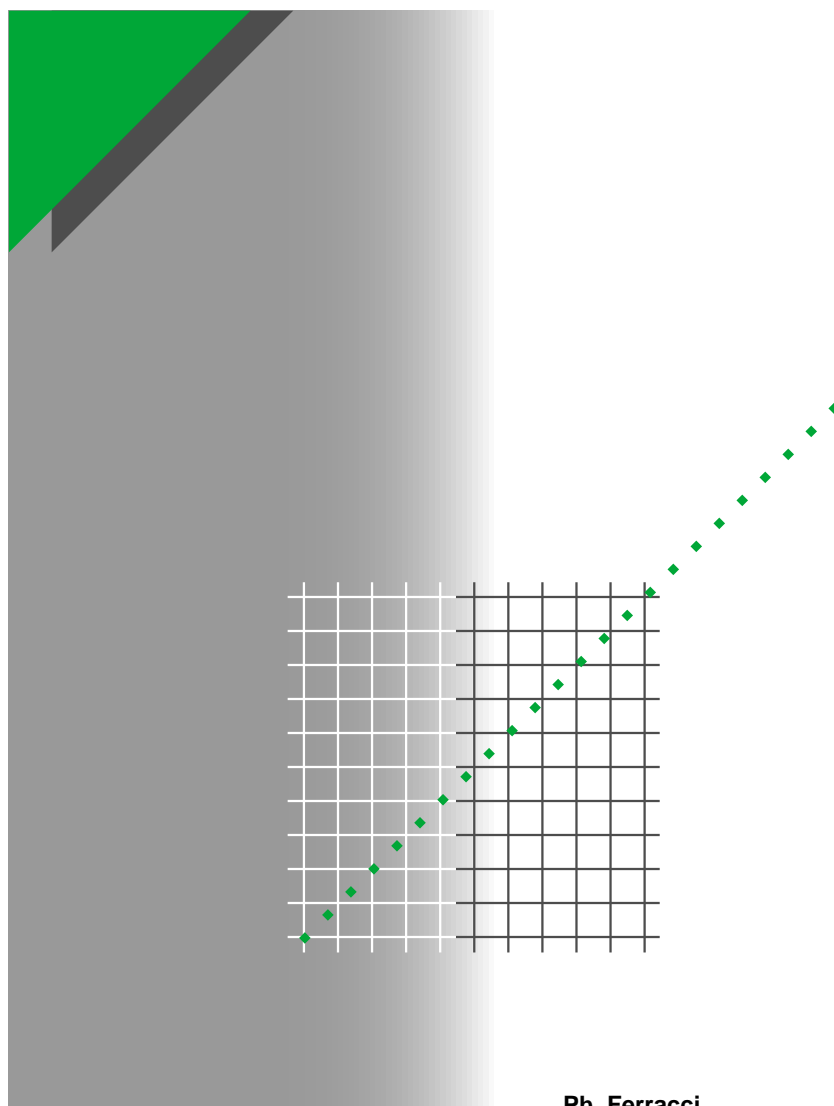


Cahier technique n° 199

Partie 1/2

La qualité de l'énergie électrique



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

Ph. Ferracci

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

n° 199

La qualité de l'énergie électrique



Philippe FERRACCI

Diplômé de l'École Supérieure d'Électricité en 1991, a soutenu une thèse sur le régime du neutre compensé, en collaboration avec la Direction des Études et Recherches d'EDF. En 1996, il a rejoint Schneider Electric où il mène des études avancées dans les domaines de l'électrotechnique et des réseaux électriques.

La qualité de l'énergie électrique

L'une des propriétés particulières de l'électricité est que certaines de ses caractéristiques dépendent à la fois du producteur / distributeur d'électricité, des fabricants d'équipements et du client. Le nombre important de protagonistes et l'utilisation d'une terminologie et de définitions parfois approximatives expliquent en partie la complexité du sujet.

Ce Cahier Technique a pour objectif de faciliter les échanges sur ce sujet entre spécialistes et non-spécialistes, et entre client, constructeur, installateur, concepteur et distributeur. Sa terminologie claire doit permettre d'éviter les confusions. Il décrit les phénomènes principaux qui dégradent la Qualité de l'Energie Electrique (QEE), leurs origines, les conséquences sur les équipements et les solutions principales. Il propose une méthodologie de mesure de la QEE selon les différents objectifs. Illustré par des exemples pratiques de mise en œuvre de solutions, il démontre que seul le respect des règles de l'art et la mise en œuvre d'une méthodologie rigoureuse (diagnostics, études, solutions, mise en œuvre, maintenance préventive) permettent une qualité d'alimentation personnalisée et adaptée au besoin de l'utilisateur.

