

# La qualité des réseaux électriques

ÉRIC FELICE <sup>[1]</sup>

*Les journées techniques proposées par les fabricants de matériels et d'équipements électriques contribuent à la veille technologique des enseignants. Elles sont aussi l'occasion d'enrichir nos relations avec le monde de l'entreprise et les spécialistes de l'énergie. Exemple avec une étude de cas.*

De nombreux partenaires industriels organisent des formations et séminaires à destination des professionnels, et sont attentifs à y associer le public des professeurs. C'est le cas de Chauvin Arnoux, qui propose des modules de formation sur une journée dans le domaine de la qualité des réseaux électriques, du contrôle de la sécurité électrique au regard de la NF C 15-100, de la thermographie et ses applications (voir « L'offre de formations de Chauvin Arnoux » en encadré). J'ai suivi le module ③, « Installations électriques et qualité de l'énergie », dont je vous livre ici l'essentiel. Il s'agissait de se confronter à des cas pratiques rencontrés par les professionnels de l'énergie illustrant la majorité des problèmes liés aux réseaux, et de se familiariser avec des outils de mesure actuels permettant de les analyser, d'en établir un diagnostic précis et de proposer une ou des solutions pour y remédier.

## Qu'est-ce que la qualité d'un réseau ?

La Commission de régulation de l'énergie (CRE) a pour mission de superviser les gestionnaires des réseaux publics. Elle publie tous les ans des indicateurs portant sur la qualité de l'électricité, et incite les gestionnaires des réseaux d'électricité à une meilleure qualité de service. Elle contribue également à des rapports qui peuvent être à visée nationale ou européenne.

Selon elle, la qualité de l'électricité recouvre trois notions différentes (voir en encadré) :

- La continuité d'alimentation (coupures d'électricité)
- La qualité de l'onde de tension (phénomènes qui perturbent le fonctionnement des appareils électriques)
- La qualité de service (relations avec les gestionnaires de réseau notamment)

## mots-clés

développement durable, électrotechnique, énergie

Il est de la responsabilité des gestionnaires des réseaux publics de garantir un certain niveau de qualité de l'électricité aux utilisateurs. Cette responsabilité est partiellement encadrée, notamment par des textes législatifs et réglementaires et par certaines clauses incluses dans les différents contrats.

Cependant, et nous le verrons dans l'étude de cas proposée, la qualité de l'énergie distribuée sur le réseau électrique peut être dégradée par des utilisateurs dits perturbateurs de réseaux, matérialisés par des charges non linéaires à l'origine de la déformation de l'onde de courant. Cette déformation engendre alors une dégradation de la sinusoïde de tension sur le réseau, pouvant être à l'origine de dysfonctionnements pour les autres utilisateurs, préjudiciables pour des appareils et équipements sensibles (automatismes, électronique de commande...). Ces dysfonctionnements peuvent aussi mettre en évidence des phénomènes de résonance, liés aux fréquences harmoniques générées, qui peuvent avoir des conséquences fâcheuses, surcharge ou courts-circuits.

La norme européenne sur la qualité de la tension EN 50160, qui fait aujourd'hui référence, définit des seuils pour un certain nombre de perturbations de l'onde de tension.

## La mesure au service du diagnostic

La recherche de la qualité de l'énergie électrique s'inscrit dans le contexte de l'efficacité énergétique. La ligne budgétaire énergie étant intégrée au coût de production d'un objet fini, elle a une incidence sur la compétitivité de l'entreprise. On mesure là toute l'importance de la qualité d'un réseau électrique. Les équipements pollueurs présents sur un réseau donné doivent être identifiés, et les solutions adéquates mises en œuvre.

La mesure constitue un élément clé de l'optimisation énergétique de l'installation analysée. La mesure sur site, à l'aide des instruments mis aujourd'hui à disposition par les fabricants, permet d'obtenir une image précise des données du réseau. L'observation et l'analyse des consommations électriques, ainsi que des perturbations éventuelles affectant l'installation, permettront d'établir un diagnostic et de mettre en œuvre les solutions adéquates pour optimiser l'effi-

[1] Chef de travaux au lycée des métiers Amyot-d'Inville de Senlis (60).

science de l'installation, comme nous allons le voir à travers l'étude d'un cas réel.

