

Éric Félice, Philippe Révilla

QUALITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Préface d'Antoine de Fleurieu

L'USINE NOUVELLE

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 autorisation 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 prémonitoire 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 les 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).

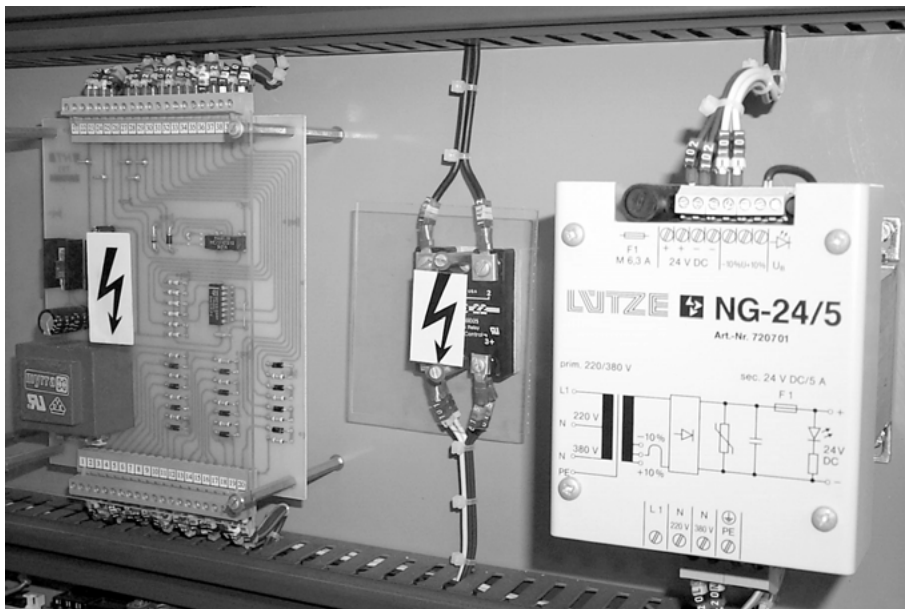


Figure 1.1 – Convertisseur générateur d'harmoniques
sur une chaîne de traitement de surface.

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.