau de distribution électrique.

Sur cette installation, est simplement identifiée une charge polluante (l'éclairage) mais cela ne compromet pas le bon fonctionnement de ce même réseau électrique. Cependant, il faut veiller à l'évolution de cette situation, notamment dans le cas de l'éclairage des grandes surfaces, où bien souvent, l'alimentation de cet éclairage

est assurée par des groupes électrogènes. Dans ce cas, l'impédance de la source, constituée par l'alternateur, est supérieure à celle du transformateur, et peut conduire à une augmentation importante du taux harmonique global en tension !

6.5 Quelques considérations liées aux mesures sur site

Le raccordement d'un récepteur non linéaire, de faible puissance, ne pollue pas ou sensiblement, le réseau sur lequel il est raccordé.

Rappelons que c'est en effet le produit des harmoniques courant, issues des charges déformantes, par l'impédance du réseau (essentiellement sources et câbles), en un point donné de ce réseau qui créent des harmoniques tension selon la loi d'Ohm.

■ Exemple

Pour une installation donnée, on relève le spectre fourni à la figure 6.34 où les harmoniques 5 et 7 sont présents. L'impédance du réseau présente des valeurs élevées aux rangs 3 et 5. Le produit, résultant de la loi d'Ohm, fait apparaître un spectre présentant seulement l'harmonique de rang 5.

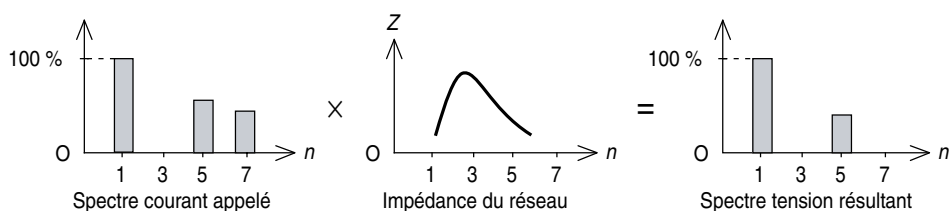


Figure 6.34 – Production d'harmoniques.

L'amplification de la tension harmonique à la fréquence de 250 Hz (rang 5) est issue d'une part de l'existence de ce courant harmonique, et d'autre part, d'une impédance non négligeable à cette fréquence.

On constatera que bien souvent, ce sont les harmoniques de rangs 3, 5 et 7 qui présentent les taux les plus élevés et qui sont ainsi à l'origine de la quasi-totalité des dysfonctionnements constatés sur les réseaux de distribution publique.

7 • ÉTABLIR UN DIAGNOSTIC D'ANALYSE DE QUALITÉ RÉSEAU

L'objectif de ce chapitre est de permettre au gestionnaire de réseaux, au responsable de maintenance ou au technicien en électricité d'être capable de mener une expertise et une analyse de la qualité d'un réseau électrique dans le but de réaliser un diagnostic et de proposer des solutions aux problèmes identifiés.

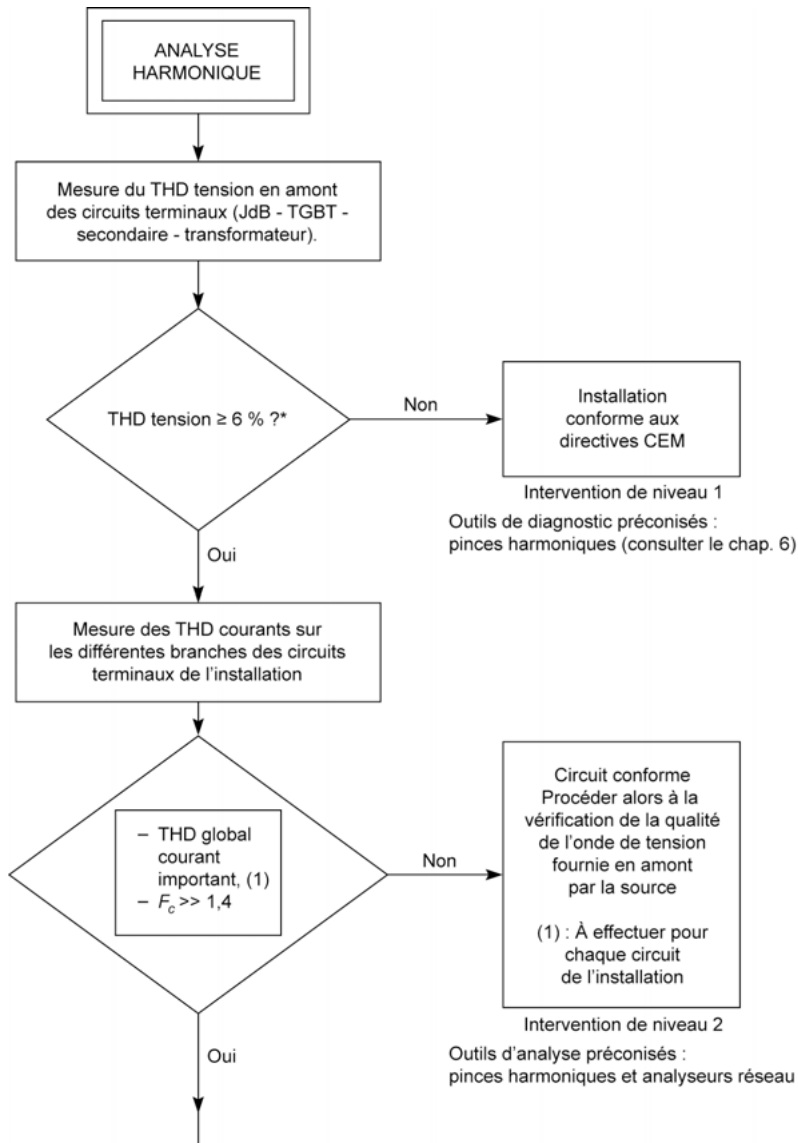
7.1 L'analyse et le diagnostic harmonique

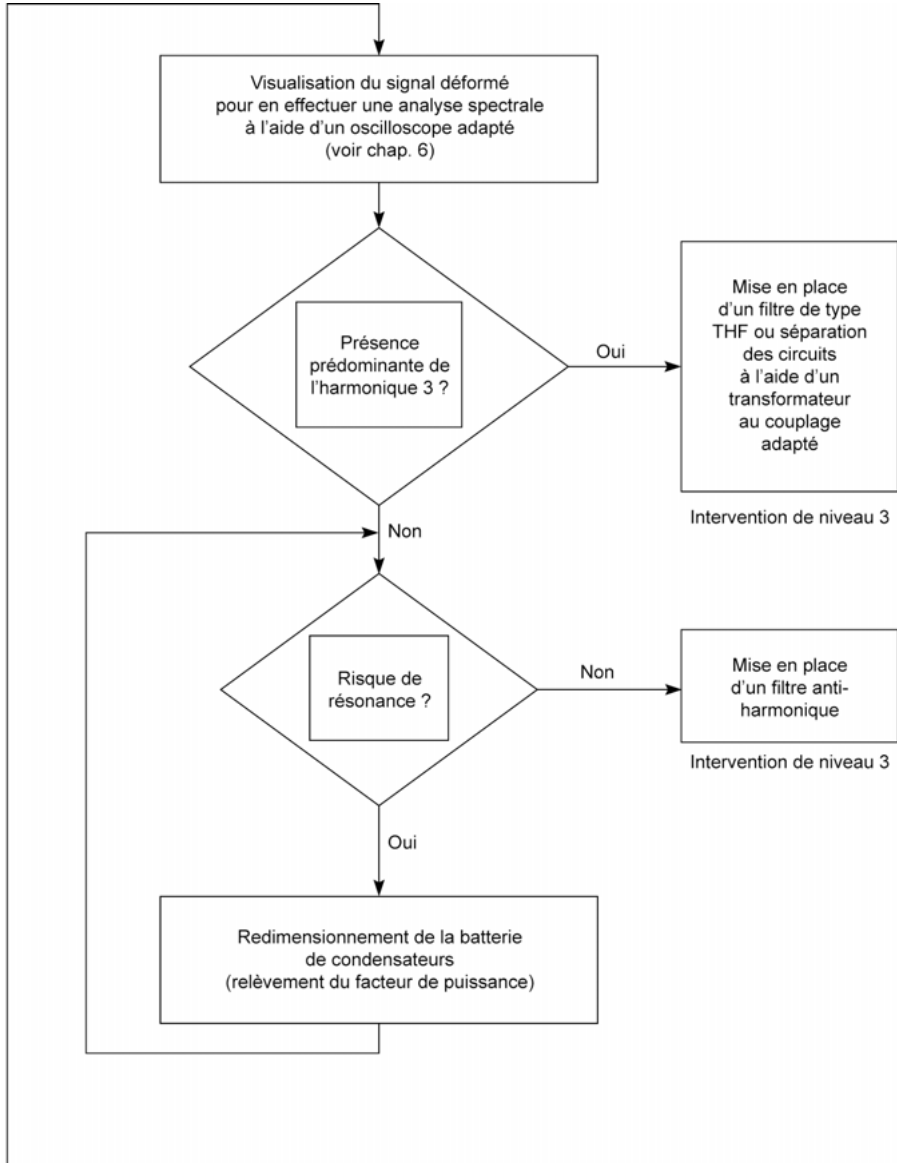
L'étude de la distorsion harmonique sur une installation donnée nécessite de suivre une démarche structurée telle que nous pouvons vous la conseiller dans la suite de cet ouvrage.

Afin d'apporter un éclairage suffisant sur ce type d'analyse, nous vous proposons de reprendre, au travers de cas concrets, les diagnostics établis sur des installations affectées par les problèmes de pollution harmonique.

La synthèse de l'étude peut être organisée comme proposé ci-après, de façon à faire apparaître les points importants suivants :

- **Page de garde** – Celle-ci est nécessaire pour positionner l'affaire traitée et indiquer clairement les coordonnées du client, de l'intervenant en tant qu'expert, ainsi que le titre du rapport de diagnostic en question ainsi que la date d'intervention.
- **Recommandations et normes en vigueur** – Elles sont indispensables pour porter un jugement de valeur en référence aux normes et réglementations imposées.
- **Présentation des mesures** – Elle est établie sous une forme claire et précise, à l'aide d'un tableau par exemple. La présentation des mesures fait apparaître les données pertinentes de l'installation électrique en termes de pollution harmonique. On trouvera les valeurs efficaces des courants et tensions, les facteurs de crête, les taux de distorsion harmonique individuel et global. Les allures des signaux obtenus seront appréciées afin d'avoir une représentation de leurs déformations.
- **Analyse et interprétations des relevés** – Les données, une fois organisées, vont permettre une interprétation de la situation de l'installation vis-à-vis des harmoniques et de leurs incidences éventuelles sur les équipements concernés ainsi que sur l'ensemble du réseau.





- **Remédiation** – Cette partie du rapport d'analyse harmonique propose des solutions de remédiation en adéquation avec les spécificités de l'installation tant au niveau de la technologie à mettre en œuvre que de l'aspect financier. Cette analyse peut aussi permettre d'envisager ou non une extension souhaitée par le propriétaire de l'installation.

Vous voudrez bien noter que cette démarche n'est qu'une proposition d'organisation pour la conduite d'une analyse de la pollution harmonique sur un site industriel ou tertiaire.

Démarche proposée afin de mener une étude d'analyse harmonique sur un réseau électrique :

Intervention de niveau 1 – Ce niveau d'intervention consiste simplement à qualifier une installation électrique en termes de niveau de pollution harmonique.

- Les outils de mesure préconisés sont les pinces harmoniques.
- Le critère retenu : THD tension.
- Les normes de référence : chapitre 4 *Les enjeux de la qualité des réseaux électriques*.

Nos conseils : En général, le taux de distorsion harmonique global en tension est mesuré au secondaire du transformateur de l'installation. Celui-ci ne doit pas dépasser la valeur de 6 %. Au-delà de cette valeur, des dysfonctionnements peuvent apparaître sur les équipements raccordés sur ce réseau.

Intervention de niveau 2 – Ce niveau d'intervention consiste à quantifier le niveau de pollution harmonique d'une installation électrique en localisant et en évaluant les rangs harmoniques présents sur les circuits comportant des charges non linéaires.

- Les outils de mesure préconisés sont les pinces harmoniques et les analyseurs de réseau.
- Le critère retenu : THD courants pour les rangs harmoniques présents au niveau de l'installation.
- Les normes de référence : chapitre 4 *Les enjeux de la qualité des réseaux électriques*.

Nos conseils : Identifier dans un premier temps les circuits pollués du réseau par la mesure des courants harmoniques et ceci dans chaque circuit du réseau. Comparer ensuite la valeur des courants harmoniques relevés avec les valeurs préconisées dans le tableau fourni au chapitre 4. Identifier ainsi les charges polluantes de l'installation.

Intervention de niveau 3 – Ce niveau d'intervention permet de préconiser la ou les solutions à mettre en œuvre pour la résolution des perturbations harmoniques sur une installation électrique. Cette démarche ne s'inscrit pas dans le cadre de cet ouvrage et s'adresse à des bureaux de calculs spécialisés dans ce domaine.

- Les outils de mesure préconisés afin de valider le filtre appliqué in situ sont les pinces harmoniques et les analyseurs de réseau.