### Étude d'un cas de consommation excessive d'énergie réactive

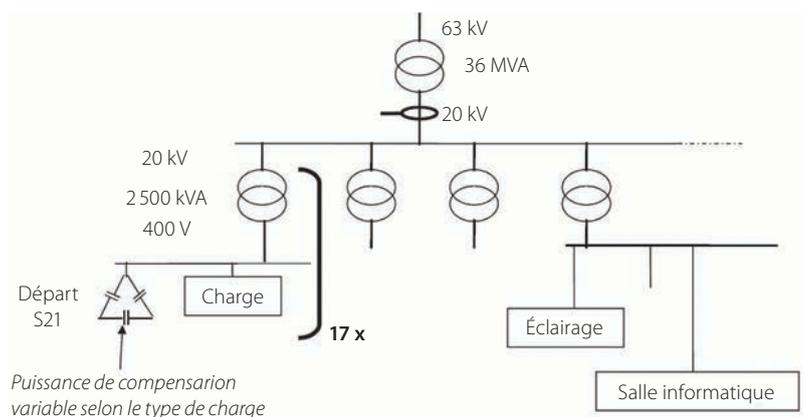
Cette étude de cas concerne une installation industrielle équipée d'une batterie de compensation d'énergie réactive, solution que l'on met classiquement en place dans une installation industrielle présentant un facteur de puissance médiocre afin d'éviter les pénalités du fournisseur. En effet, les distributeurs d'énergie électrique facturent aux utilisateurs la surconsommation d'énergie réactive à partir d'un seuil correspondant à une tangente  $\phi$  de 0,4 au maximum et à un  $\cos \phi$  de 0,93 au minimum.

Pour établir un diagnostic des défaillances constatées, Chauvin Arnoux, expert en matière de réseaux électriques, a mené une campagne de mesures in situ à l'aide d'un analyseur de réseau. Il s'agit de comprendre ce qui a conduit cette installation à une surconsommation d'énergie réactive.

Dans un second temps, nous verrons les prescriptions proposées pour y remédier. Elles pourront, une fois affinées et validées par un bureau d'ingénierie pour l'amélioration de la qualité du réseau électrique, se décliner en solutions techniques.

#### L'installation

Un réseau de 63 kV alimente 17 transformateurs HTB-HTA, qui délivrent une puissance apparente totale de 36 MVA sous 20 kV à l'ensemble des équipements du site. La puissance souscrite auprès du distributeur ERDF est de 36 MW pour une sollicitation réelle de 16 MVA. On remarque sur la figure 1 la présence des batteries de condensateurs assurant le relèvement du facteur de puissance. Elles sont couplées en fonction de la charge sollicitée par les récepteurs de l'installation électrique. Plusieurs rangées de gradins de condensateurs peuvent alors être enclenchées suivant la puissance appelée sur le réseau par les charges électriques. La puissance totale de compensation réactive calculée et effective est de 650 kvar répartie sur 10 gradins de condensateurs mis en service manuellement sur le réseau 400 V - 50 Hz.



1 Représentation de l'installation étudiée avec une compensation d'énergie réactive

#### La problématique

L'industriel du site est amené à payer des pénalités au distributeur pour cause de consommation excessive d'énergie réactive durant la période allant du 1<sup>er</sup> novembre au 31 mars, malgré la présence d'une batterie de condensateurs en aval de chacun des transformateurs. D'autre part, des dysfonctionnements fréquents et aléatoires se manifestent sur différents équipements sensibles de l'installation électrique, se traduisant par le passage en mode by-pass de l'onduleur alimentant une salle informatique (dans ce cas, l'onduleur ne filtre plus les défauts de la tension d'alimentation du réseau) et la destruction de luminaires en divers endroits du site.

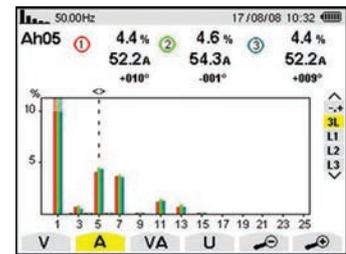
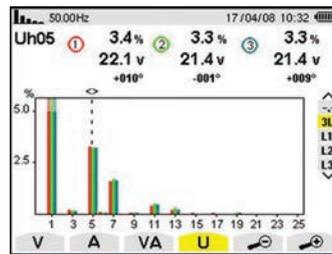
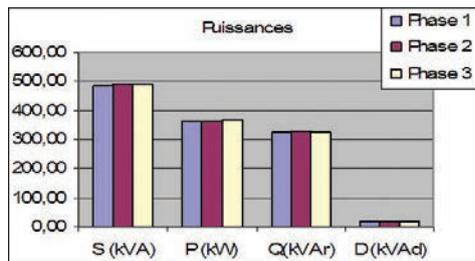
Les techniciens de maintenance pensent que ces événements sont corrélés à l'enclenchement des gradins de condensateurs de relèvement du facteur de puissance. Des problèmes de résonance sur le réseau 20 kV du fait de la mise en service des condensateurs constituent alors l'hypothèse la plus probable.