Sommaire

1 Introduction	1.1 Contexte	p. 4
	1.2 Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie	p. 5
2 Dégradation de la QEE : origines - caractéristiques - définitions	2.1 Généralités	p. 6
	2.2 Creux de tension et coupures	p. 6
	2.3 Harmoniques et interharmoniques	p. 8
	2.4 Surtensions	p. 10
	2.5 Variations et fluctuations de tension	p. 10
	2.6 Déséquilibres	p. 11
	2.7 Résumé	p. 11
3 Effets des perturbations sur les charges et procédés	3.1 Creux de tension et coupures	p. 12
	3.2 Harmoniques	p. 13
	3.3 Surtensions	p. 15
	3.4 Variations et fluctuations de tension	p. 15
	3.5 Déséquilibres	p. 15
	3.6 Résumé	p. 15
4 Niveau de qualité de l'énergie	4.1 Méthodologie d'évaluation	p. 16
	4.2 La CEM et les niveaux de planification	p. 18
5 Solutions pour améliorer la QEE	5.1 Creux de tension et coupures	p. 19
	5.2 Harmoniques	p. 23
	5.3 Surtensions	p. 25
	5.4 Fluctuations de tension	p. 26
	5.5 Déséquilibres	p. 26
	5.6 Résumé	p. 26
6 Etudes de cas	6.1 Filtrage hybride	p. 27
	6.2 Compensation automatique en temps réel	p. 28
	6.3 Protection contre la foudre	p. 30
7 Conclusion		p. 31
Bibliographie		p. 32

1 Introduction

1.1 Contexte

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements, essentiellement pour les raisons suivantes :

- la nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises,
- la généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux-mêmes générateurs de perturbations,
- l'ouverture du marché de l'électricité.

La nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises

- La réduction des coûts liés à la perte de continuité de service et à la non-qualité

Le coût des perturbations (coupures, creux de tension, harmoniques, surtensions atmosphériques...) est élevé.

Ces coûts doivent prendre en compte le manque à produire, les pertes de matières premières, la remise en état de l'outil de production, la non-qualité de la production, les retards de livraison. Le dysfonctionnement ou l'arrêt de récepteurs prioritaires tels que les ordinateurs, l'éclairages et systèmes de sécurité peuvent mettre en cause la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, locaux recevant du public, immeubles de grande hauteur...).

Ceci passe aussi par la détection par anticipation des problèmes par une maintenance préventive, ciblée et optimisée. On constate de plus un transfert de responsabilité de l'industriel utilisateur vers le constructeur d'appareillage pour assurer la maintenance des sites ; le constructeur devient fournisseur du produit électricité.

- La réduction des coûts liés au surdimensionnement des installations et aux factures énergétiques

D'autres conséquences plus insidieuses de la dégradation de la QEE sont :

- la réduction du rendement énergétique de l'installation, ce qui alourdit la facture énergétique,
- la surcharge de l'installation, d'où son vieillissement prématuré avec le risque accru de panne qui conduit à un surdimensionnement des équipements de distribution.

Et donc, les utilisateurs professionnels de l'électricité expriment le besoin d'optimiser le fonctionnement de leurs installations électriques.

La généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et / ou eux-mêmes générateurs de perturbations

Du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées...) on constate le développement et la généralisation des automatismes, des variateurs de vitesse dans l'industrie, des systèmes informatiques, des éclairages fluo-compact dans le tertiaire et le domestique. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de la tension et générateurs de perturbations.

Leur multiplicité au sein d'un même procédé exige une alimentation électrique de plus en plus performante en termes de continuité et de qualité. En effet, l'arrêt temporaire d'un élément de la chaîne peut provoquer l'arrêt de l'outil de production (fabrication de semi-conducteurs, cimenterie, traitement de l'eau, manutention, imprimerie, sidérurgie, pétrochimie...) ou de services (centres de calcul, banques, télécommunications...).

En conséquence, les travaux de la CEI sur la compatibilité électromagnétique (CEM) conduisent à des normes et recommandations de plus en plus contraignantes (limitations des niveaux d'émission des perturbations...).

L'ouverture du marché de l'électricité

Les règles du jeu du secteur électrique ont ou vont évoluer en profondeur : ouverture à la concurrence de la production d'électricité, production décentralisée, possibilité pour les (gros) consommateurs d'électricité de choisir leur fournisseur.

Ainsi en 1985, la commission européenne a établi que l'électricité était un produit (directive 85/374) : ce qui rend nécessaire de bien en définir les caractéristiques essentielles.

Par ailleurs dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie, la recherche de la compétitivité par les compagnies d'électricité fait que la qualité est un facteur différenciateur. Sa garantie peut être, pour un industriel, un critère de choix d'un fournisseur d'énergie.

1.2 Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie

Selon les applications, les paramètres à mesurer et la précision de la mesure ne sont pas les mêmes.

Application contractuelle

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'électricité et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché dérégulé. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties. Il s'agit alors de définir les paramètres de mesure de la qualité et de comparer leurs valeurs à des limites prédéfinies voire contractuelles. Cette application implique souvent le traitement d'un nombre important de données.

Maintenance corrective

Malgré le respect des règles de l'art (conception de schéma, choix des protections, du régime de neutre et mise en place de solutions adaptées) dès la phase de conception, des dysfonctionnements peuvent apparaître en cours d'exploitation :

- les perturbations peuvent avoir été négligées ou sous-estimées,
- l'installation a évolué (nouvelles charges et / ou modification).

C'est généralement suite à ces problèmes qu'une action de dépannage est engagée. L'objectif est souvent d'obtenir des résultats aussi rapidement que possible, ce qui peut conduire à des conclusions hâtives ou infondées.

Des systèmes de mesure portatifs (sur des temps limités) ou des appareils fixes (surveillance permanente) facilitent le diagnostic des installations (détection et archivage des perturbations et déclenchement d'alarmes).

Optimisation du fonctionnement des installations électriques

Pour réaliser des gains de productivité (économies de fonctionnement et / ou réduction des coûts d'exploitation) il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie, deux facteurs qui dépendent de la QEE. Disposer d'une QEE adaptée aux besoins est un objectif des personnels d'exploitation, de maintenance et de gestion de sites tertiaires ou industriels. Des outils logiciels complémentaires assurant le contrôle-commande et la surveillance permanente de l'installation sont alors nécessaires.