Nos conseils : L'intervention de niveau 3 correspond au choix et au dimensionnement du filtre anti-harmonique. Même si cette démarche dépasse le cadre de ce manuscrit, les solutions existantes aujourd'hui sont décrites dans le chapitre 5 et donnent au lecteur une vision suffisante de ces perspectives d'amélioration de la qualité de la tension sur un réseau électrique.

Le choix du type de filtre dépendra des contraintes économiques de l'exploitant ainsi que de la définition des limites acceptables sur la distorsion de la tension du réseau considéré.

Le dimensionnement ou calcul du filtre sera validé par une phase de simulation (outil logiciel) avant la mise en service du filtre sur l'installation en question. Il sera préalablement nécessaire pour cette étape de simulation, de bien identifier tous les paramètres de l'installation (impédance source, impédance câbles, etc.) afin d'en effectuer la modélisation. La simulation peut conduire à différents essais avant d'obtenir un résultat satisfaisant.

Les phases de réglages pourront être effectuées et optimisées à l'aide d'une pince harmonique afin de vérifier si la limitation des courants harmoniques est effective et de réaliser, dans le cas contraire, les corrections qui s'imposent.

Les hypothèses de modélisation permettent de traduire le comportement des différents éléments constitutifs du réseau étudié. Cette modélisation peut être corroborée avec une série de mesures in situ afin de confirmer le résultat de la modélisation. Au cours de cette phase, il devra aussi être établi la courbe d'impédance harmonique du réseau aux différents points sensibles de celui-ci afin d'éviter de provoquer un phénomène de résonance. À partir de toutes ces données, le choix du type de filtre pourra être prononcé et simulé à l'aide d'un outil logiciel avant la mise en œuvre de filtre sur le réseau.

Il est à noter que cette phase de choix et de dimensionnement de filtre n'est évoquée ici que de manière simpliste et que cette démarche s'adresse à des bureaux d'études spécialisés dans ce domaine.

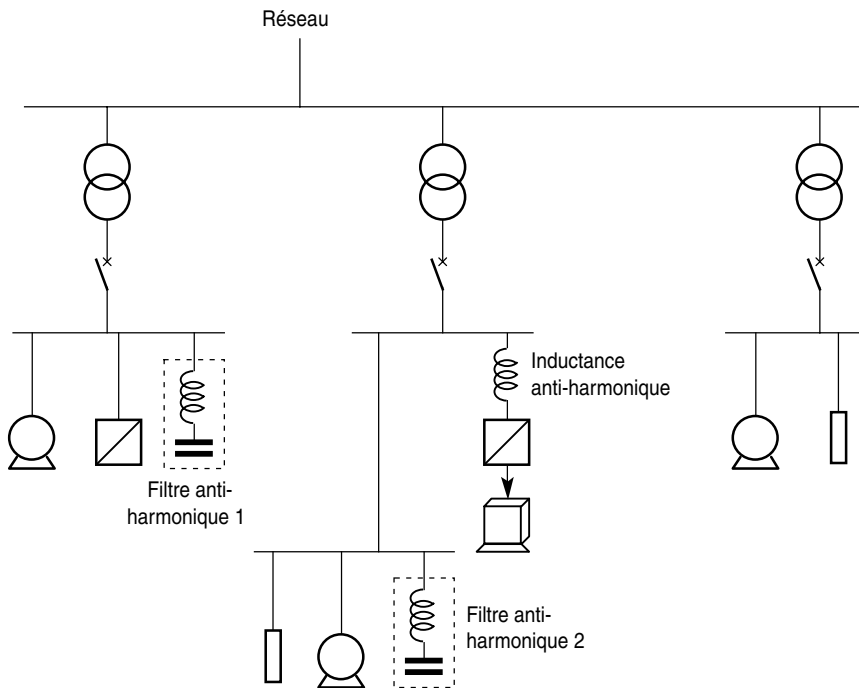


Figure 7.1 – Exemple d'une installation avec solutions de filtrage intégrées.

7.2 Analyse harmonique sur un système de remontée mécanique

7.2.1 Problématique

Le système de remontée mécanique situé dans une station balnéaire est l'objet de notre étude. Cette station possède plusieurs remontées mécaniques raccordées sur le même poste source associé à d'autres équipements domestiques. Cette étude nous a été fournie par la Société ABB, fabricant de filtres pour la lutte contre la pollution harmonique.

Les plaintes des utilisateurs alimentés par le réseau BT coïncident avec des périodes de forte activité touristique. Celles-ci font état de dysfonctionnements d'équipements électroniques sur le réseau affectant aussi bien les équipements électriques de la remontée mécanique que ceux branchés sur ce même réseau. Ces phénomènes sont observés notamment lorsque plusieurs remontées mécaniques sont en fonction. Les dysfonctionnements observés sur le réseau de la station sont les suivants :

- défaillance du contrôle commande de l'éclairage ;
- déclenchement intempestif d'appareils de protection ;
- destruction de cartes d'alimentations sur postes de télévision ;
- surchauffe dans des conducteurs électriques ;
- auto-perturbation de la remontée mécanique.

La topologie de l'installation est fournie sur la figure 7.2.

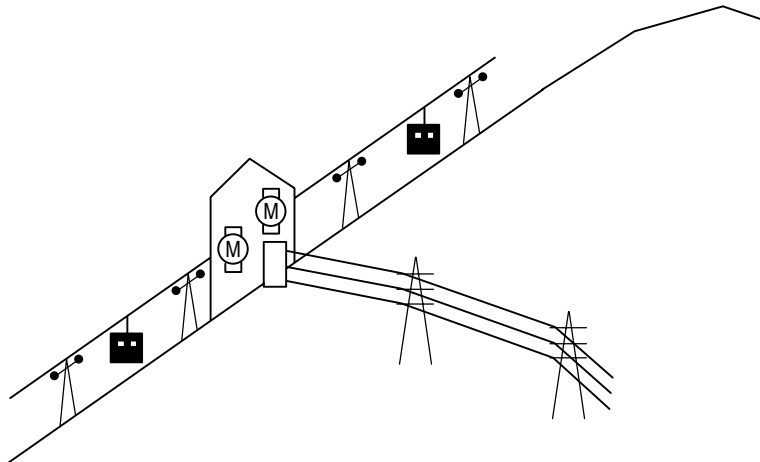


Figure 7.2 – Topologie de l'installation de remontée mécanique.

7.2.2 Description de l'installation électrique

La remontée mécanique, objet de notre étude, est constituée de télécabines avec deux tronçons permettant une dépose des passagers à mi-parcours.

L'installation électrique comporte les équipements de puissance suivants :

- un transformateur de 630 kVA – 10 kV / 400 V – 4,3 % de chute de tension ;
- deux moteurs à courants continus pilotés par des variateurs de vitesse de 230 kW avec une technologie 6 pulses.

L'ensemble de l'installation est situé à 1 050 mètres d'altitude et est donné à la figure 7.3.

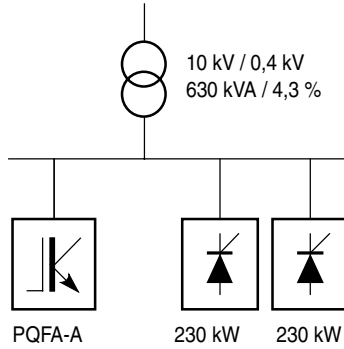


Figure 7.3 – Représentation de l'installation électrique.

7.2.3 Diagnostic

Les mesures d'harmoniques réalisées sur le réseau basse tension ont mis en évidence la présence importante de taux d'harmoniques (figure 7.4).

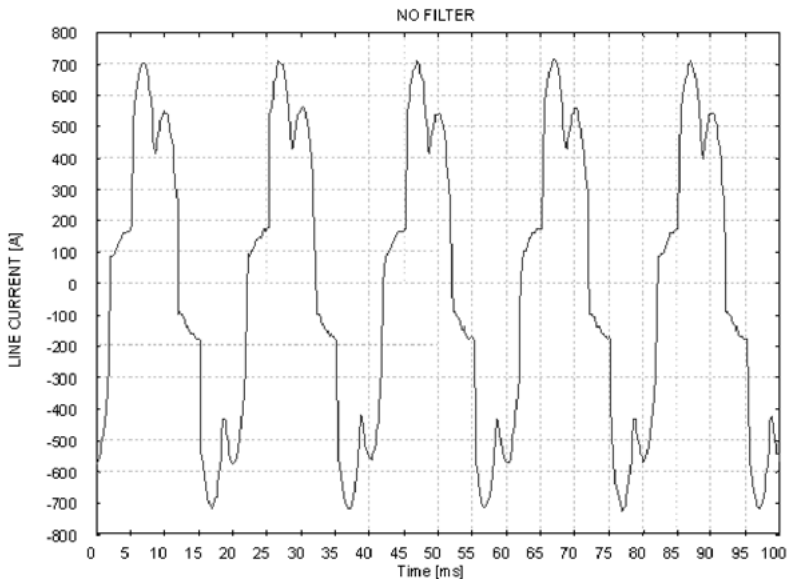


Figure 7.4 – Relevé de la forme d'onde du courant.

Nous notons une forte présence de rangs 5, 7, 11, 13 et 17 conduisant à un taux de distorsion de plus de 26 % ! La figure 7.5 en donne la représentation spectrale correspondante.

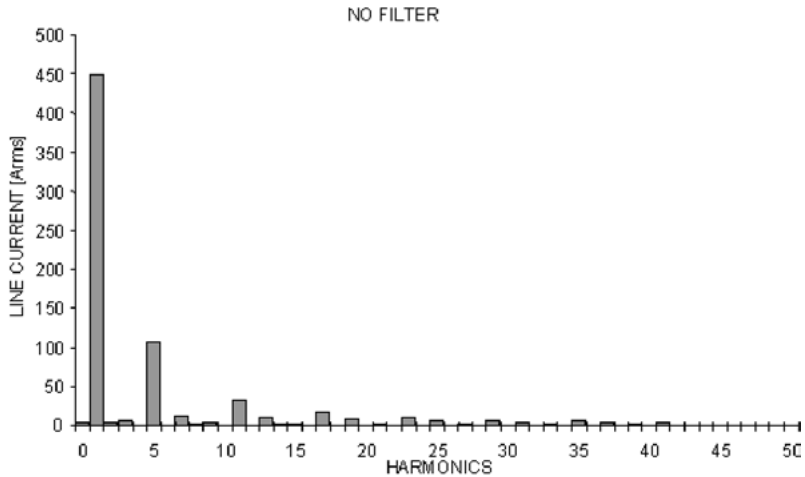


Figure 7.5 – Représentation spectrale du courant.

7.2.4 Solution et mise en œuvre

Afin d'éliminer toutes les composantes harmoniques, nous avons proposé une solution comprenant l'utilisation d'un filtre actif de type PQFA installé sur le jeu de barres basse tension (figure 7.6). La stratégie de filtrage choisie par le client consiste à éliminer tous les harmoniques jusqu'au rang 25.

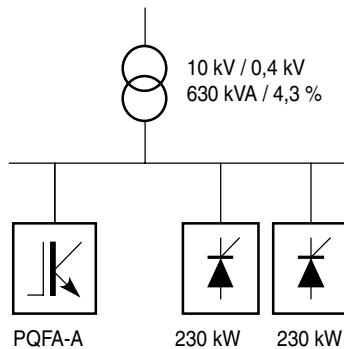


Figure 7.6 – Installation du filtre actif.

7.2.5 Les caractéristiques du filtre actif

Les caractéristiques des modules sont les suivantes :

- Tension : 400 V.
- Fréquence : 50 Hz.

- Courant de module : 225 A.
- Puissance du module : 156 kVA.

Les caractéristiques du filtre :

- Nombre de module : 1.
- Courant total : 225 A.
- Puissance totale : 156 kVA.
- Contrôle rack : 1.
- Armoire : 1.

Le filtre actif offre la possibilité :

- de filtrer jusqu'à 20 harmoniques simultanément ;
- de filtrer jusqu'au 50^e rang ;
- de compenser selon sa puissance disponible ;
- d'un dimensionnement selon simple mesure d'analyse ;
- d'une conception modulable (possibilité d'augmenter sa puissance) ;
- d'un contrôle commande en boucle fermée.

Le filtre PQFA développé par le fabricant ABB offre une capacité sans précédent à filtrer les harmoniques polluants sur tout type de réseau électrique et quel que soit le régime de neutre de l'installation. L'effet sur le réseau est l'élimination des harmoniques polluants et, par voie de conséquence, le retour à une sinusoïde dite propre.

Le filtre actif travaille indépendamment sur chacune des phases du réseau.