#### Les différentes étapes du diagnostic

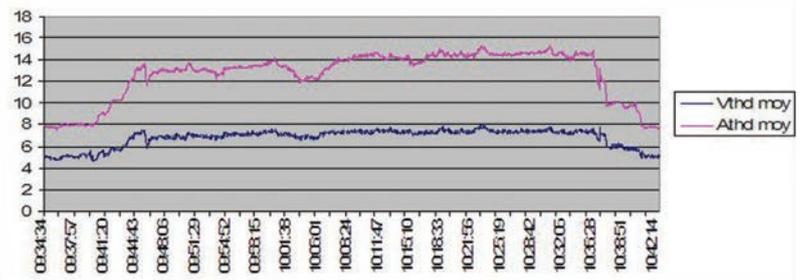
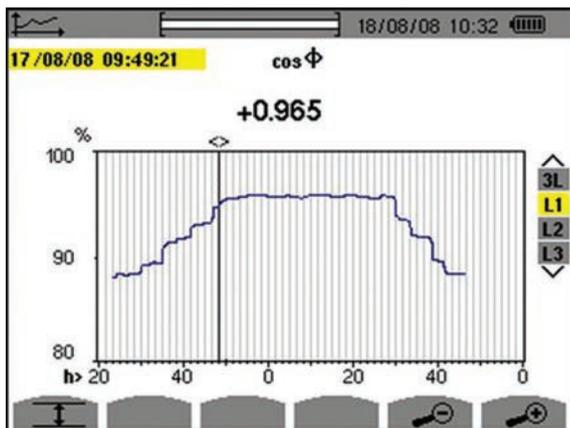
##### Étape 1 : sans les condensateurs

Des relevés ont été réalisés, sur une nuit, à l'aide de l'appareil de mesure Qualistar+ (voir en encadré), sans l'usage des condensateurs. La surconsommation d'énergie réactive est concrètement constatée ; l'installation présente un faible  $\cos \phi$  de 0,75.

Tensions Simples	Urms (V)	Irms (A)	S (kVA)	P (kW)	Q(kVAr)	D (kVAd)	DPF	PF	ThdU (%)	Thdl (%)	I 50Hz (A)
Phase 1	396,16	1234,60	489,10	364,70	325,42	17,74	0,75	0,75	4,32	5,72	1232,58
Phase 2	395,37	1246,58	492,86	365,30	330,37	18,14	0,74	0,74	4,24	5,81	1244,48
Phase 3	395,79	1243,53	492,17	368,64	325,59	18,16	0,75	0,75	4,23	5,73	1241,48
Neutral		22,43									
Total			1474,14	1098,65	981,38	54,05					



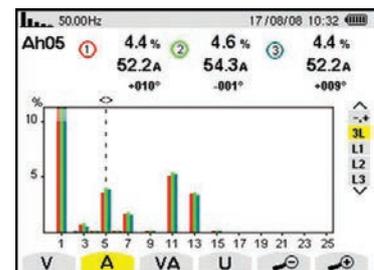
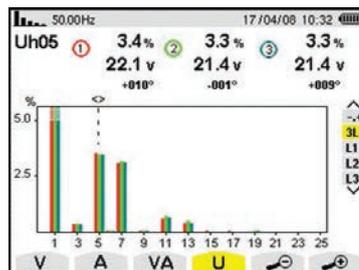
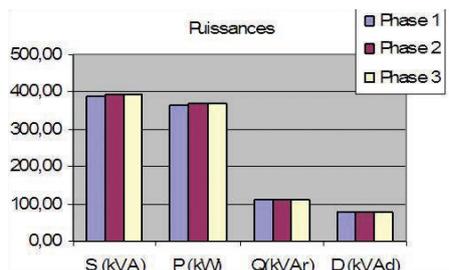
2 Les relevés sur un départ de transformateur, sans condensateurs



4 L'évolution à la hausse des taux de distorsion harmonique en tension et en courant

3 L'évolution du facteur de puissance

Tensions Simples	Urms (V)	Irms (A)	S (kVA)	P (kW)	Q(kVAr)	D (kVAd)	DPF	PF	ThdU (%)	Thdl (%)	I 50Hz (A)
Phase 1	404,02	963,31	389,20	365,10	110,85	76,75	0,95	0,94	6,49	18,21	947,20
Phase 2	402,79	971,79	391,43	367,28	109,72	79,25	0,96	0,94	6,77	18,67	954,69
Phase 3	403,16	974,67	392,94	369,37	110,11	76,47	0,96	0,94	6,54	17,94	958,86
Neutral		13,06									
Total			1173,57	1101,75	330,68	232,47					



5 Les relevés sur un départ de transformateur avec condensateurs

## L'offre de formations de Chauvin Arnoux

Voici les modules de formation sur une journée proposés par le fabricant d'appareils de mesure dans le domaine de la qualité des réseaux électriques, du contrôle de la sécurité électrique au regard de la NFC 15-100, de la thermographie et ses applications :

### ① Nécessité, méthodes et mise en œuvre des mesures sur les installations électriques selon la norme NFC 15-100

- Propriétés et objectifs des schémas de liaisons à la terre (SLT)
- Comportement des schémas de liaisons à la terre vis-à-vis des harmoniques
- Mesure de résistance d'isolement
- Mesures de continuité électrique des conducteurs de protection
- Mesure de résistance des prises de terre
- Test de dispositifs différentiels résiduels