Enquêtes statistiques

Cette étude nécessite une approche statistique sur la base de nombreux résultats obtenus par des enquêtes généralement réalisées par les exploitants de réseaux de transport et de distribution.

- Enquêtes sur les performances générales d'un réseau

Elles permettent, par exemple, de :

- Planifier et cibler les interventions préventives grâce à une cartographie des niveaux de perturbations sur un réseau. Ceci permet de réduire les coûts d'exploitation ainsi qu'une meilleure maîtrise des perturbations. Une situation anormale par rapport à un niveau moyen peut être détectée et être corrélée avec le raccordement de nouvelles charges. Les tendances saisonnières ou des dérives peuvent aussi être étudiées.
- Comparer la QEE fournie par différents distributeurs en différents lieux géographiques. Des clients potentiels peuvent en effet demander des caractéristiques de fiabilité pour la fourniture de l'électricité avant d'installer de nouvelles usines.

- Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau

Elles permettent de :

- Déterminer l'environnement électromagnétique auquel une installation future ou un nouvel équipement sera soumis. Des actions d'amélioration du réseau de distribution et/ou de désensibilisation du réseau du client peuvent alors être engagées de façon préventive.
- Spécifier et vérifier les performances auxquelles le fournisseur d'électricité s'engage de façon contractuelle. Ces informations sur la qualité de l'électricité sont particulièrement stratégiques pour les compagnies d'électricité qui dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie recherchent la meilleure compétitivité, la satisfaction des besoins et la fidélisation de leurs clients.

2 Dégradation de la QEE : origines - caractéristiques - définitions

2.1 Généralités

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées :

- basse fréquence (< 9 kHz),
- haute fréquence (\geq 9 kHz),
- de décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) :

- creux de tension et coupures (*voltage dips and interruptions*),
- harmoniques (*harmonics*), interharmoniques (*interharmonics*),
- surtensions temporaires (*temporary overvoltages*),
- surtensions (*swell*),

- surtensions transitoires (*transient overvoltages*),
- fluctuations de tension (*voltage fluctuations*),
- déséquilibres de tension (*voltage unbalance*),
- variations de la fréquence d'alimentation (*power-frequency variations*),
- tension continue dans les réseaux alternatifs (*d.c. in a.c. networks*),
- tensions de signalisation (*signalling voltages*).

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations.

Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension. Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent.

2.2 Creux de tension et coupures

Définitions

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise (par convention) entre 90 % et 1% (CEI 61000-2-1, CENELEC EN 50160), ou entre 90 % et 10 % (IEEE 1159) d'une tension de référence (U_{ref}) suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (10 ms à 50 Hz) et une minute (cf. **fig. 1a**).

La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée pour les réseaux MT et HT. Une tension de référence glissante, égale à la tension avant perturbation, peut aussi être utilisée sur les réseaux MT et HT équipés de système de réglage (régleur en charge) de la tension en fonction de la charge. Ceci permet d'étudier (à l'aide de mesures simultanées dans chaque réseau) le transfert des creux entre les différents niveaux de tension.

La méthode habituellement utilisée pour détecter et caractériser un creux de tension est le calcul de

la valeur efficace « rms (1/2) » du signal sur une période du fondamental toutes les demi-périodes (recouvrement d'une demi-période) (cf. **fig. 1b**). Les paramètres caractéristiques (cf. **fig. 1b**) d'un creux de tension sont donc :

- sa profondeur : ΔU (ou son amplitude U),
- sa durée ΔT , définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90 %. On parle de creux de tension à x % si la valeur rms(1/2) passe en dessous de x % de la valeur de référence U_{ref} .

Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur, supérieures à 90 % (IEEE) ou 99 % (CEI-CENELEC). Elles sont caractérisées par un seul paramètre : la durée. Les coupures brèves sont de durée inférieure à 3 minutes (CENELEC), ou une minute (CEI-IEEE), elles sont notamment occasionnées par les réenclenchements automatiques lents destinés à éviter les coupures longues (réglés entre 1 et 3 minutes) ; les coupures longues sont de durée supérieure. Les coupures brèves et les coupures longues sont différentes tant du point de vue de l'origine que des solutions à mettre en

œuvre pour s'en préserver ou pour en réduire le nombre.

Les perturbations de tension de durée inférieure à la demi-période fondamentale T du réseau ($\Delta T < T/2$) sont considérées comme étant des transitoires.

Les Américains utilisent différents adjectifs pour qualifier les creux de tension (*sag* ou *dip*) et les coupures (*interruption*) selon leur durée :

- instantané (*instantaneous*) ($T/2 < \Delta T < 30 T$),
- momentané (*momentary*) ($30 T < \Delta T < 3 s$),
- temporaire (*temporary*) ($3 s < \Delta T < 1 \text{ min}$),
- maintenue (*sustained interruption*) et sous-tension (*undervoltage*) ($\Delta T > 1 \text{ min}$).

En fonction du contexte, les tensions mesurées peuvent être entre conducteurs actifs (entre phases ou entre phase et neutre), entre conducteurs actifs et terre (Ph/terre ou neutre/terre), ou encore entre conducteurs actifs et conducteur de protection.

Dans le cas d'un système triphasé, les caractéristiques ΔU et ΔT sont en général différentes sur les trois phases. C'est la raison pour laquelle un creux de tension doit être détecté et caractérisé séparément sur chacune des phases.