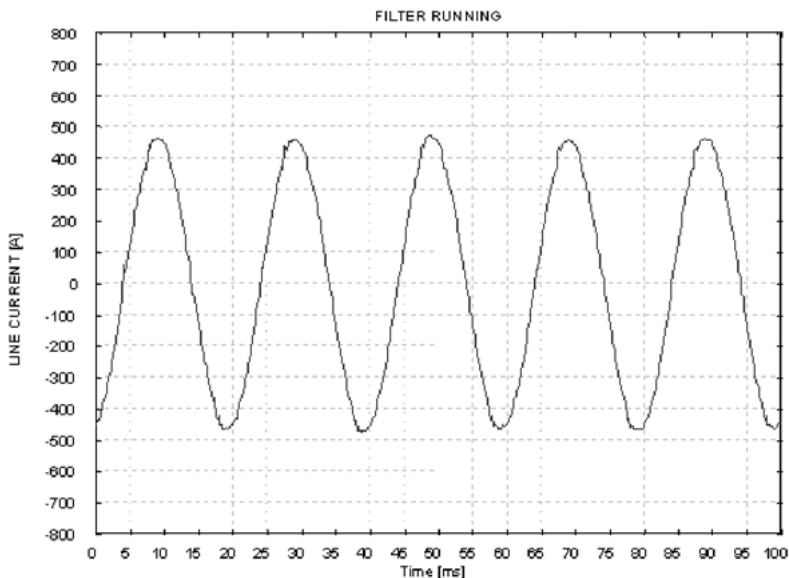


Figure 7.7 – Relevé de la forme d'onde du courant après filtrage.

L'analyse spectrale du signal courant montre l'effet obtenu à l'aide du filtre actif PQFA : la présence unique du fondamental (figure 7.8) !

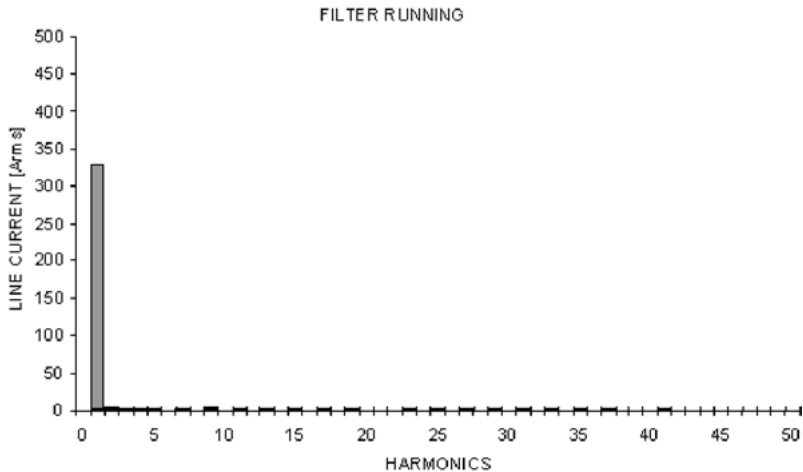


Figure 7.8 – Analyse spectrale du courant après filtrage.

7.2.6 Bilan du filtrage

Suite à l'installation de notre filtre actif PQFA, le bilan permet d'établir les constats suivants :

- Taux de distorsion en courant *THD* ramené à 3 % (initialement $THD = 26$ %).
- Diminution de 30 % de la valeur efficace vraie (RMS).
- Réduction de la consommation liée à la diminution des pertes en ligne (pertes Joules diminuées de 50 %).
- Meilleur rendement électrique de l'installation.
- Suppression des dysfonctionnements et perturbations sur l'ensemble de la station.

7.3 Travailler en partenariat avec un bureau d'études

Nous l'avons évoqué précédemment, la préconisation et le calcul d'un filtre sont de la compétence d'un bureau d'études spécialisé.

Néanmoins, il est toujours possible de travailler en partenariat avec un cabinet spécialisé dans le domaine de la dépollution des réseaux électriques. Et ceci dans le but de fournir à ce bureau d'études l'essentiel des éléments propres aux caractéristiques des signaux tensions et courants des différents circuits composants le réseau pollué.

Les mesures à réaliser devront être envisagées avec des appareils de mesures performants telles que les pinces harmoniques et les analyseurs de réseau décrits dans le chapitre précédent.

Aujourd'hui, les bureaux d'études se sont dotés d'outils logiciels d'aide aux calculs permettant d'automatiser un certain nombre de tâches de calculs et autorisant la simulation et l'optimisation des filtres calculés avant leur mise en service sur site.

7.3.1 Le logiciel Harmonique

La division Recherches et développement d'Électricité de France (groupe Qualité de la fourniture et Services aux entreprises) a développé un logiciel adapté aux simulations des réseaux en régime harmonique.

Ce logiciel autorise la modélisation d'une installation inquiétée par la pollution harmonique et permet ainsi de préconiser les solutions de filtrage adaptées. Deux études de cas nous sont proposées par le service Études de réseaux d'EDF dans la suite de ce chapitre pour étayer les possibilités du produit logiciel Harmonique.

■ Analyser la situation et réduire les niveaux de tensions harmoniques

L'électronique représente aujourd'hui une part croissante de la charge industrielle et domestique. Ces dispositifs injectent sur le réseau des courants harmoniques, qui, conjugués à l'impédance du réseau provoquent des tensions harmoniques perturbatrices et dangereuses. Le logiciel Harmonique permet d'évaluer le niveau de pollution harmonique en tout point du réseau et d'étudier les solutions de filtrage adapté.

■ Les fonctionnalités du logiciel

Les fonctions du logiciel sont adaptées aux besoins bureaux d'études pour le traitement de la pollution harmonique :

- Saisie graphique du réseau étudié.
- Calcul des impédances, tensions et courants harmoniques sur les réseaux arborescents ou maillés.
- Simulation des niveaux de télécommande centralisée (injection série interharmonique).
- Étude automatique de l'influence des paramètres.
- Modélisation sous forme de fichiers ASCII.
- Comparaison aux niveaux limites.
- Sortie graphique des résultats.
- Édition des rapports d'étude.
- Interface avec les applications Windows.

Le logiciel nécessite une configuration matérielle classique et fonctionne sous l'environnement Windows.

7.3.2 Désensibilisation aux courants harmoniques dans le monde du football

Le cas cité en exemple dans le chapitre 3, concernant le stade du Mans, est développé ici et l'ensemble des éléments intervenant dans ces perturbations ont été modélisés à l'aide du logiciel Harmonique afin d'envisager une solution de dépollution vis-à-vis des harmoniques.

Aussi, suite à la défaillance de l'installation électrique du stade, un premier diagnostic fut entrepris par le centre EDF-GDF Services du Mans. Le groupe Qualité de la tension de la direction des Études et recherche fut sollicité pour assister le centre DEGS dans l'étude engagée.

■ Un phénomène de résonance mis en cause

Les phénomènes de résonance dégradent souvent la qualité de l'électricité. Ils apparaissent dans les deux situations duales suivantes :

- une capacité et une inductance en parallèle excitées par un courant oscillant à leur fréquence naturelle ;
- une capacité et une inductance en série excitées par une tension oscillant à leur fréquence naturelle.

Le stade de football est alimenté par un transformateur 20 kV/400 V de 400 kVA. L'éclairage possède un disjoncteur séparé. Il comprend 76 lampes de 2 kW réparties sur deux pylônes. Elles sont connectées entre phases sur le réseau 400 V. Chaque lampe comprend un ballast, une inductance série et une capacité shunt de compensation.

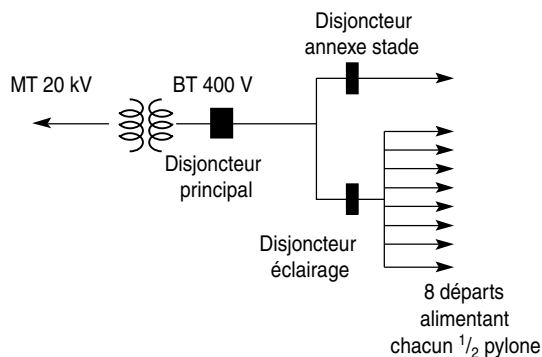


Figure 7.9 – Schéma unifilaire de l'éclairage du stade.

Le centre DEGS du Mans a entrepris une campagne de mesures en collaboration avec la Direction des Études et Recherches. Des mesures de courant sur les trois phases ont révélé des courants efficaces élevés.

La distorsion du courant était d'environ 50 % et celle de la tension d'environ 25 % (figures 7.10 et 7.11).

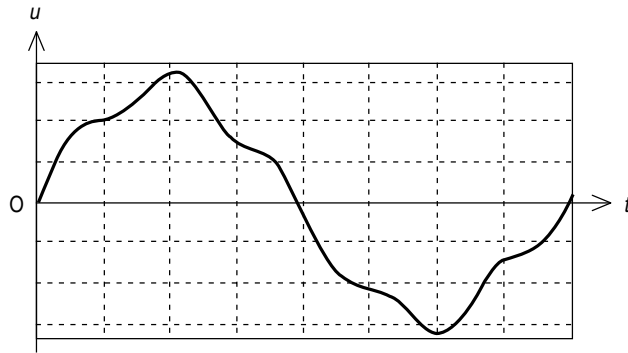


Figure 7.10 – Forme temporelle de la tension.

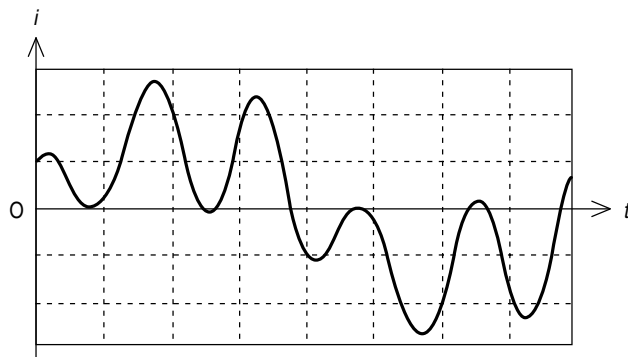


Figure 7.11 – Forme temporelle du courant.

■ Une modélisation à partir du logiciel Harmonique

EDF a modélisé l'ensemble des équipements intervenant : le réseau MT, le transformateur MT/BT, les lignes BT et les lampes. Ceci a permis de confirmer que les tensions harmoniques préexistantes sur le réseau MT étaient amplifiées au niveau BT par la résonance entre les condensateurs des lampes et l'inductance formée par le transformateur et les lignes MT. Lorsque 100 % des lampes étaient branchées, la résonance avait lieu sur l'harmonique 5. En ne prenant que 75 % des lampes, la résonance passait à l'harmonique 7.

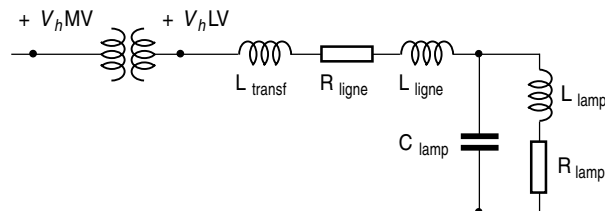


Figure 7.12 – Modèle monophasé du système étudié.

■ Les solutions envisagées

Deux solutions peuvent être envisagées :

- Diminuer la compensation individuelle des lampes. Ceci a l'avantage de diminuer les tensions harmoniques, mais produit également la décroissance du facteur de puissance.
- Placer une inductance en série avec le transformateur MT/BT. L'inductance a été choisie de manière à ce que :
 - la résonance ait lieu en dessous de 150 Hz et qu'elle soit aussi peu sensible que possible au nombre de projecteurs allumés ;
 - le courant de distorsion total soit inférieur à 10 %.

Cette dernière solution fut retenue. Une nouvelle série de mesure effectuée par le Centre DEGS du Mans permis de valider la solution technique mis en application. La prochaine saison de football s'est engagée sous de meilleurs augures !

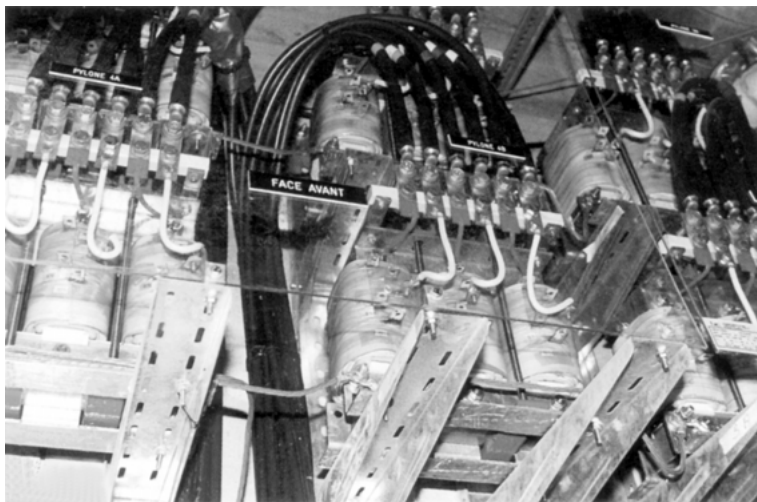


Figure 7.13 – Ballast des lampes.

7.3.3 Désensibilisation aux courants harmoniques dans l'industrie plastique

■ Des déclenchements intempestifs de la protection d'un de ses trois transformateurs

L'usine de plasturgie est alimentée par le réseau de distribution public en 20 kV. Plusieurs déclenchements intempestifs de la protection d'un de ses trois transformateurs MT/BT sont venus perturber le fonctionnement normal de l'installation du client. L'impact sur la productivité est évident. Suite à un arrêt des lignes de production, le plastique se solidifie assez vite. Le personnel doit alors intervenir sur les machines pour les nettoyer. La production ne peut reprendre qu'après 5 à 8 heures de travail ; pendant ce temps, une grande partie de l'usine est restée à l'arrêt.