### ② Comprendre et vaincre les harmoniques

- Acquérir les bases des phénomènes harmoniques
- Identifier et caractériser les sources de perturbations
- Mesurer et mettre en évidence de façon expérimentale des phénomènes à l'aide d'un analyseur d'harmonique
- Connaître les normes et labels en vigueur
- Comprendre l'effet des harmoniques sur les constituants électriques à partir de cas réels
- Savoir remédier aux perturbations harmoniques

### ③ Installations électriques et qualité de l'énergie

- Consommation excessive d'énergie réactive entraînant le paiement de pénalités
- Perte de la continuité de service au premier défaut en régime IT
- Déclenchements intempestifs des disjoncteurs de protection d'équipements électriques industriels
- Déclenchements intempestifs des disjoncteurs différentiels
- Défaut aléatoire sur une distribution électrique

### ④ Thermographie

- Comprendre les phénomènes d'échanges de chaleur
- Réaliser des mesures avec une caméra de thermographie infrarouge

Ces modules sont complémentaires et correspondent aux attentes de la profession.

Pour en savoir plus sur les offres de formation et les sessions à venir :

[formation@chauvin-arnoux.com](mailto:formation@chauvin-arnoux.com)

Tél. : 03 44 85 44 49

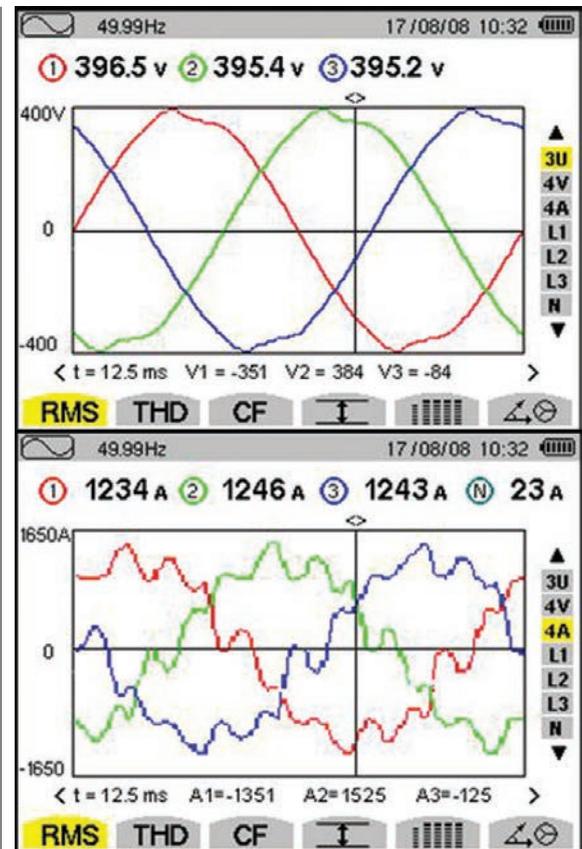
## Les formations du MEN

D'autre part, il existe un large éventail de formations sur le thème de la qualité de l'énergie électrique inscrites au plans de formation académiques (PAF) ou proposées par le Cerpep (Centre d'études et de recherches sur les partenariats avec les entreprises et les professions) en milieu professionnel. Ces stages et journées techniques, complémentaires à l'offre de Chauvin Arnoux, sont autant de moyens de se former à de nouvelles techniques au sein d'entreprises qui en ont une bonne expérience et une grande maîtrise.

<http://eduscol.education.fr/pid31532/stages-cerpep-de-formation-en-milieu-professionnel.html>

La charge alimentée en aval est relativement constante, le taux de distorsion harmonique en tension correct, inférieur à 5 %, et le taux d'harmonique en courant largement inférieur à 6 %.

Les relevés présentés en 2 ont été réalisés sur un départ de transformateur. La puissance réactive totale y est importante : 981 kvar ! La puissance déformante



6 Les relevés des tensions et courants triphasés sur un départ de transformateur avec condensateurs

reste raisonnable, et affiche une valeur de 54 kVad. Les amplitudes des harmoniques présents (les harmoniques 5 et 7) restent modérés, avec un taux de distorsion en tension de l'ordre de 4 %.

### Étape 2 : avec les condensateurs

Avec l'enclenchement des gradins de condensateurs, on constate l'amélioration du facteur de puissance sur le réseau 20 kV, qui passe de 0,75 à 0,96 3, mais également une augmentation importante des taux de distorsion harmonique en courant et en tension 4. Le taux de distorsion en tension est passé de 5 à 8 % (6 % étant le taux maximal admis sur un réseau HTA) ! Le taux en courant oscille lui entre 14 et 15 % 5.