Un système triphasé est considéré comme subissant un creux de tension si au moins une phase est affectée par cette perturbation.

Origine

■ Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

□ des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même.

L'apparition des défauts provoque des creux de tension pour tous les utilisateurs. La durée d'un creux est en général conditionnée par les temporisations de fonctionnement des organes de protection. L'isolement des défauts par les dispositifs de protections (disjoncteurs, fusibles) provoquent des coupures (brèves ou longues) pour les utilisateurs alimentés par la section en défaut du réseau. Bien que la source d'alimentation ait disparu, la tension du réseau peut être entretenue par la tension résiduelle restituée par les moteurs asynchrones ou synchrones en cours de ralentissement (pendant

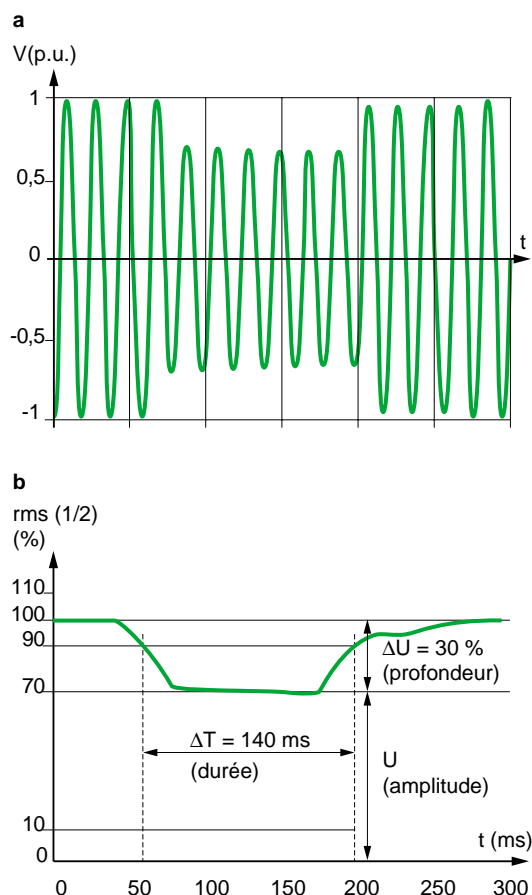


Fig. 1 : paramètres caractéristiques d'un creux de tension ; [a] forme d'onde, [b] rms (1/2).

0,3 à 1 s) ou la tension due à la décharge des condensateurs branchés sur le réseau.

Les coupures brèves sont souvent le résultat du fonctionnement des automatismes de réseau tels que les réenclencheurs rapides et/ou lents, les permutations de transformateurs ou de lignes. Les utilisateurs subissent une succession de creux de tension et/ou de coupures brèves lors de défauts à arc intermittents, de cycles de déclenchement - réenclenchement automatiques (sur réseau aérien ou mixte radial) permettant l'élimination des défauts fugitifs ou encore en cas de renvois de tension permettant la localisation du défaut.

□ la commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit.

- Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil. Les creux de tension ou coupures se propagent vers les niveaux de tension inférieurs à travers les transformateurs. Le nombre de phases affectées ainsi que la sévérité de ces creux de tension dépend du type de défaut et du couplage du transformateur. Le nombre de creux de tension et de coupures est plus élevé dans les réseaux aériens soumis

aux intempéries que dans les réseaux souterrains. Mais un départ souterrain issu du même jeu de barres que des départs aériens ou mixtes subira aussi des creux de tension dus aux défauts affectant les lignes aériennes.

- Les transitoires ($\Delta T < T/2$) sont causées, par exemple, par la mise sous tension de condensateurs ou l'isolement d'un défaut par un fusible ou par un disjoncteur rapide BT, ou encore par les encoches de commutations de convertisseurs polyphasés.

2.3 Harmoniques et interharmoniques

Rappels :

Toute fonction périodique (de fréquence f) peut se décomposer en une somme de sinusoïdes de fréquence $h \times f$ (h : entier). h est appelé rang harmonique ($h > 1$). La composante de rang 1 est la composante fondamentale.

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(2 \pi h f t + \varphi_h)$$

La valeur efficace est :

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_h^2 + \dots}$$

Le taux de distorsion harmonique (THD pour Total Harmonic Distortion) donne une mesure de la déformation du signal :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{Y_h}{Y_1} \right)^2}$$

Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente (cf. **fig. 2**). Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau créent des tensions harmoniques qui peuvent

perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source. L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donc un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion en tension. A remarquer que si l'impédance de la source est faible (P_{cc} élevée) la distorsion en tension est faible.

Les principales sources d'harmoniques

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques.

- Les charges industrielles
 - équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage ;
 - charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).
- A noter que du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement énergétique, performances élevées...) l'utilisation d'équipements à base d'électronique de puissance se généralise.

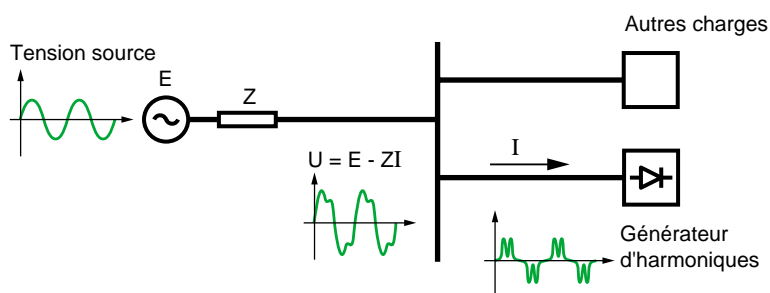


Fig. 2 : dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire.

■ Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage : téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes. De puissance unitaire bien plus faible que les charges industrielles, leur effet cumulé du fait de leur grand nombre et de leur utilisation simultanée sur de longues périodes en font des sources de distorsion harmonique importantes. À noter que l'utilisation de ce type d'appareils croît en nombre et parfois en puissance unitaire.

Les niveaux d'harmoniques

Ils varient généralement selon le mode de fonctionnement de l'appareil, l'heure de la journée et la saison (climatisation). Les sources génèrent, pour la plupart, des harmoniques de rangs impairs (cf. **fig. 3**). La mise sous tension de transformateurs ou les charges polarisées (redresseurs

monoalternance) ainsi que les fours à arc génèrent aussi (en plus des rangs impairs) des harmoniques de rangs pairs.

Les interharmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental (donc situées entre les harmoniques). Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que fours à arc, machines à souder et convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cycloconvertisseurs). Les fréquences de télécommande utilisées par le distributeur sont aussi des interharmoniques.

Le spectre peut être discret ou continu et variable de façon aléatoire (four à arc) ou intermittente (machines à souder).

Pour étudier les effets à court, moyen ou long terme, les mesures des différents paramètres doivent se faire à des intervalles de temps compatibles avec la constante de temps thermique des équipements.

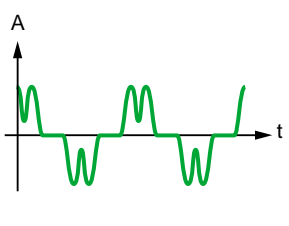
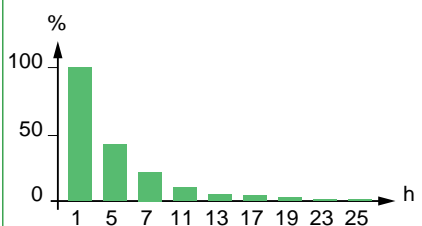
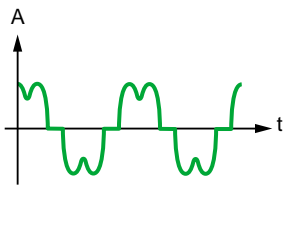
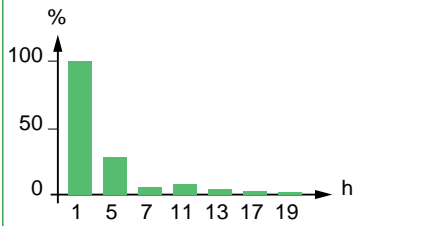
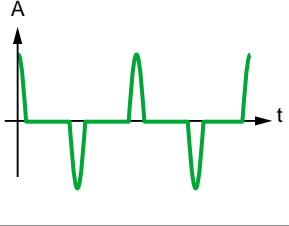
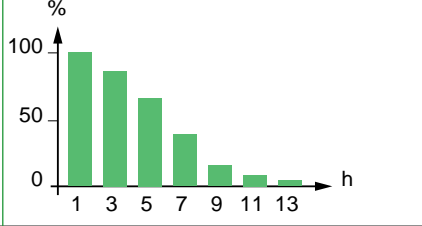
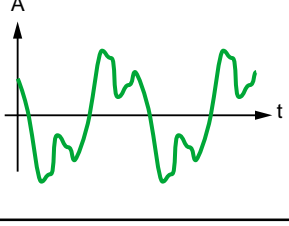
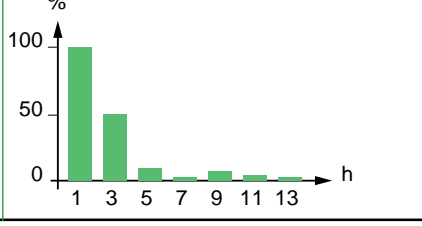
Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

Fig. 3 : caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

2.4 Surtensions

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension (cf. Cahiers Techniques n°141, 151 et 179).

Les surtensions sont de trois natures :

- temporaires à fréquence industrielle,
- de manœuvre,
- d'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître :

- en mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre),
- en mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

Les surtensions à fréquence industrielle

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles ont plusieurs origines :

- Un défaut d'isolement

Lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à neutre impédant ou isolé, la tension des phases saines par rapport à la terre peut atteindre la tension composée. Des surtensions sur les installations BT peuvent provenir des installations HT par l'intermédiaire de la prise de terre du poste HT/BT.

- La ferrorésonance

Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable. Des dysfonctionnements ou des destructions de matériel mal élucidés lui sont volontiers attribués (cf. Cahier Technique n°190).

- La rupture du conducteur de neutre

Les appareils alimentés par la phase la moins

chargée voient leur tension augmenter (parfois jusqu'à la tension composée).

- Les défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge de transformateur

- La surcompensation de l'énergie réactive

Les condensateurs shunt produisent une augmentation de la tension depuis la source jusqu'au point où ils se trouvent.

Cette tension est particulièrement élevée en période de faibles charges.

Les surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...). On distingue :

- les surtensions de commutation en charge normale,
- les surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs,
- les surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs).

Par exemple la manœuvre d'une batterie de condensateurs provoque une surtension transitoire dont la première crête peut atteindre $2\sqrt{2}$ fois la valeur efficace de la tension du réseau et une surintensité transitoire de valeur crête pouvant atteindre 100 fois le courant assigné du condensateur (cf. Cahier Technique n°189).