■ Le déclenchement a lieu lors de l'enclenchement des condensateurs

Très vite le personnel de maintenance fait le rapprochement entre l'enclenchement des condensateurs et la perte de la tension sur les installations BT. Il remarque également que les déclenchements sont plus fréquents lorsque l'ensemble des condensateurs sont raccordés.

■ Un niveau de pollution harmonique élevé

La puissance souscrite de l'installation est de 2,5 MVA. Le client dispose de trois transformateurs MT/BT : deux transformateurs de 630 kVA et un transformateur de 1 600 kVA dont la protection fonctionne de manière intempestive. Étant donné qu'une corrélation avec l'enclenchement des condensateurs a été mise en évidence, un premier diagnostic a conduit à suspecter les courants harmoniques. Des mesures de tension harmonique ont été effectuées sur le transformateur de 1 600 kVA, lorsqu'une partie seulement de la compensation était raccordée. On a relevé des taux de tension harmonique de rang 5 d'environ 14 % et des courants harmoniques de rang 5 d'environ 60 %.

■ Modélisation de l'installation

L'installation alimentée par le transformateur de 1600 kVA se compose d'un grand nombre de variateurs de vitesse. La puissance maximale appelée est d'environ 500 kW. La puissance totale des batteries de condensateurs installées est de 1050 kvar. Une partie des batteries de condensateurs est réglée par des relais varmétriques.

■ Les origines du déclenchement

Les mesures ont mis en évidence des courants harmoniques de valeurs particulièrement élevées. Une mesure a pu être faite lors d'un déclenchement de la protection (voir tableau 7.1 et figures 7.14 et 7.15).

Tableau 7.1 – Mesures de tension et courant harmoniques lors d'un déclenchement

	V_5	V_7	I_5	I_7
Avant déclenchement	22 %	6 %	100 %	32 %
Après déclenchement	1,3 %	1,2 %		

Les déclenchements de la protection avaient deux origines :

- Une résonance entre le transformateur MT/BT et les condensateurs BT amplifie les courants harmoniques injectés par les variateurs de vitesse alimentés par ce transformateur, mais également les harmoniques présents sur le réseau MT.

- Le bloc déclencheur de la protection mesure le courant crête et non le courant efficace véritable.

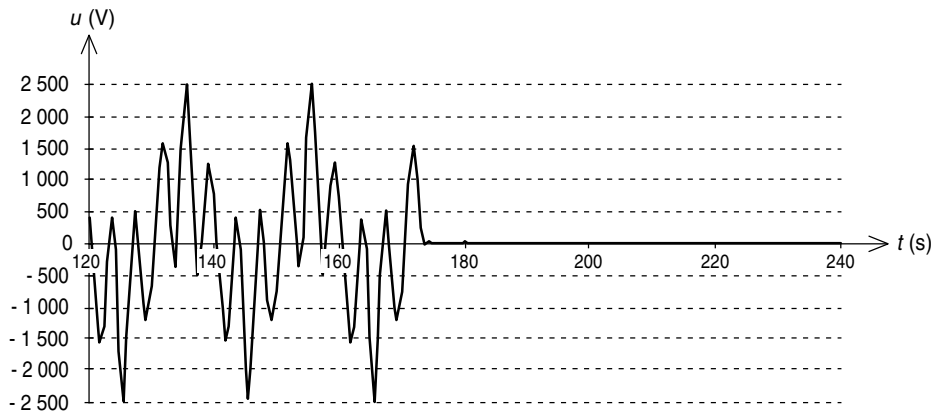


Figure 7.14 – Relevé du courant en BT lors d'un déclenchement.

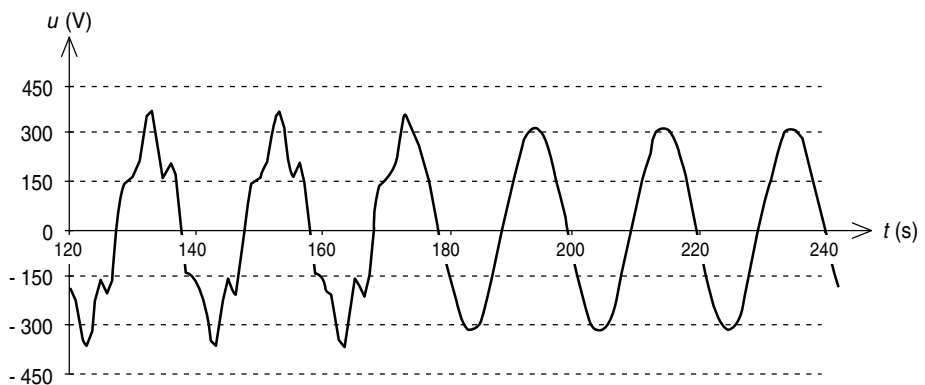


Figure 7.15 – Relevé de la tension en BT lors d'un déclenchement.

■ Les solutions préconisées

Deux préconisations sont suggérées :

- remplacer le bloc déclencheur, de manière à faire déclencher la protection sur le courant efficace et non le courant crête ;
- remplacer une batterie de condensateurs par une batterie équipée de self accordée à 220 Hz.

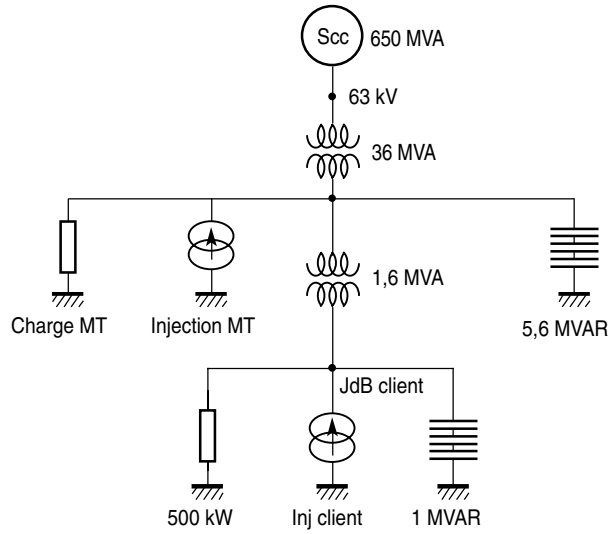


Figure 7.16 – Schéma unifilaire avec filtrage.

8 • L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE AU SERVICE DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

8.1 Le concept d'efficacité énergétique

La hausse conséquente du prix de l'énergie de ces dernières années, l'épuisement des ressources énergétiques fossiles, les contraintes réglementaires à l'échelle européenne imposent à présent une démarche de gestion et d'optimisation de l'énergie : *l'efficacité énergétique*.

8.1.1 Qu'est-ce que l'efficacité énergétique ?

L'efficacité énergétique est une démarche dont l'objectif est de dégager des marges d'économie d'énergie dans les bâtiments et dans l'industrie, le gisement d'économie étant évalué aujourd'hui à environ 30 % pour les bâtiments existants !

La réduction de 20 % des émissions de gaz à effet de serre, de 20 % de la consommation d'énergie et l'extension à 20 % de la part des énergies renouvelables, tels sont les objectifs européens des « 3 fois 20 » pour 2020 appuyés par le Grenelle de l'Environnement.

L'instauration de la démarche d'efficacité énergétique a ainsi poussé les industriels à proposer des solutions dites « actives » en la matière. Les axes de travail pour une efficacité énergétique active dans l'industrie comprennent les initiatives suivantes :

- la mesure des consommations et l'identification des pertes,
- la gestion de l'énergie à partir de systèmes intégrés,
- la compensation d'énergie réactive,
- la mise en place de systèmes d'automatismes,
- l'utilisation de moteurs à haut rendement et la variation de vitesse.

Pour atteindre les exigences ambitieuses du Grenelle de l'Environnement, de nombreux constructeurs ont développé des solutions d'efficacité énergétique active, immédiatement disponibles et faciles à mettre en œuvre.

Basée sur une offre de produits performants et de systèmes intelligents de régulation, d'automatismes et de mesure, l'efficacité énergétique active permet de :

- réduire les consommations d'énergie et par voie de conséquence de la facture énergétique,
- améliorer la qualité et la disponibilité de l'énergie en consommant l'énergie juste nécessaire.

8.1.2 Le Gimélec : un vecteur de communication incontournable

Le *Gimélec* (Groupement des industries électriques) propose et met à votre disposition à partir de son site Internet www.gimelec.fr :

- des guides pratiques méthodologiques en matière d'efficacité énergétique (figure 8.1)¹,
- des liens vers les entreprises partenaires de la démarche d'EE.
- la programmation des rendez-vous à venir de l'efficacité énergétique,



Figure 8.1 – Les trois guides méthodologiques pour faciliter la mise en œuvre de la démarche d'efficacité énergétique.

Le Gimélec est un organe fédérateur des différentes structures intéressées par la démarche d'efficacité énergétique et contribue à sa mise en œuvre aussi bien dans l'industrie que dans le bâtiment. Les deux sessions des « Assises de l'efficacité énergétique » conduites par le Gimélec, en 2008 puis en 2009, ont permis une avancée considérable en la matière.

À ce jour et grâce à ces réunions plénières, les industriels, les fédérations professionnelles et les collectivités se sont entendus pour développer et expérimenter cette nouvelle pratique. Les solutions existent maintenant et le retour d'expérience est très positif avec une rentabilité à court terme. Les applications techniques en ce sens vont continuer à conquérir les sites industriels et tertiaires, toujours avec le même objectif d'optimisation et de réduction de la consommation d'énergie.

À noter aussi que le concept d'« Efficacité énergétique » est précisé dans la Directive européenne 2006/32 du 5 avril 2006 relative à l'efficacité énergétique dans les utilisations finales et aux services énergétiques dans tous les états membres de l'Union européenne.

Un « référentiel de bonnes pratiques » a aussi été édité par l'AFNOR BP X30-120 en mars 2006 concernant l'application du concept d'Efficacité énergétique.

1. Le Gimélec contribue à diffuser les « bonnes pratiques » en matière d'efficacité énergétique au travers de trois guides pratiques disponibles auprès de cet organisme sur simple demande (figure 8.1).

Le club S2EE présente sur son site www.clubs2ee.org un guide décrivant les méthodes de Mesure et de Vérification pour l'efficacité énergétique. Ce guide est téléchargeable sur le site du club.

Le site de l'ADEME, www.ademe.fr, est aussi un lien actif sur ce sujet.

8.2 Mettre en place une démarche d'efficacité énergétique au service des réseaux électriques

Nous vous conseillons vivement la lecture des guides édités par le Gimélec et plus particulièrement le guide « Mener à bien un projet d'efficacité énergétique Industrie » dans la mesure où vous souhaitez vous investir dans cette démarche.

8.2.1 Les enjeux de l'efficacité énergétique

La mise en place d'un projet d'efficacité énergétique pour une installation donnée doit permettre la concrétisation d'économies d'énergie dans un ou plusieurs des domaines suivants :

- les systèmes d'air comprimé ;
- les systèmes de production de chaud et de froid ;
- les systèmes de pompage ;
- les systèmes de ventilation ;
- les systèmes d'entraînement ;
- les réseaux de distribution électrique industrielle.

Les gains potentiels quantifiables, concernant les réseaux de distribution électrique industrielle, sont annoncés jusqu'à 15 % (source ADEME) !

Les conditions de réussite de la démarche d'efficacité énergétique dans l'entreprise nécessitent d'obtenir l'adhésion de tous les acteurs du projet sur le site considéré.

L'efficacité énergétique s'intègre donc dans une approche globale d'entreprise :

- *adhésion des équipes* (management, communication des résultats) ;
- *évaluation de la situation initiale* (connaissance des consommations d'énergie électrique, identification des gisements possibles d'énergie) ;
- *programmer et organiser* (définition d'une politique énergétique au sein de l'entreprise) ;
- *mettre en place* (responsabilisation et implication de chacun des acteurs concernés dans l'entreprise) ;
- *contrôler et suivre* (gestion du dispositif d'analyse des données, suivi et contrôle des actions, évaluation des rapports de consommations, motivation et engagement des intervenants).

8.2.2 La méthodologie de mise en œuvre d'un projet d'efficacité énergétique

La méthodologie générale consiste à définir l'optimisation énergétique recherchée sous forme de quatre étapes essentielles :

- la préparation du projet,
- les propositions techniques,

- la contractualisation et le déploiement des solutions,
- le suivi et la garantie de la performance dans la durée.

Pour qu'un projet d'efficacité énergétique soit une réussite, il est indispensable :

- de bien identifier le process de production en phase d'amélioration ;
- de définir une collaboration étroite entre l'entreprise prestataire du projet et le client assurant l'exploitation du site.

La préparation du projet est une étape qui va permettre d'évaluer le gisement potentiel d'économies d'énergie (à partir de l'analyse des données collectées), le montant estimatif des travaux à engager ainsi que la durée de l'amortissement des dépenses.

Les dispositifs de mesure et/ou de comptage sont prépondérants dans cette phase. Cela peut engendrer une remise à niveau ou une installation complète de ces matériels afin de collecter les données indispensables à la prise de décision quant aux enjeux de performance énergétique envisageables sur l'installation considérée.

Les propositions techniques, constituent la base des engagements entre le prestataire en charge du projet et le client exploitant de l'installation. Cette phase intègre les actions envisagées, le calendrier de déploiement du projet, le budget alloué et les objectifs quantitatifs à atteindre.