La mise en service des condensateurs de compensation a cependant permis une diminution par 3 de la consommation d'énergie réactive (de 981,38 kvar à 330,68 kvar). Elle assure bien le rôle attendu, mais a sur le réseau électrique une répercussion préjudiciable en matière d'harmoniques. Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont en service, les composantes harmoniques affectent l'onde de tension, qui ne présente plus une sinusoïde quasi parfaite. On note sur les graphes 6 issus du Qualistar+ sa forte dégradation en raison de la présence d'harmoniques d'amplitudes élevées aux rangs 5, 7, 11 et 13.

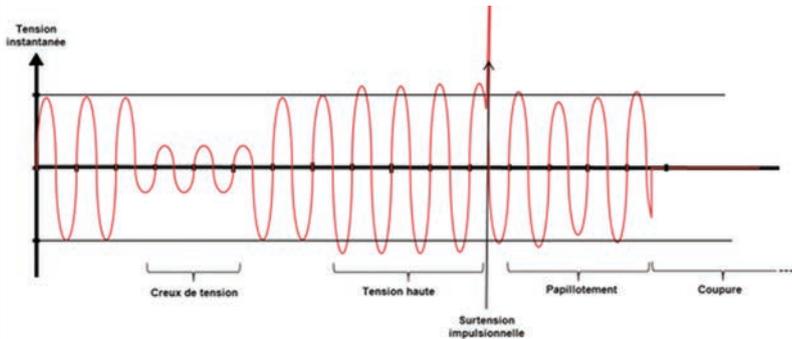
## Qu'est-ce que la qualité de l'électricité ?

La qualité de l'électricité recouvre les trois notions de continuité d'alimentation, de qualité de l'onde de tension, et de qualité de service :

- **La continuité d'alimentation** recouvre les coupures, ou interruptions, subies par les utilisateurs. Il existe un certain nombre de critères pour classer ces coupures, et il est notamment fait distinction entre coupures programmées et coupures non programmées, et entre coupures longues (supérieures à 3 minutes) et coupures brèves (entre 1 seconde et 3 minutes). Pour les coupures inférieures à une seconde, bien que les notions de coupure très brève ou de microcoupure soient parfois utilisées, on parle généralement de creux de tension (et cela relève alors plus de la qualité de l'onde de tension que de la continuité d'alimentation).
- **La qualité de l'onde de tension** recouvre les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Différents termes peuvent être utilisés en fonction des caractéristiques de la perturbation : creux de tension, surtensions impulsionnelles, tensions hautes ou basses, variations de fréquence, papillotement, taux d'harmoniques et d'interharmoniques, déséquilibre entre phases, etc.
- **La qualité de service** caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau, ainsi qu'éventuellement son fournisseur (délai de remise en service, délai d'intervention d'urgence, délai de raccordement, notification de coupure programmée, tenue des horaires de rendez-vous, etc.).

### La qualité de l'onde de tension en détail

Le réseau électrique français étant en courant alternatif, l'onde de tension délivrée par le système électrique prend la forme d'une sinusoïde de fréquence constante – 50 Hz en France – et d'amplitude constante – 230 V (en monophasé) ou 400 V (en triphasé) pour la valeur efficace en basse tension par exemple. Mais, dans les faits, l'onde de tension n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude de cette onde varient en permanence, et peuvent parfois s'écarter significativement de leurs valeurs de référence. Si les « imperfections » de l'onde de tension sont trop marquées **a**, le fonctionnement de certains appareils électriques raccordés au réseau – installations de production, appareils domestiques, machines industrielles, etc. – peut s'en trouver perturbé. Dans les cas les plus extrêmes, cela peut aller jusqu'à l'impossibilité de fonctionner pendant la durée de la perturbation, à des dommages matériels de long terme, voire, plus rarement, à des dégâts matériels instantanés.