Les surtensions atmosphériques

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre) (cf. Cahiers Techniques n°151 et 179).

2.5 Variations et fluctuations de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale.

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude.

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau.

- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

2.6 Déséquilibres

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ ou ne sont pas déphasées les unes par rapport aux autres de 120°. Le degré de déséquilibre est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport de la composante inverse (U_{1i}) (ou homopolaire (U_{1o})) du fondamental à celui de la composante directe (U_{1d}) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \text{ et } \Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|}$$

La formule approchée suivante peut aussi être utilisée : $\Delta U_i = \max_i \frac{V_i - V_{moy}}{V_{moy}}$,

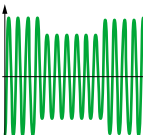
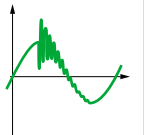
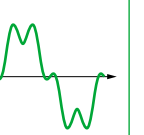
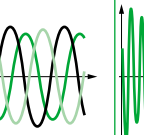
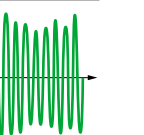
avec V_i = tension de la phase i et

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

La tension inverse (ou homopolaire) est provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses (ou homopolaire) produits par les charges déséquilibrées qui conduisent à des courants non identiques sur les trois phases (charges BT connectées entre phase et neutre, charges monophasées ou biphasées MT telles que machines à souder et fours à induction).

Les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections.

2.7 Résumé

Perturbations	Creux de tension	Surtensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tension
Formes d'onde caractéristiques					
Origine de la perturbation					
■ Réseau					
<input type="checkbox"/> Défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre...					
<input type="checkbox"/> Manœuvres et ferrorésonance					
<input type="checkbox"/> Moteur synchrone					
■ Equipements					
<input type="checkbox"/> Moteur asynchrone					
<input type="checkbox"/> Moteur synchrone					
<input type="checkbox"/> Machine à souder					
<input type="checkbox"/> Four à arc					
<input type="checkbox"/> Convertisseur					
<input type="checkbox"/> Charges informatiques					
<input type="checkbox"/> Eclairage					
<input type="checkbox"/> Onduleur					
<input type="checkbox"/> Batterie de condensateurs					
■ : Phénomène occasionnel		■ : Phénomène fréquent			

3 Effets des perturbations sur les charges et procédés

D'une façon générale, quelle que soit la perturbation, les effets peuvent être classés de deux façons différentes :

■ Effets instantanés : manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, mauvais fonctionnement ou arrêt d'une machine. L'impact financier de la perturbation est alors directement chiffrable.

■ Effets différés : pertes énergétiques, vieillissement accéléré du matériel dû aux échauffements et aux efforts électrodynamiques supplémentaires engendrés par les perturbations.

L'impact financier (par ex. sur la productivité) est plus difficilement quantifiable.

3.1 Creux de tension et coupures

Les creux de tension et les coupures perturbent de nombreux appareils raccordés au réseau. Ils sont la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie. Un creux de tension ou une coupure de quelques centaines de millisecondes peut se traduire par des conséquences néfastes plusieurs heures durant.

Les applications les plus sensibles sont les :

■ chaînes complètes de fabrication en continu dont le procédé ne tolère aucun arrêt temporaire d'un élément de la chaîne (imprimerie, sidérurgie, papeterie, pétrochimie...),

■ éclairages et systèmes de sécurité (hôpitaux, balisage des aéroports, locaux recevant du public, immeubles de grande hauteur...),

■ équipements informatiques (centres de traitement de données, banques, télécommunications...),

■ auxiliaires essentiels de centrales.

Les paragraphes suivants passent en revue les principales conséquences des creux de tension et coupures sur les principaux équipements utilisés dans les secteurs industriels, tertiaires et domestiques.

Moteur asynchrone

Lors d'un creux de tension, le couple d'un moteur asynchrone (proportionnel au carré de la tension) diminue brutalement et provoque un ralentissement. Ce ralentissement est fonction de l'amplitude et de la durée du creux, de l'inertie des masses tournantes et de la caractéristique couple-vitesse de la charge entraînée. Si le couple que le moteur développe devient inférieur au couple résistant, le moteur s'arrête (décroche). Après une coupure, le retour de la tension engendre un appel de courant de réaccélération proche du courant de démarrage et dont la durée dépend de la durée de la coupure. Lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs réaccélérations simultanées

peuvent provoquer une chute de tension dans les impédances amont du réseau qui allonge la durée du creux et peut rendre la réaccélération difficile (redémarrages longs avec suréchauffement) voire impossible (couple moteur inférieur au couple résistant).

La réalimentation rapide (~ 150 ms) d'un moteur asynchrone en cours de ralentissement sans précaution peut conduire à un réenclenchement en opposition de phase entre la source et la tension résiduelle entretenue par les moteurs asynchrones. Dans ce cas la première crête de courant peut atteindre trois fois le courant de démarrage (15 à 20 In) (cf. Cahier Technique n° 161).

Ces surintensités et les chutes de tension qui en découlent ont des conséquences pour le moteur (échauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation et des à-coups sur le couple avec des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements et les réducteurs d'où une usure prématurée voire une rupture) mais aussi sur les autres équipements tels que les contacteurs (usure voire soudure des contacts). Les surintensités peuvent conduire au déclenchement des protections générales de l'installation provoquant ainsi l'arrêt du procédé.

Moteur synchrone

Les effets sont à peu près identiques au cas des moteurs asynchrones.