Gimélec propose des fiches d'applications type pour réaliser des économies d'énergie, à travers des exemples concrets et transposables dans de nombreux secteurs industriels.

Nous ne citerons ici que celles se rapportant aux applications les plus courantes et liées à l'optimisation des réseaux de distribution électrique :

- moteur à haut rendement,
- la variation de vitesse,
- le filtrage des harmoniques sur réseau Basse Tension,
- la compensation d'énergie réactive
- système de mesure de la performance énergétique

Ces fiches sont consultables et accessibles auprès de l'organisme Gimélec.

La contractualisation et le déploiement des solutions sont effectifs dès lors que l'offre technico-économique proposée a fait l'objet d'un contrat d'optimisation énergétique entre le client et l'entreprise. Le déploiement des solutions préconisées peut être alors engagé.

Le suivi et la garantie de la performance dans la durée correspondent à la mise en œuvre du plan de maintenance et/ou d'exploitation telle que défini dans le contrat de performance énergétique. La vérification du bilan de performance est aussi prise en compte. Ce suivi, au travers des échanges réguliers entre client et prestataire, devra permettre d'analyser son évolution et d'envisager les actions correctives nécessaires à apporter dans le but d'améliorer les résultats.

8.3 La mesure : une étape essentielle

8.3.1 L'importance de la mesure dans le projet d'efficacité énergétique

La mesure constitue la clé de voûte de l'optimisation énergétique. Même si cette étape ne génère pas directement d'économies d'énergie, elle fournit les données indispensables à la mise en œuvre d'une démarche d'efficacité énergétique et en assure la pérennité.

Il est donc nécessaire de maîtriser dans un premier temps tous les indicateurs de fonctionnement de l'installation concernée avant de prescrire des préconisations et d'engager toutes initiatives correctives.

8.3.2 Les équipements de comptage et de mesure

En amont, il est indispensable de se référer au compteur tarifaire qui constitue bien entendu l'équipement de base du suivi de la consommation électrique.

Les équipements de mesure dont il va falloir se doter sont décrits dans le chapitre 6. Même si cette liste est non exhaustive, elle vous permet néanmoins d'orienter votre choix sur les équipements de mesure actuels et adaptés pour pouvoir identifier les sources potentielles d'économies d'énergie ainsi que les pertes et les perturbations affectant l'installation électrique.

8.3.3 Des solutions pour une efficacité optimale

Le comptage et les équipements de mesure portatifs peuvent être insuffisants dans certains cas. Outre la détection de perturbations potentielles sur le réseau, il peut être nécessaire de s'équiper d'un véritable outil de gestion de l'énergie électrique si l'on désire optimiser les consommations. Les centrales d'acquisition de mesure sont tout à fait adaptées à cet usage et vont permettre une optimisation des consommations et cela de façon pérenne. En enregistrant en temps réel, les grandeurs électriques judicieusement choisies, les centrales d'acquisition autorisent, à partir de leur logiciel dédié, une analyse fine des consommations. Le diagnostic est alors rendu possible et permet à l'utilisateur la prise de décision quant à l'optimisation de son réseau électrique. L'exemple d'exploitation d'un tel système est proposé en « 8.4 ».

La gestion centralisée de l'installation associée à un logiciel de gestion et de supervision fournit une vision globale de l'installation en termes de consommations électriques. Grâce à ses fonctions de surveillance et d'analyse des circuits, la gestion centralisée donne les moyens d'anticiper les problèmes et de minimiser ou d'annuler leurs effets.

8.4 Un exemple de solution globale de gestion et de suivi des réseaux électriques

Dans les lignes suivantes, nous vous présentons un exemple de solution complète pour la gestion et l'optimisation de l'énergie électrique au service d'une installation électrique basse tension, constituant la solution globale d'un constructeur.

Celle-ci consiste à mettre en place un logiciel dédié à la gestion et l'optimisation des installations électriques couplé à son système d'acquisition de données.

Cette solution globale proposée par Enerdis : système expert « E.online » s'intègre parfaitement dans le concept d'efficacité énergétique pour faire face aux attentes environnementales et aux nouvelles exigences de la réglementation actuelle.

Le système E.online est un système multifluides qui effectue l'analyse et le rapatriement des données de mesures appliquées sur des fluides énergétiques : électricité, eau et gaz. Grâce son système d'acquisition et son logiciel intégré, E.online met à disposition des gestionnaires des réseaux d'énergie les clés de la décision pour l'optimisation de ces réseaux.

Nous vous proposons de décrire la solution E.online, son concept, ses fonctionnalités et ses nouveaux enjeux de la gestion d'énergie au service de l'entreprise.

8.4.1 Les enjeux de l'efficacité énergétique vus par Enerdis

« Les économies d'énergie rendues possibles grâce à la mise en application du concept de l'efficacité énergétique permettent d'amortir rapidement le surcoût issu de l'investissement des équipements électriques nécessaires à cette démarche, selon le retour d'expérience que l'on a sur des équipements de ce type en milieu industriel », précise monsieur Alain JOSSE, chef produit chez Enerdis.

La part non négligeable de la ligne budgétaire énergie est d'autant significative dans le coût de production d'un objet fini ou encore du fonctionnement d'un ensemble tertiaire et suggère un regard critique de la part des responsables d'unités et gestionnaires.

« Les retours d'expériences des gains obtenus, grâce à une meilleure gestion et donc d'économie d'énergie électrique réalisées, assurent aux industriels et aux exploitants de sites tertiaires des investissements amortis sur une durée relativement courte (2 à 3 ans en moyenne) », annonce l'entreprise.

Les utilisateurs, et initiateurs de la démarche d'efficacité énergétique dans l'entreprise, sont alors principalement les techniciens de l'industrie, dans le cadre de la maintenance et de l'exploitation des réseaux électriques, les responsables de site et directeurs d'unité de production, les gestionnaires de réseaux, exploitants ou fournisseurs d'énergie électrique ou encore les chargés d'exploitation pour les « grands comptes ».

8.4.2 Un logiciel de gestion des énergies et de supervision

Pour répondre au contexte énergétique actuel et aux contraintes réglementaires la solution de ce fabricant consiste à :

- identifier les gisements d'économies sur un site industriel,
- améliorer l'efficacité énergétique par des actions correctives adaptées,
- connaître et suivre les consommations en énergie sur un site ou sur une unité de production.

Le fabricant Enerdis, spécialiste de la mesure et bénéficiant d'une expérience de terrain avec son précédent système de gestion d'énergie « Winthor », propose maintenant un système « Expert » de mesure associé au logiciel dédié E.Online (figure 8.2).



Figure 8.2 – Le logiciel E.Online d'Énerdis. © Chauvin Arnoux

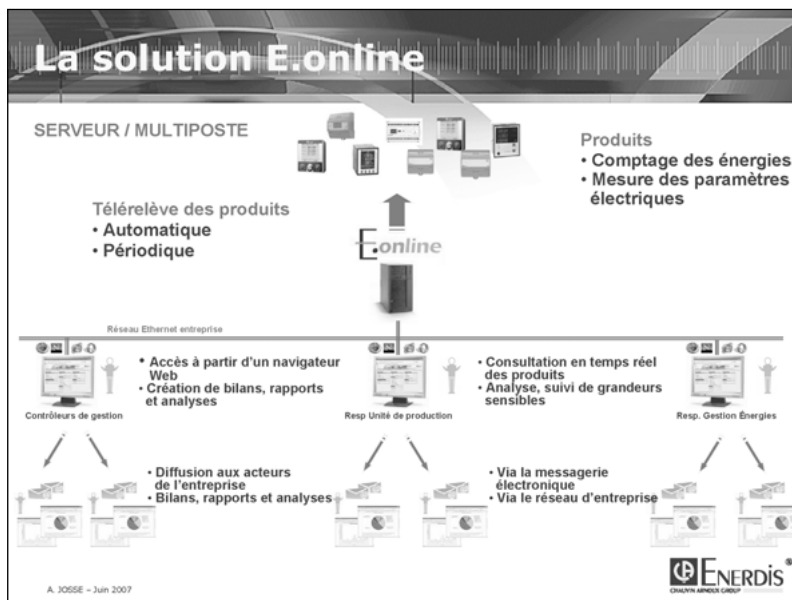


Figure 8.3 – La solution E.Online en version multiposte. © Chauvin Arnoux

Ce développement technique s'inscrit dans une solide expérience en matière de comptage et de mesure des énergies propres à l'activité initiale de cette entreprise en tant que fabricants d'appareils de comptage.

La solution, nommée « E.Online » s'appuie donc sur une organisation complète dont les figures 8.3 et 8.4 décrivent le type d'architecture qui pourra être retenu pour mettre en place la démarche d'Efficacité énergétique selon les besoins de l'entreprise cliente (gestion et optimisation de l'énergie à partir d'un seul poste ou à partir de plusieurs utilisateurs).

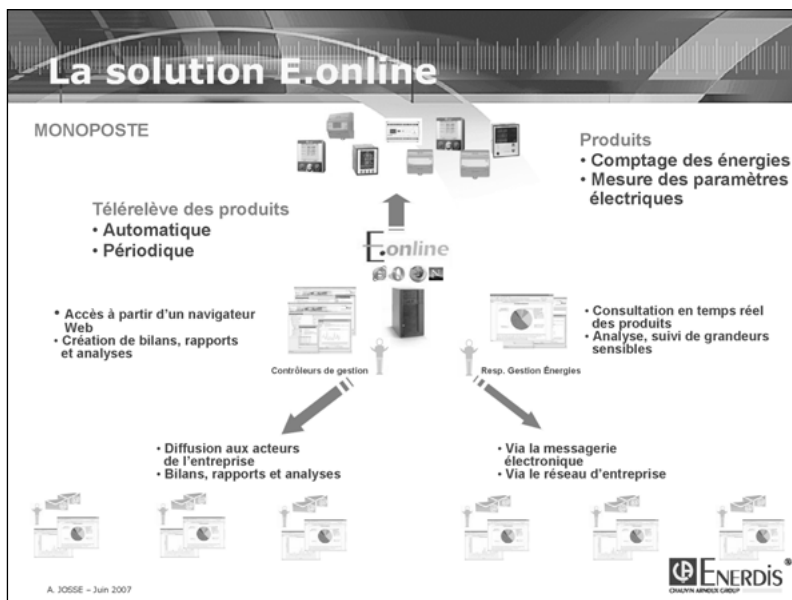


Figure 8.4 – La solution E.Online en version monoposte. © Chauvin Arnoux

■ Rendre opérationnel la mise en place du concept d'Efficacité énergétique

La démarche nécessite d'identifier préalablement un certain nombre de paramètres qui seront incontournables pour la bonne mise en application du concept d'Efficacité énergétique :

- Disposer de la répartition des consommations par nature de l'installation,
- Identifier les sources de réserve de puissance dans la distribution des énergies,
- Avoir la possibilité de piloter de nombreux points de comptage (cartographie détaillée),
- Associer et responsabiliser tous les acteurs de l'entreprise aux économies.

La mise en place, si elle n'existe pas ou partiellement, de points de mesure (capteurs, compteurs d'énergie), sera nécessaire pour l'analyse et le rapatriement des données à distance des différentes consommations. L'exploitant définira les consommations sensibles sur son site sur lesquelles il disposera d'une action potentielle d'économie pour choisir à quel endroit précis le relevé de mesure doit s'effectuer.

Cette organisation, une fois opérationnelle, permet à l'exploitant d'avoir un véritable outil décisionnel à partir d'une analyse critique des consommations d'énergies sur les lignes de distribution électrique qui l'intéressent particulièrement.

Les bilans énergétiques multifluides (eau, gaz, électricité) sont établis, à l'aide du logiciel de gestion, sous forme de tableaux et graphiques. L'extraction de ces informations utiles est possible, fonction des besoins et attentes de l'utilisateur, par tris et groupements logiciels (figure 8.5).