### a L'onde de tension et ses imperfections

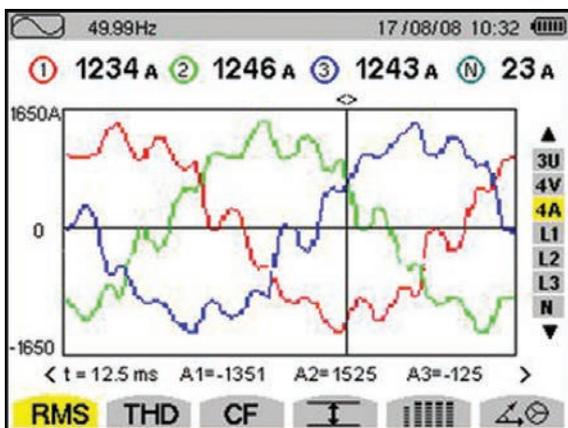
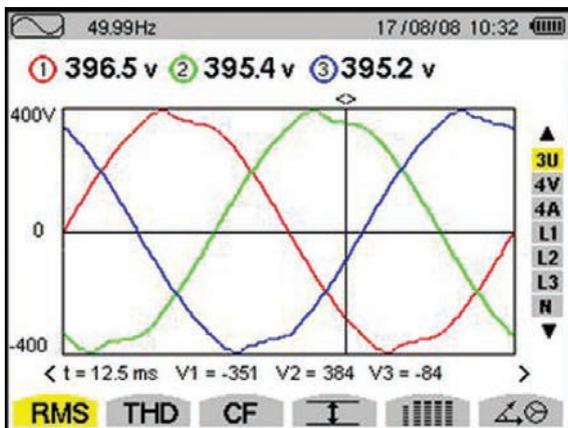
Le tableau **b** présente une classification possible des différents types de perturbations. Il est à noter qu'aucune classification ne fait actuellement référence, et d'autres notions peuvent être parfois utilisées : variations rapides de tension, surtensions temporaires, etc. Il faut noter, également, que l'impact à long terme de ces différents types de perturbations sur la durée de vie des appareils électriques reste aujourd'hui assez méconnu. Précisons enfin qu'en langage courant le terme *tension* fait le plus souvent référence à la valeur efficace de l'onde de tension (la valeur efficace d'une sinusoïde parfaite est égale à la valeur maximale de la sinusoïde divisée par  $\sqrt{2}$ ), ou à une moyenne de la valeur efficace sur une certaine durée (pour une onde imparfaitement périodique, la valeur efficace n'a de sens que localement, pour un intervalle de temps suffisamment court), et non à la valeur instantanée de la tension (qui oscille autour de 0 V avec une période de 20 ms).

Extrait du site de la CRE

[www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics-d-electricite/qualite-de-l-electricite#section2](http://www.cre.fr/reseaux/reseaux-publics-d-electricite/qualite-de-l-electricite#section2)

Perturbation	Définition	Conséquences possibles
Creux de tension	Effondrement bref de la valeur efficace de la tension, de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes	Microcoupures, altération du fonctionnement de certains appareils électriques
Surtension impulsionnelle	Pic bref ou très bref de la valeur efficace de la tension, ou de la valeur instantanée de la tension	Altération du fonctionnement de certains appareils électriques, dommages potentiels à long terme, dégâts matériels instantanés dans certains cas extrêmes
Papillotement	Fluctuations rapides et relativement faibles de la valeur efficace de la tension	Variations de l'intensité de l'éclairage, gêne visuelle, inconfort physiologique
Tension basse	Valeur efficace de la tension (moyennée sur plusieurs secondes à quelques minutes) durablement inférieure au(x) seuil(s) admis, typiquement 90 % de la tension nominale	Altération du fonctionnement de certains appareils électriques
Tension haute	Valeur efficace de la tension durablement supérieure au seuil admis, typiquement 110 % de la tension nominale	Altération du fonctionnement de certains appareils électriques, dommages potentiels à long terme
Fluctuation de la fréquence	Écart de la fréquence par rapport à sa valeur de référence, 50 Hz en France	Peu d'impact sur les installations tant que les variations de la fréquence restent limitées
Harmoniques et interharmoniques	Signaux parasites de fréquence multiple de 50 Hz (harmoniques) ou de fréquence quelconque (interharmoniques)	Altération du fonctionnement de certains appareils électriques, perturbation de signaux, notamment tarifaires
Déséquilibre	Différences entre les valeurs efficaces des trois phases	Altération du fonctionnement de certains appareils électriques triphasés

### b Classification possible des différents types de perturbations



**7** Les relevés des tensions et courants triphasés sur un départ de transformateur lors des réglages des gradins de condensateurs

### Étape 3 : l'analyse de l'impact de l'enclenchement des gradins de condensateurs

Lors des réglages des gradins de condensateurs, un phénomène de résonance est observé. Le taux de distorsion harmonique en courant augmente considérablement (42 %), et contribue à la déformation de l'onde de tension **7**. On note la présence prépondérante de l'harmonique de rang 11 **8**. La consommation d'énergie réactive est très importante, avec une valeur proche de 506 kvar ; le facteur de puissance en est affecté, puisqu'il descend à 0,88.

#### La synthèse

Le fonctionnement donné, pour une puissance active de 1 100 MW aux trois étapes du diagnostic, autorise les observations données en **9**.

#### Les prescriptions de l'expert

Si les batteries de condensateurs constituent un moyen efficace de lutte contre une consommation excessive d'énergie réactive, leur adaptation en fonction de la charge par la commutation de gradins est à l'origine des phénomènes de résonance constatés sur le réseau électrique. Une des solutions à ce problème consiste à

### Un analyseur de réseau électrique : le Qualistar+

La mesure est un enjeu majeur pour l'analyse et le diagnostic des réseaux au travers des données pouvant être enregistrées et collectées. Plusieurs fabricants d'appareils de mesure se partagent ce marché de l'analyse des réseaux. Les mesures de l'étude de cas présentée ici ont été effectuées à l'aide du Qualistar+ CA 8335.