Les moteurs synchrones peuvent cependant supporter des creux de tension plus importants (de l'ordre de 50 %) sans décrocher, du fait de leur inertie généralement plus importante, des possibilités de surexcitation et de la proportionnalité de leur couple avec la tension. En cas de décrochage, le moteur s'arrête, et il faut reprendre tout le processus de démarrage qui est assez complexe.

Actionneurs

Les organes de commande (contacteurs, disjoncteurs équipés de bobine à manque de tension) alimentés directement par le réseau sont sensibles aux creux de tension dont la profondeur dépasse 25 % de U_n . En effet, pour un contacteur classique, il existe une valeur de tension minimale à respecter (dite tension de retombée) en deçà de laquelle les pôles se séparent et transforment alors un creux de tension (de quelques dizaines de millisecondes) ou une coupure brève en une coupure longue (de plusieurs heures).

Équipements de type informatique

Les équipements informatiques (ordinateurs, appareils de mesure) occupent aujourd'hui une place prépondérante dans la surveillance et le contrôle-commande des installations, la gestion, la production. Ces équipements sont tous sensibles aux creux de tension dont la profondeur est supérieure à 10 % de U_n .

La courbe ITI (Information Technology Industry Council) – anciennement CBEMA – indique, dans un plan durée-amplitude, la tolérance typique des équipements informatiques aux creux de tension, coupures et surtensions (cf. **fig. 4**).

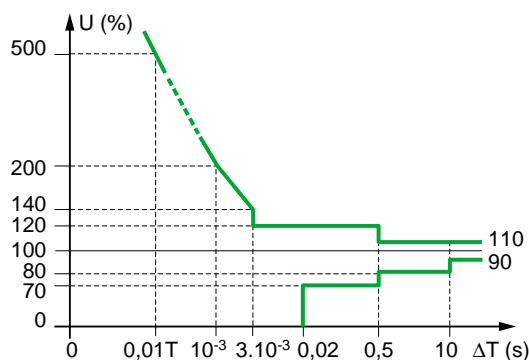


Fig. 4 : tolérance typique définie par la courbe ITI.

Le fonctionnement en dehors de ces limites conduit à des pertes de données, commandes erronées, arrêt ou panne des appareils. Les conséquences de la perte de fonction des équipements dépendent en particulier des conditions de redémarrage lorsque la tension est rétablie. Certains équipements possèdent par exemple leur propre dispositif de détection des creux de tension qui permet de sauvegarder les données et d'assurer une sécurité en interrompant le processus de calcul et les commandes erronées.

Machines à vitesse variable

Les problèmes posés par les creux de tension appliqués aux variateurs de vitesse sont :

- impossibilité de fournir la tension suffisante au moteur (perte de couple, ralentissement),
- impossibilité de fonctionnement des circuits de contrôle alimentés directement par le réseau,
- surintensité au retour de la tension (recharge du condensateur de filtrage des variateurs),
- surintensité et déséquilibre de courant en cas de creux de tension sur une seule phase,
- perte de contrôle des variateurs à courant continu en fonctionnement onduleur (freinage par récupération d'énergie).

Les variateurs de vitesse se mettent généralement en défaut pour une chute de tension supérieure à 15 %.

Eclairage

Les creux de tension provoquent un vieillissement prématuré des lampes à incandescence et des tubes fluorescents.

Les creux de tension de profondeur supérieure ou égale à 50 % et dont la durée est de l'ordre de 50 ms provoquent l'extinction des lampes à décharge. Une durée d'extinction de quelques minutes est alors nécessaire au refroidissement de l'ampoule avant réallumage.

3.2 Harmoniques

Leurs conséquences sont liées à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire) et au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants.

Leurs effets ont toujours un impact économique du fait du surcoût lié à :

- une dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie),
- un surdimensionnement des équipements,
- une perte de productivité (vieillesse accélérée des équipements, déclenchements intempestifs).

Au-delà d'un taux de distorsion harmonique de tension de 8 % les dysfonctionnements sont probables. Entre 5 et 8 %, les dysfonctionnements sont possibles.

- Effets instantanés ou à court terme
- Déclenchements intempestifs des protections : les harmoniques ont une influence gênante principalement sur les dispositifs de contrôle des effets thermiques. En effet, lorsque de tels appareils, voire des protections, déduisent la valeur efficace du courant à partir de la valeur crête il y a un risque d'erreur et de déclenchement intempestif même en fonctionnement normal, sans surcharge.

□ Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, chaîne hifi, écran d'ordinateur, téléviseur).

□ Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs).

□ Destruction par surcharge thermique de condensateurs.

Si la fréquence propre de l'ensemble condensateur-réseau amont est proche d'un rang harmonique, il y a résonance et amplification de l'harmonique correspondant.

□ Perte de précision des appareils de mesure
Un compteur d'énergie à induction classe 2 donne une erreur supplémentaire de 0,3 % en présence d'un taux de 5 % d'harmonique 5 en courant et en tension.

■ Effets à long terme

Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements :

□ échauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer),

□ fatigue mécanique (couples pulsatoires dans les machines asynchrones),

□ échauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes joule et diélectriques. Les condensateurs sont particulièrement sensibles aux harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang des harmoniques.

□ destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...).

Une surcharge et un échauffement supplémentaire du conducteur de neutre peuvent être la conséquence de la présence de courants d'harmoniques 3 et multiples de 3 présents dans les conducteurs de phases qui s'ajoutent dans le neutre.