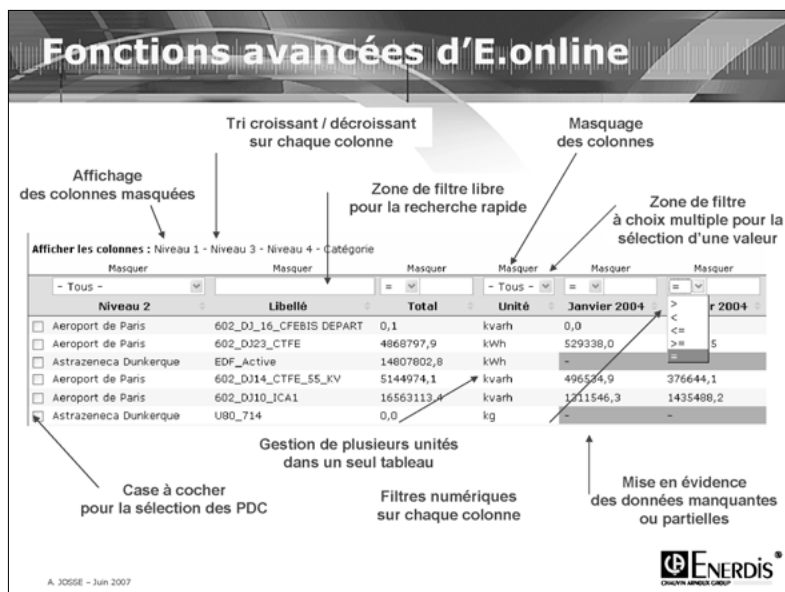


Figure 8.5 – Les fonctions avancées du logiciel de gestion de l'énergie. © Chauvin Arnoux

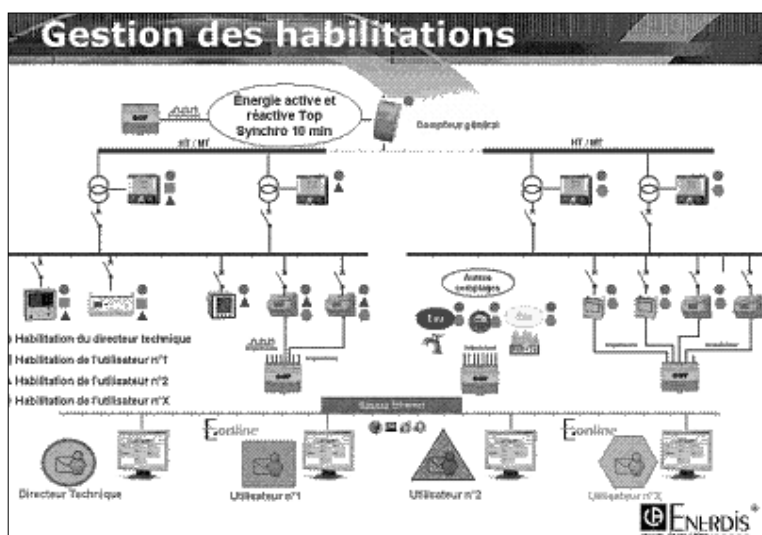


Figure 8.6 – La gestion des habilitations avec E.Online. © Chauvin Arnoux



Figure 8.7 – Le logiciel E-Online et ses options de communication. © Chauvin Arnoux

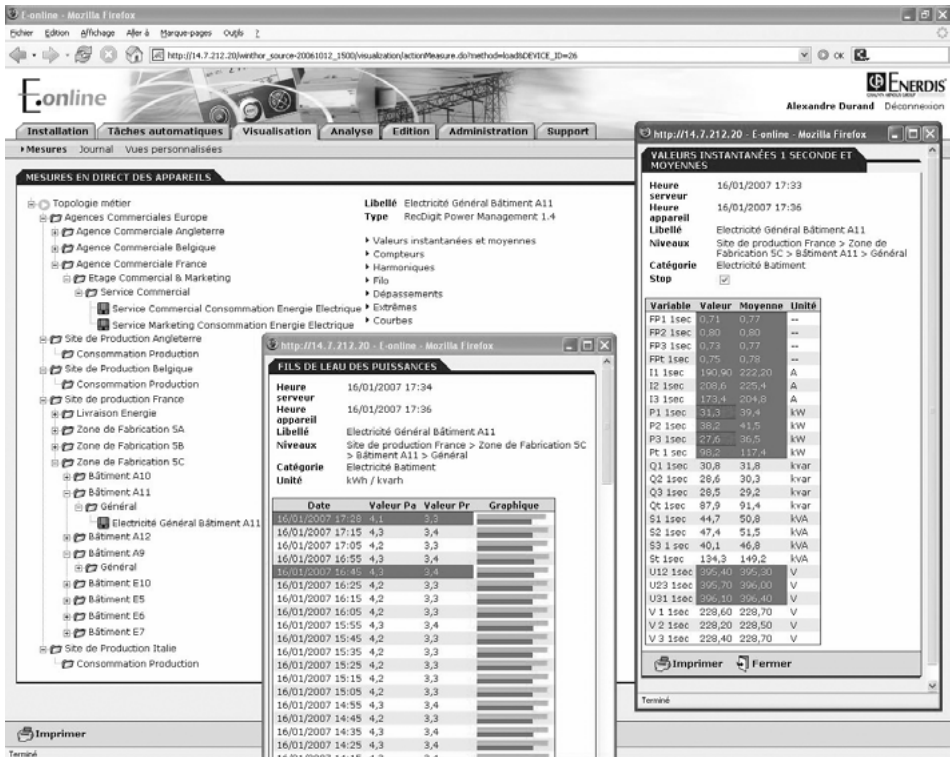


Figure 8.8 – Bilan de puissance à partir de la mesure directe des appareils de comptage. © Chauvin Arnoux

La diffusion de l'information s'effectuant ensuite, compte tenu des droits autorisés (gestion des habilitations, figure 8.6) aux destinataires concernés (chef de production, gestionnaires, responsables de maintenance, etc.) sous forme de bilans et rapports par Intranet, ou messagerie électronique ou encore simplement par version papier.

Le logiciel E.Online autorise une mise en forme de rapports personnalisés avec une édition des bilans et analyses à la demande des utilisateurs et de manière automatique par courrier électronique (figure 8.7) :

- présentation des résultats en unités énergétiques et/ou unités monétaires (figures 8.8 et 9.9),
- bilans sur les valeurs maxi/mini/dépassement atteint sur des grandeurs sensibles (figures 8.10 et 8.11).

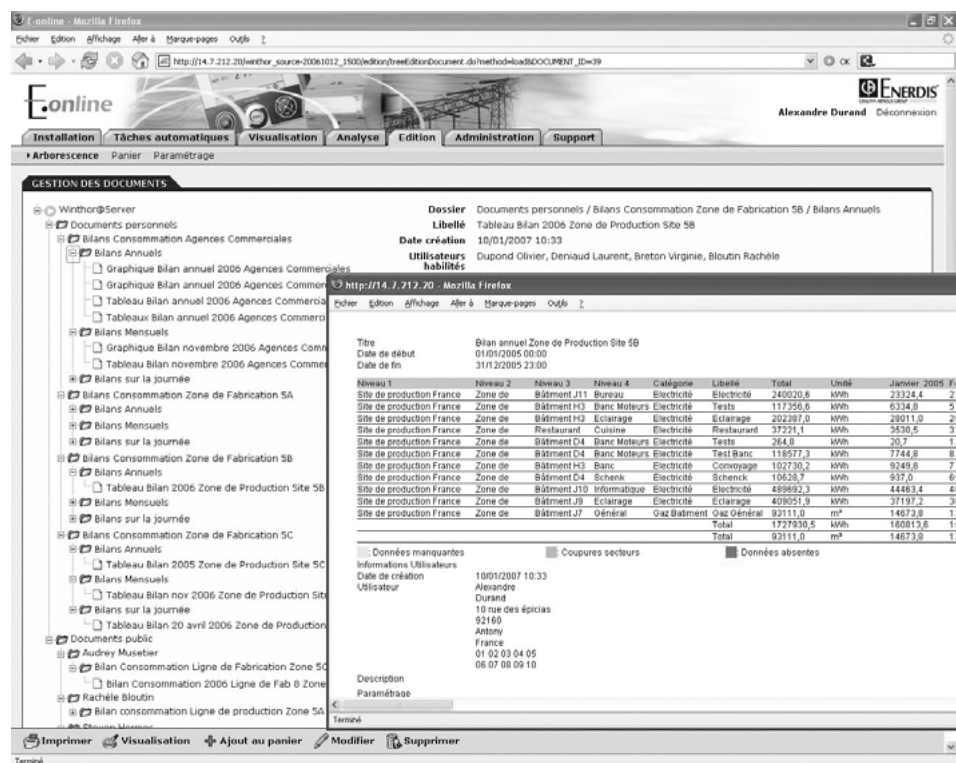


Figure 8.9 – Bilan annuel de consommation sur une unité de production. © Chauvin Arnoux



Figure 8.10 – Relevé de grandeurs sensibles telles que les phénomènes harmoniques. © Chauvin Arnoux

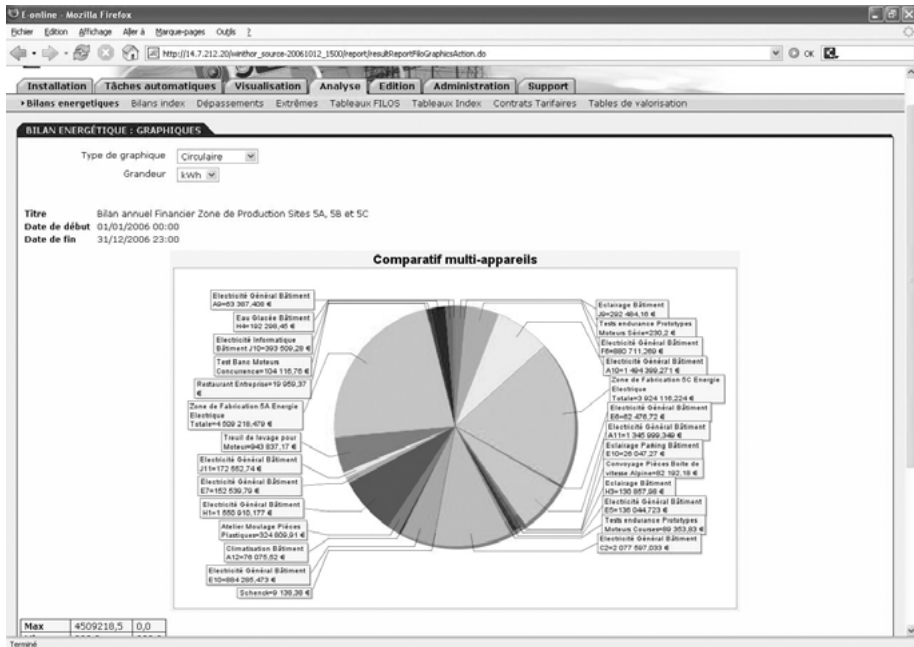


Figure 8.11 – Comparatif de relevés des consommations d'équipements. © Chauvin Arnoux

■ Retours sur investissement

Les retours sur investissement sont obtenus sur des délais relativement courts en regard des équipements mis en œuvre dans le cadre de cette initiative. À titre d'exemple, pour un industriel du secteur de l'automobile, le projet représentait une consommation annuelle de 45 GWh avec une facture en énergie de 2 370 000 euros.

Le gain escompté pour cette opération sur 1 an est de 10 % (soit 237 000 euros) avec un retour sur investissement attendu de 15 mois.

L'investissement dans le système de gestion d'énergie recense pour cette application :

- 250 points de comptage à équiper sur le site,
- 230 000 euros d'investissement global sur ce projet (figure 8.12).

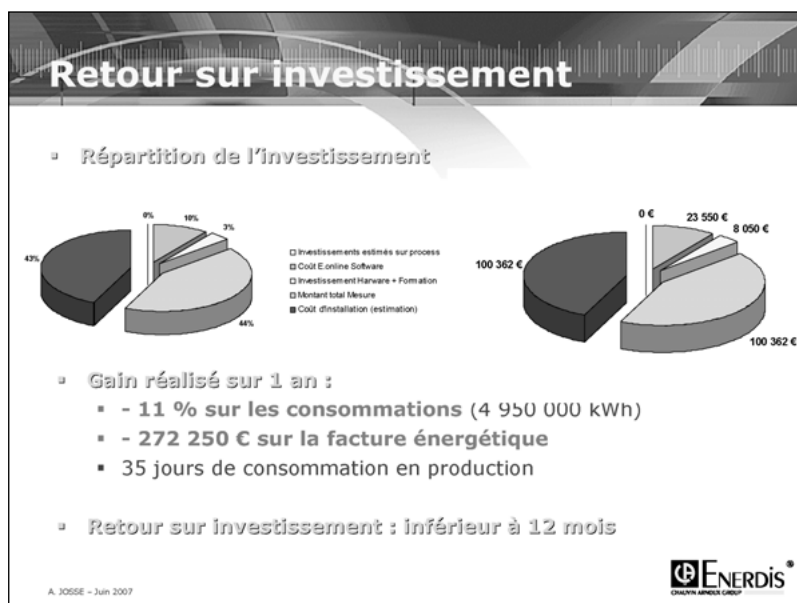


Figure 8.12 – Le retour d'investissement obtenu avec E-Online. © Chauvin Arnoux

Mettre en place le dispositif « E-Online » sur une ou partie d'installation électrique pour appliquer le concept d'efficacité énergétique nécessite d'avoir franchi un certain nombre d'étapes qui autorisent une parfaite maîtrise de l'installation concernée, la connaissance exacte de son architecture et de ses spécificités.

Cette tâche peut paraître fastidieuse au technicien en charge de cette mission, dans un quotidien déjà très riche en activités techniques. Cette aide technique peut être obtenue grâce notamment aux guides édités par le Gimélec (voir le paragraphe 8.1.2 de cet ouvrage).

8.5 Des exemples d'initiatives pour la réduction des consommations d'énergie électrique

Choisis parmi des exemples éloquentes, soit de processus de gestion de l'énergie, soit de mise en place d'une véritable démarche d'efficacité énergétique, les mesures et dispositifs suivants mettent en avant des solutions innovantes et testées dans le contexte de l'efficacité énergétique. Ces initiatives montrent aussi comment impliquer tous les acteurs du processus de gestion de l'énergie au sein de l'entreprise.