Cet analyseur de réseaux électriques triphasés portable effectue la vérification des installations électriques en mesurant les caractéristiques du réseau : tension, courant, fréquence, taux de distorsion harmonique et puissances mises en jeu dans l'installation.

Le Qualistar+ dispose d'entrées en tension jusqu'à 1 000 V et d'entrées en courant pouvant accepter 6 500 A. Il dispose d'une capacité d'enregistrement pouvant aller jusqu'à un mois, autorisant le relevé des caractéristiques d'un réseau et l'observation de phénomènes aléatoires, non perceptibles lors de relevés de courte durée.

Le logiciel DataView associé à l'appareil de mesure permet de transférer les données enregistrées pour une analyse fine des phénomènes observés. Un rapport complet est ainsi établi sur les capacités du réseau et ses perturbations.

<http://qualistar.chauvin-arnoux.com/fr/video-qualistar-plus>

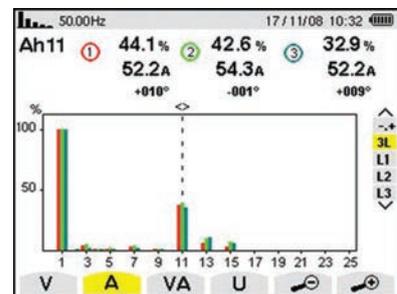
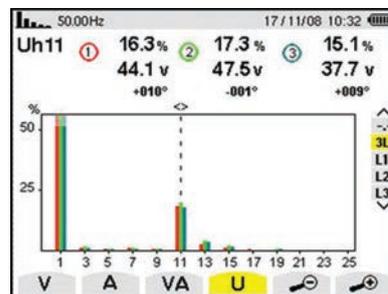
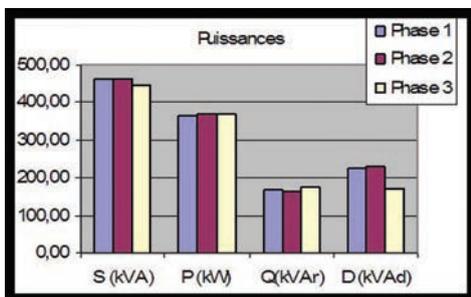


■ La gamme Qualistar+

placer sur le réseau inquieté un *compensateur actif d'harmoniques*. Le dimensionnement de ce dernier est fonction du nombre d'ampères déformants à composer pour chaque départ. Dans ce cas, l'énergie déformante due aux harmoniques de courant devra être compensée aux rangs les plus dommageables, ici les rangs 7 et 11.

Une autre solution consiste à *amortir le phénomène de résonance*. Il s'agit d'augmenter le facteur d'amortissement du circuit résonnant RLC en plaçant une résistance d'amortissement en série de faible valeur (quelques milliohms afin de limiter la chute de tension) sur chacune des lignes des câbles d'alimentation des batteries de condensateurs. L'effet attendu est l'amortissement du phénomène de résonance, et donc la réduction de l'impact des harmoniques sur la tension. Des essais devront être effectués pour ajuster les valeurs des résistances

Tensions Simples	Urms (V)	Irms (A)	S (kVA)	P (kW)	Q(kVAr)	D (kVAd)	DPF	PF	ThdU (%)	Thdl (%)	I 50Hz (A)
Phase 1	405,32	1138,03	461,27	366,59	166,32	225,21	0,88	0,79	16,36	41,69	1034,39
Phase 2	404,91	1145,47	463,82	368,12	163,70	229,81	0,88	0,79	17,30	42,07	1039,16
Phase 3	402,89	1106,14	445,65	370,77	176,70	172,94	0,88	0,83	13,15	32,99	1044,22
Neutral		16,12									
Total			1370,74	1105,48	506,73	627,97					



8 Les relevés sur un départ de transformateur avec condensateurs en cours de réglage

Étape	Puissance réactive Q (en kvar)	Puissance réactive D (en kVAd)	THD en tension (en %)	Facteur de puissance	Observations
Étape 1 Fonctionnement sans les condensateurs	981,30	54,05	4,3	0,75	Le facteur de puissance est non conforme (valeur inférieure à 0,95) La puissance réactive est élevée
Étape 2 Fonctionnement avec les condensateurs	330,68	232,47	6,60	0,95	La valeur du facteur de puissance est améliorée et correspond à une valeur conforme La puissance réactive est divisée par 3 !
Étape 3 Fonctionnement avec les condensateurs en cours de réglage	506,73	627,97	17	0,88	La puissance réactive en augmentation affecte la valeur du facteur de puissance L'important taux de distorsion harmonique en tension traduit la dégradation de l'onde de tension. Les équipements sensibles peuvent être perturbés