8.5.1 La norme KNX, un gisement d'économie d'énergie pour le tertiaire et le résidentiel

Réduire la consommation d'énergie électrique et privilégier le confort des usagers n'est pas à ce jour une utopie. L'exemple suivant reprend le cas d'une entreprise en désir d'extension de ses locaux et qui a opté pour la mise en place d'une solution domotique basée sur la norme KNX (Konnex)¹.

Les solutions techniques retenues et installées sur ce site d'une PME gèrent automatiquement le pilotage des stores, l'éclairage et la VMC (Ventilation mécanique contrôlée). L'économie réalisée sur ce site a été estimée à plus de 40 % sur la consommation d'énergie.

Les solutions qui ont été adoptées sont les suivantes :

- **Gestion de l'éclairage et des stores** – Un premier dispositif optimise l'éclairage naturel par inclinaison de stores vénitiens. Le second dispositif régule l'éclairage selon l'occupation des lieux par les utilisateurs. Lors d'absence prolongée des bureaux la coupure automatique de l'éclairage est effective.
- **Gestion du chauffage** – La température est gérée selon trois modes de chauffage : Confort, Eco et Hors gel. L'apport calorifique dans les bureaux est modulé par l'intermédiaire des ordres de commande transmis dans les fils pilote intégrés dans les radiants.
- **Gestion de la VMC double flux** – La ventilation prend en compte l'activité des locaux et intègre la température extérieure pour assurer un renouvellement d'air en conséquence. La réversibilité du dispositif évite l'usage d'une climatisation, fortement énergivore, en période estivale.

L'ensemble de ce dispositif « intelligent » nécessite la mise en œuvre d'équipements communicants selon la norme KNX. Les composants (actionneurs, capteurs, détecteurs, coupleurs de réseau et horloge numérique) sont alors interconnectés par un bus à paire torsadée (câble coaxial) et dépassent donc le stade d'une installation conventionnelle qui utilise des systèmes spécialisés indépendants pour passer à une installation électrique communicante filaire (figure 8.13).

Une installation de type KNX pouvant très bien être de type communicante filaire, communicante radio ou encore mixer les deux technologies filaire et radio.

1. Pour en savoir plus sur la norme KNX : www.knx.fr

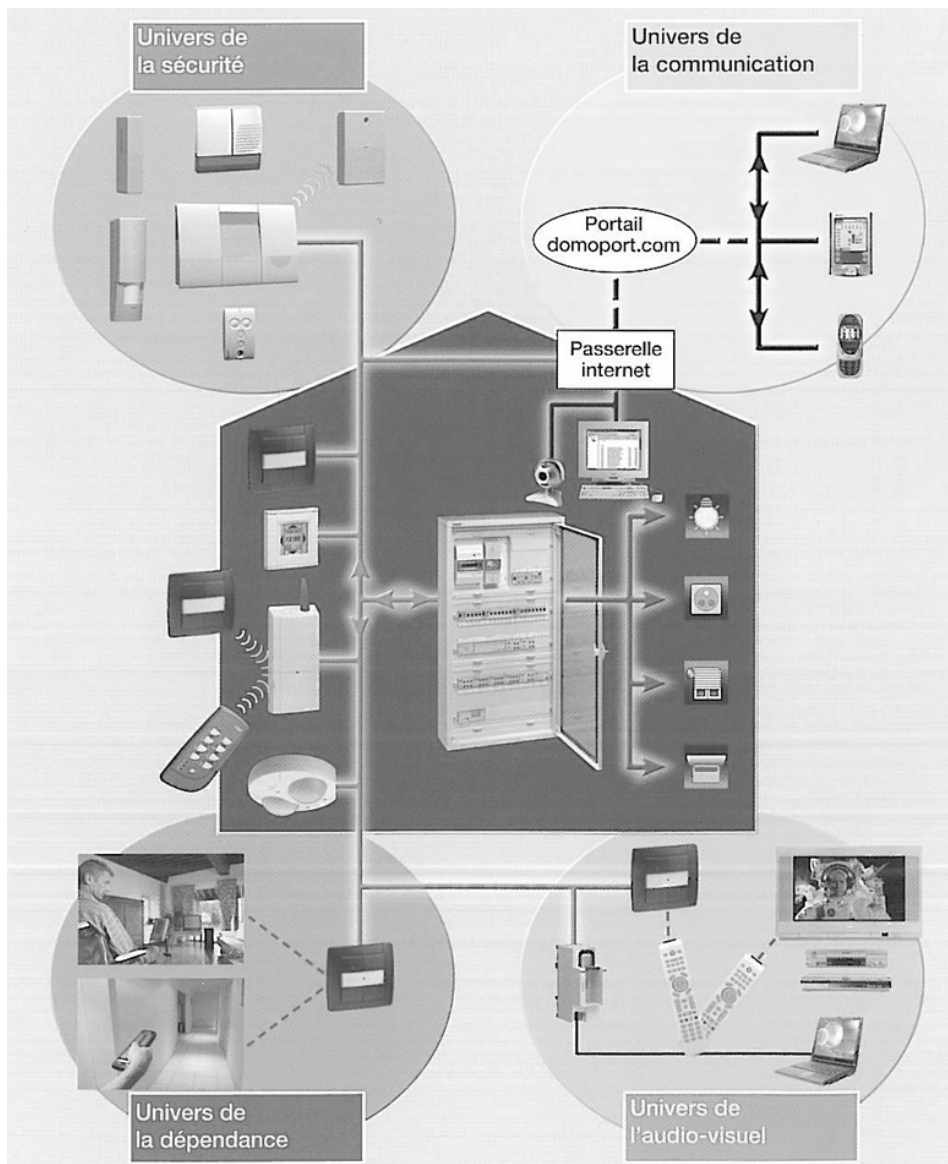


Figure 8.13 – Le principe d'une installation électrique communicante filaire (Doc. Hager).

8.5.2 Wi-LEM : une plate-forme d'acquisition de données pour la surveillance de la consommation d'électricité

Mettre en place une surveillance des consommations électriques sur une partie d'installation peut être réalisé à partir de dispositifs simples avec un investissement moindre. Le dispositif Wi-LEM en constitue un exemple concret.

L'ensemble Wi-LEM (*Wireless Local Energy Meter*) est une plate-forme complète de compteurs divisionnaires à liaison radio facile et rapide à installer. Ce dispositif est une plate-forme d'acquisition de données, sous forme de réseau, destinée à la surveillance de la consommation d'énergie électrique (figure 8.14).

Cette plate-forme Wi-LEM est adaptée pour mesurer et gérer la consommation énergétique et permet par exemple d'identifier et d'expliquer une hausse ou une baisse de la consommation énergétique, de dessiner des tendances de consommation énergétique (hebdomadaires, saisonnières, opérationnelles...), ou encore de diagnostiquer les zones de gaspillage énergétique.

Wi-LEM trouve son utilité dans différents secteurs tels que :

- **L'industrie** : généralement pour surveiller les machines et allouer les coûts selon les lignes de produits.
- **Les grandes chaînes de magasin** : pour réduire les consommations d'énergies de chaque établissement.
- **Les centres de données**.
- **Les écoles et centres de formation** : pour réaliser des expériences et découvrir des idées innovantes sur la gestion énergétique.
- **Les studios de télévision** : pour l'allocation des coûts.

La plate-forme Wi-LEM est constituée des composants suivants :

- **Compteur électrique divisionnaires (*Energy Meter Node* ou EMN)** : module de calcul des paramètres électriques (kWh, kVarh...) associé à 1 ou 3 TI. Ils peuvent être déployés pour mesurer la consommation d'électricité dans n'importe quelle armoire électrique existante et transmettre les données.
- **Le Wi-Pulse** : compteur d'impulsions permettant de lire à la fois des compteurs existants, pour l'eau, le gaz ou l'électricité, et des compteurs divisionnaires ayant une sortie à impulsions et nécessitant une surveillance centralisée.
- **Le Wi-Zone** : capteur de température et d'humidité pouvant permettant de surveiller les conditions ambiantes d'un local.
- **Le répéteur (*Mesh Node*)** : module assurant la liaison entre plusieurs EMN. Ils permettent d'augmenter la distance de la communication radio.
- **La passerelle (*Mesh Gate*)** : interface de gestion du réseau radio. Il fournit les données au PC via un port série standard.

Wi-LEM présente de nombreux avantages supplémentaires par rapport aux compteurs divisionnaires traditionnels, tant au niveau de l'armoire électrique, qu'au niveau de l'installation du réseau et de son exploitation (gain de temps de câblage et d'encombrement).

Contact : <http://www.lem.com/hq/fr/content/view/276/304/>

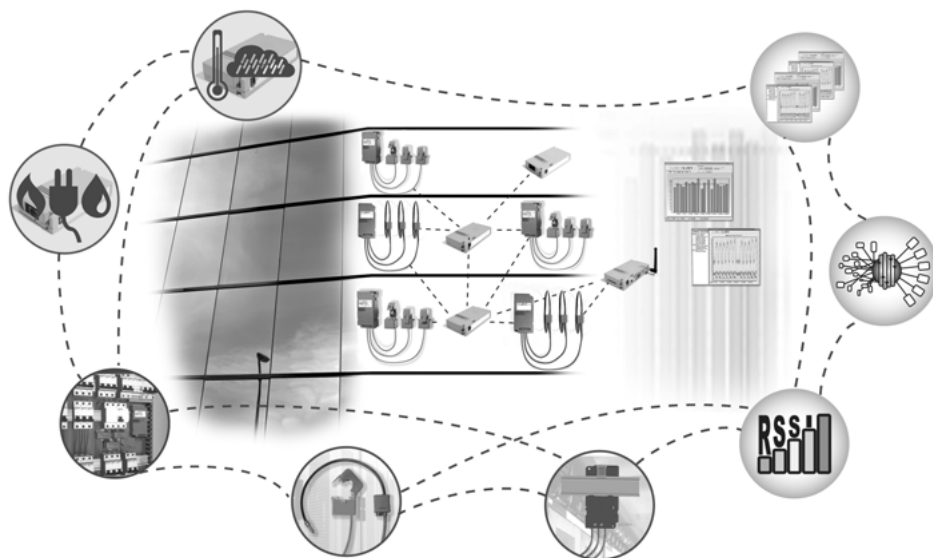


Figure 8.14 – La plate-forme de surveillance des consommations Wi-LEM pour une installation donnée.

8.5.3 L'application du concept d'efficacité énergétique pour un processus de production

Le groupe Festo, l'un des principaux fournisseurs mondiaux d'automatisation industrielle, a bien compris l'intérêt d'axer son offre sur le concept d'efficacité énergétique, aussi bien :

- pour les produits fabriqués : actionneurs, systèmes de positionnement ou de préhension ;
- pour les solutions logicielles de surveillance des consommations ou d'aide au dimensionnement ;
- pour ses services, tant au niveau de la formation que pour l'aide aux économies d'énergie (*Energy Saving Service*).

Le groupe se devait donc d'être lui-même un modèle en la matière sur ses propres sites de production. L'entreprise a mis en pratique sur son plus grand site de production et de logistique : Sankt Ingbert en Allemagne un nouveau concept de production d'énergie appelé « Concept énergétique global » (figure 8.16). Ce concept prend en compte la climatisation des locaux, la génération de l'air comprimé et la production d'électricité, cette dernière permettant d'autogénérer 12 % de l'énergie électrique consommé sur le site de production.

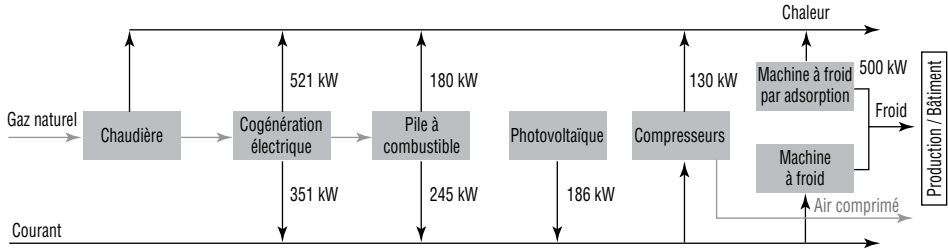


Figure 8.15 – Le concept énergétique global appliqué sur le site de Sankt Ingbert.

Pour parvenir à ce résultat, plusieurs types d'équipements sont mis en service sur le site de production (figure 8.15) :

- **La pile à combustible** – La pile à combustible au carbonate fondu Hotmodule H 3002 installée dans cette chaîne de production d'énergie est un empilement de cellules de nouvelle génération. Son rendement est d'environ 47 %.

La cogénération d'énergie électrique et de chaleur représente :

- Puissance électrique : $Q_{el} = 245 \text{ kW}$
- Puissance thermique : $Q_{th} = 180 \text{ kW}$

Elle permet une réduction des émissions de CO_2 par kWhel d'environ 30 %, pour un fonctionnement de plus de 7 500 heures par an.

- **La centrale de cogénération électrique et thermique** – Cette centrale utilise la chaleur des gaz d'échappement produits par la génération d'électricité pour alimenter un circuit thermique. Elle offre un très haut rendement pour l'exploitation à pleine charge toute l'année.

- $Q_{el} = 351 \text{ kW}$
- $Q_{th} = 521 \text{ kW}$

- **La machine de génération de froid par adsorption** – La génération de froid utilise de l'eau comme fluide frigorigène, en harmonie avec l'environnement. La récupération de chaleur est gratuite (de 55 à 95 °C) pour une production d'eau froide de température inférieure à 5 °C.

- Puissance frigorifique : 500 kW

- **La génération photovoltaïque** – Installés sur les toitures de l'usine de St. Ingbert avec une puissance de production totale de 186,6 kWp, les 486 modules photovoltaïques couvrent une surface de 3 165 m². Ils sont constitués de cellules photovoltaïques intégrées à des bandes d'étanchéité (figure 8.17) :

L'installation associe à cet effet 28 onduleurs de réseau de type Frosinus IG 60 et 2 onduleurs de réseau de type Frosinus IG 30.

L'énergie électrique générée en 2006 était de 169,75 MWh, et de 170,93 MWh en 2007. La réduction correspondante de CO_2 est évaluée à 120,63 t/an.

- **La génération d'air comprimé** – L'amélioration de l'efficacité de l'air comprimé s'effectue par :

- le regroupement des circuits d'air comprimé de l'ancien atelier ;
- le pilotage des compresseurs déportés par un capteur de pression central ;

- la réduction échelonnée de la pression du circuit de 7,5 bars à 6,5 bars ;
- un compresseur commandé en fréquence pour compenser les pointes ;
- la récupération systématique de la chaleur à des fins de chauffage et de refroidissement.

Elle permet ainsi une économie de 20 % de l'énergie électrique, soit 351 MWh/an, et une réduction de CO₂ de 249 t/an.

- **La ventilation par déplacement dans l'atelier** – L'entreprise privilégie dans ses ateliers la ventilation par déplacement : l'air neuf, à une température légèrement inférieure à celle de l'air ambiant, est insufflé en partie basse à une vitesse relativement faible. L'évacuation se fait par le plafond. Ce type de ventilation permet une évacuation optimale de la chaleur, une sensation de « lac d'air frais » dans les zones de travail, une réduction des polluants inhalés et du débit d'air requis. Le potentiel innovateur de cette approche, récompensée par un Energy Efficiency Award, réside dans l'interaction intelligente des composants ainsi que dans leur pilotage et régulation par anticipation. Il en découle une économie d'énergie annuelle de 366 000 euros par rapport à une construction neuve en technique conventionnelle.

Au final, l'exploitation du site de St. Ingbert est donc à la fois rentable et soucieuse de l'environnement.

Les équipements mis en œuvre permettent 38 % d'économie d'énergies, soit une réduction de consommation d'électricité de 44 % et de gaz de 20 %, représentant 3 750 tonnes de CO₂ en moins par an, l'équivalent de ce que produisent environ 2 000 maisons individuelles.

Sur un autre site du groupe, l'usine de Berkheim 2, a été installée une solution de chauffage solaire, aux caractéristiques techniques suivantes :

- Énergie thermique générée maxi. : 1 200 kW
- Surface de capteurs : env. 1 300 m²
- Puissance permanente maxi. : 650 kW

En été, cette installation contribue au fonctionnement des machines à froid par adsorption ; en hiver, au chauffage des bâtiments et, à faible température, à l'activation du noyau de béton d'un bâtiment de l'usine. L'activation du noyau de béton est un système de régulation de la température basée sur la grande capacité de stockage de chaleur du béton et la très bonne conductivité thermique de l'eau (ou de l'air) contenue dans des tuyaux intégrés aux sols et plafonds.

Les capteurs solaires sont directement reliés au ballon d'eau sans échangeur intermédiaire ; l'eau y circule sans antigel. La protection contre le gel est assurée par la régulation qui fait circuler l'eau temporairement dans les capteurs lorsqu'il y a risque de gel.

Comme le montre l'engagement du groupe Festo, l'efficacité énergétique, outre le contexte de tarifs élevés de l'énergie et une prise de conscience « écologique » qui pousse les industriels dans cette voie, cette démarche constitue aussi une véritable opportunité pour les entreprises de se démarquer de la concurrence internationale.

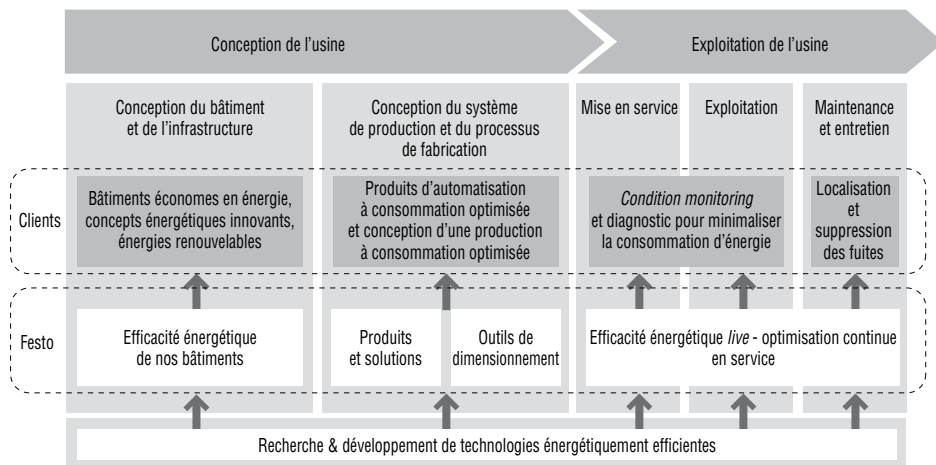


Figure 8.16 – Le concept d'efficacité énergétique selon Festo.

Pour prendre l'exemple de l'énergie solaire en France, si elle continue toujours son ascension avec 105 MW installés en 2008 contre 35 MW l'année précédente, 80 % des installations restent des systèmes de faible puissance équipant les habitations domestiques, selon le Soler, le groupement français des professionnels du solaire photovoltaïque.

Il est donc temps que les entreprises industrielles en France comme en Europe montrent l'exemple. L'application du Grenelle de l'environnement et de ses engagements, particulièrement pour la réglementation 2012, devrait voir se généraliser ce type d'initiatives, qui, comme le démontre l'exemple précédent, non seulement s'inscrivent dans le cadre du développement durable, mais sont aussi à terme une solution évidente et non négligeable d'économies d'énergie.



Figure 8.17 – La toiture photovoltaïque du site de production de Sankt Ingbert (Groupe Festo).

A

ADEME 177
allure sinusoïdale 16
analyse 157
 de la qualité 157
 des relevés 149
 harmonique 128
analyseur
 CA 8334 135
 CA 8335 134
 CA 8352 135
 de qualité réseau 133
 de réseaux 136
 Fluke 435 137
 Fluke 43B 136
 MAP 607 138
appareil
 de mesure 130
 RSM 23

B

bilan énergétique 183
bureau d'études 166

C

caméra infrarouge 140
 InfraCam 146
 RayCam CA 1884 144
 RayCam TI 10 146
 RayCam TI 25 145
 ThermaCam série T 147
CEI (Commission électrotechnique internationale) 62
CEM (Concept de compatibilité électromagnétique) 55

Cenelec (Comité européen de normalisation électrotechnique) 62
charge
 déformante 3, 37, 125
 linéaire 11, 13, 14
 non linéaire 3, 11, 14
Chauvin Arnoux 136
CISPR (Comité international spécial des perturbations radioélectriques) 62
club S2EE 177
cogénération d'énergie électrique 192
compensation 50
 d'énergie réactive 178
comptage 179
condensateur 36
conducteur
 de phase 41
 neutre 41, 42, 154
contrat Émeraude 66
convecteur électrique 13
convertisseur PWM 99
 $\cos \varphi$ 14
coupures 55
courant
 déformé 14, 23, 38
 efficace (mesure) 23
 harmonique 40, 108, 120, 128
creux de tension 55

D

décomposition d'un signal 30
déformation des signaux 12

démarche d'efficacité énergétique
175
développement durable V
diagnostic 125, 163
 harmonique 157
disjoncteur 38
 magnéto-thermique 38
distorsion harmonique 108, 157
distribution basse tension 56
DPF (*Displacement Power Factor*
ou déplacement du facteur de
puissance) 15
DSP (*Digital Signal Processor*) 99
dysfonctionnements 31
 électriques 125

E

E.online 180
échauffement des conducteurs 36
éclairage fluorescent 18
EDF 66
 contrat Émeraude 66
efficacité énergétique 175
électrolyse 106
émission 63
Enerdis 180
énergie réactive 72
énergimètre 133
enregistreur
 de qualité réseau 137
 VR 1710 139

F

facteur
 de crête 26, 130
 important 37
 de puissance 14, 36, 73, 133
facture énergétique 175
Festo 191
filtrage 79
 ABB 95
 actif 84
 harmonique 47

 passif 82
 Schneider Electric 108
filtre
 actif 85, 95, 96
 de type SineWave™ 112
 PQF 96
 PQFA 102
 PQFL 103
 THM 111
amorti 82, 84
homopolaire de type CleanWave®
 122
homopolaire 95
hybride 85
LC
 compensé 109
 non compensé 109
 non compensé à contacteur 109
passif 82, 87, 95
 double pont 110
 LC 108
 THF 95
résonant 82, 83
shunt 82
 type de ~ 94
flicker 55, 58
Fluke 133
fondamentale 5, 28
fréquence
 de l'harmonique 28
 de résonance 75, 77
fondamentale 27

G

génération
 d'harmoniques 125
 photovoltaïque 192
Gimélec 176
gradateur 4, 18
 à angle de phase 16
Grenelle de l'Environnement 175
guides pratiques méthodologiques
 176

H-I

harmoniques, mesure 130
 IFOV (*Instantaneous Field Of View*)
 143
 IGBT (*Insulated Gate Transistor
 Bipolar*) 100
 immunité 63
 impédance du réseau 1
 inductance 72
 anti-harmonique 80

L

lampe
 à ballast électronique 21
 à fluorescence 16
 à incandescence 13
 à vapeur haute pression 16
 fluo compacte 16
 halogène 19
 logiciel
 E.Online 181
 Harmonique 167
 loi d'Ohm 8

M

maintenance électrique 144
 mesures 147, 179
 MLI (Modulation de largeur
 d'impulsion) 17
 moteur asynchrone 16

N

NFC (Norme française du domaine
 électrique) 62
 norme 61
 CEI 61000-1-1 62
 CEI 61000-2-1 62
 CEI 61000-2-2 62
 CEI 61000-2-4 62
 CEI 61000-2-5 62
 CEI 61000-3-2 63, 64
 CEI 61000-3-4 63, 64
 CEI 61000-3-6 63

CEI 61000-4-1 63
 CEI 61000-4-13 63
 CEI 61000-4-15 63
 CEI 61000-4-30 132
 CEI 61000-4-7 63, 131
 CEI 61000-6-1 63
 CEI 61000-6-2 63
 CEI 61000-6-3 63
 CEI 61000-6-4 63
 EN 50081-1 63
 EN 50081-2 63
 EN 50082-1 63
 EN 50082-2 63
 EN 50160 62, 132
 IEC 61000-4-30 classe A 132
 KNX 188

O

onduleur 4, 17, 43, 44
 ordinateur
 courant consommé 6
 onduleur 4
 oscilloscope 131

P

passerelle 190
 pel 143
 perturbations électromagnétiques
 « basses fréquences 61
 « hautes fréquences 61
 phénomènes de résonance 36
 pile à combustible 192
 pince
 ampéremétrique 38
 de mesure 131
 Fluke 345 133
 harmonique 88, 132, 133, 148,
 149
 multimètre 133
 pollueur 12
 pollution harmonique 2, 8, 33, 44,
 125, 127
 Power Log 139

puissance
 active 14, 79
 apparente 73
 déformante 14
 réactive 14

Q

qualimétrie 137
 qualité 55, 104
 d'énergie 133
 mesures 125
 réseau
 analyseurs 133
 enregistreurs 137
 Qual-SRT 138
 Qual-View 138

R

réactance 72
 redresseur 86
 monophasé 16, 19
 PD2 86
 triphasé 16, 20
 régulation varométrique 48
 remédiation 130, 160
 répéteur 190
 résonance 36, 71, 171
 parallèle 75
 série 75, 77
 retour sur investissement 187
 RMS (*Root Mean Square*) 23

S

série de Fourier 28
 signal déformé
 harmoniques 7
 sinusoïdes 8
 valeur efficace 25
 sinusoïde 107
 spectre du signal 29

surtension 55, 57
 à la fréquence industrielle (50 Hz)
 58
 atmosphérique 58
 de manœuvre 58

T

taux
 de distorsion 16
 de l'harmonique 25
 harmonique 27, 84, 127
 de tension d'harmonique
 individuel 31
 global d'harmonique 90, 149
 individuels d'harmonique 130
 tension
 fondamentale 8
 harmonique 8, 36, 125
 THD (*Total Harmonic Distorsion*) 27
 THD-F 27
 thermogramme 145
 thermographie V
 infrarouge 142
 THF (Très hautes fréquences) 61
 transformateurs 1
 TS 3000 86

U-V

UTE (Union technique de
 l'électricité en France) 62
 valeur efficace du courant 25
 variation
 de la fréquence 55
 de vitesse 16

W-Z

Wi-LEM 190
 Wi-Pulse 190
 Wi-Zone 190
 zingage électrolytique 86