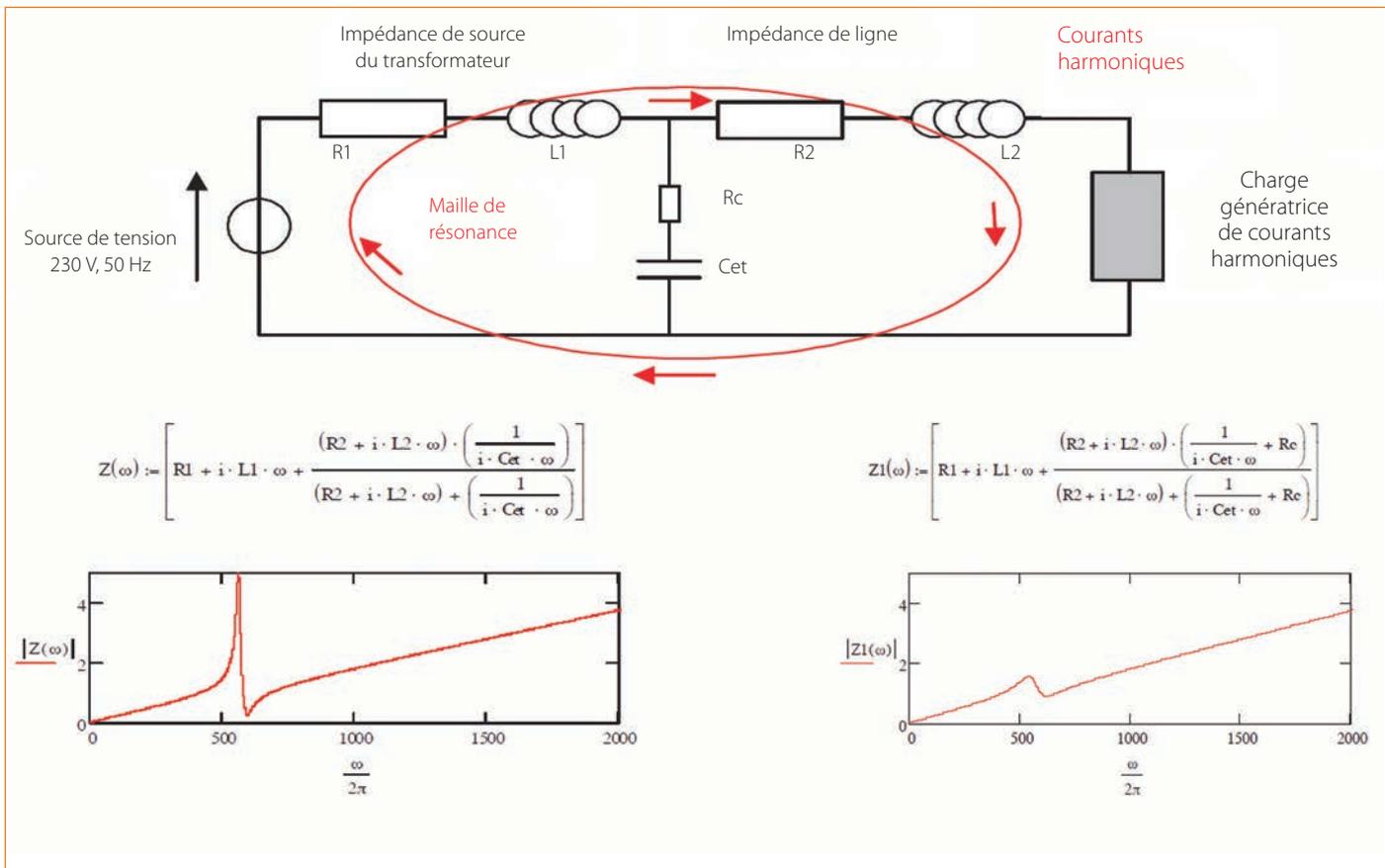
9 La synthèse des observations effectuées dans les 3 étapes du diagnostic

à installer et optimiser cette solution technique. La figure 10 en donne le schéma ; la résistance Rc amortit les courants harmoniques au droit des condensateurs, limitant ainsi le phénomène de résonance.

**Inscrivez-vous !**

Nous venons de la voir, l'offre de formations de Chauvin Arnoux répond aux problématiques actuelles rencontrées au sein des réseaux électriques. Outre l'aspect veille technologique, s'inscrire à de telles formations permet également au professeur de génie électrique

de se rapprocher du monde industriel et des professionnels des réseaux – techniciens et ingénieurs de services techniques, bureaux d'études de constructeurs automobiles et de spécialistes en énergie... –, qui y participent régulièrement. Cela autorise de nombreux échanges techniques venant enrichir les savoir-faire. De plus, ces formations courtes peuvent fournir des pistes de scénarios pédagogiques au plus proche des réalités techniques vécues en entreprise. C'est pourquoi nous ne pouvons que vous inviter à vous y inscrire. ■



10 La solution d'amortissement du phénomène de résonance