En régime de neutre TNC le conducteur de neutre est confondu avec le conducteur de protection. Or celui-ci interconnecte toutes les masses de l'installation y compris les structures métalliques du bâtiment. Les courants harmoniques 3 et multiples de 3 vont donc circuler dans ces circuits et provoquer des variations de potentiel dont les conséquences sont :

□ corrosion de pièces métalliques,

□ surintensité dans les liaisons de télécommunication reliant les masses de deux récepteurs (par exemple, imprimante et micro-ordinateur),

□ rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire).

Le tableau de la **figure 5** résume les principaux effets des harmoniques ainsi que les niveaux admissibles habituels.

Les interharmoniques ont pour effets de perturber les récepteurs de télécommande et de provoquer un phénomène de papillotement (flicker) (cf. Cahier Technique n°176).

Matériels	Effets	Limites
Condensateurs de puissance	Echauffement, vieillissement prématuré (claquage), résonance.	$I < 1,3 I_n$ (THD $I < 83 \%$), ou $U < 1,1 U_n$ pour 12 h / j en HTA ou 8 h / j en BT
Moteurs	Pertes et échauffements supplémentaires. Réduction des possibilités d'utilisation à pleine charge. Couple pulsatoire (vibrations, fatigue mécanique) Nuisances sonores.	$FVH \leq 2 \%$ pour les moteurs asynchrones habituels
Transformateurs	Pertes (ohmique-fer) et échauffements supplémentaires. Vibrations mécaniques. Nuisances sonores.	
Disjoncteurs	Déclenchements intempestifs (dépassements des valeurs crêtes de la tension...).	$U_h / U_1 \leq 6$ à 12 %
Câbles	Pertes diélectriques et ohmiques supplémentaires (particulièrement dans le neutre en cas de présence d'harmoniques 3).	THD $\leq 10 \%$ $U_h / U_1 \leq 7 \%$
Ordinateurs	Troubles fonctionnels.	$U_h / U_1 \leq 5 \%$
Electronique de puissance	Troubles liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).	

$$FVH = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / U_1^2} \text{ (Facteur de Variation Harmonique selon CEI 892)}$$

Fig. 5 : effets des harmoniques et limites habituellement retenues.

3.3 Surtensions

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée, la fréquence :

- claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...),
- dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées),
- coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels),
- perturbations des circuits de contrôle-commande et de communication à courant faible (cf. Cahier Technique n°187),

■ contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :

- La foudre essentiellement.

Les réseaux aériens sont les plus affectés par la foudre, mais les installations alimentées par des réseaux souterrains peuvent subir des contraintes de tension élevées en cas de foudroiement à proximité du site.

- Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue.

Elles peuvent conduire à des dégradations aussi importantes que la foudre.

3.4 Variations et fluctuations de tension

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) (cf. Cahier Technique n°176). La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse) dépend de

l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation. Il existe toutefois un seuil de perceptibilité (amplitude en fonction de la fréquence de variation) défini par la CEI en dessous duquel le flicker n'est pas visible.

3.5 Déséquilibres

Le principal effet est le suréchauffement des machines asynchrones triphasées. En effet, la réactance inverse d'une machine asynchrone est équivalente à sa réactance pendant la phase de démarrage. Le taux de déséquilibre en courant sera donc plusieurs fois celui de la tension d'alimentation. Les courants

de phase peuvent alors différer considérablement. Ce qui accroît l'échauffement de la ou des phases parcourues par le courant le plus élevé et réduit la durée de vie de la machine. En pratique, un taux de déséquilibre de tension de 1 % pendant une longue période, et 1,5 % de moins de quelques minutes est acceptable.

3.6 Résumé

Equipements	Sensibilité aux perturbations					
	Creux de tension < 0,5 s	> 0,5 s	Surtensions	Harmoniques	Déséquilibres	Fluctuations de tension
■ Moteur asynchrone						
■ Moteur synchrone						
■ Actionneur						
■ Variateur de vitesse						
■ Charge informatique, commande numérique						
■ Four à induction						
■ Eclairage						
■ Batterie de condensateurs						
■ Transformateur						
■ Onduleur						
■ Disjoncteur						
■ Câble						

4 Niveau de qualité de l'énergie

4.1 Méthodologie d'évaluation

Application contractuelle

Le contrat doit indiquer :

- la durée du contrat,
- les paramètres à mesurer,
- les valeurs contractuelles,
- le(s) point(s) de la mesure,
- les tensions mesurées : ces tensions (entre phases et/ou entre phases et neutre) doivent être celles qui alimentent les équipements ;
- pour chaque paramètres mesurés le choix de la méthode de mesure, l'intervalle de temps, la période de la mesure (par ex. 10 minutes et 1 an pour l'amplitude de la tension) et des valeurs de référence ; par exemple pour les creux de tension et coupures il s'agit de définir la tension de référence, les seuils de détection et la limite entre coupures longues et coupures brèves ;
- la précision de la mesure,
- la méthode de détermination des pénalités en cas de non respect des engagements,
- les clauses en cas de mésentente concernant l'interprétation des mesures (intervention d'une tierce partie...),
- l'accès et la confidentialité des données.

Maintenance corrective

C'est généralement suite à des incidents ou dysfonctionnements en exploitation qu'est engagée une action de dépannage en vue de mettre en place des mesures correctives.

Les étapes sont en général :

■ Recueil de données

Il s'agit de collecter les informations telles que le type de charges, l'âge des composants du réseau et le schéma unifilaire.

■ Recherche de symptômes

Il s'agit d'identifier et de localiser les équipements perturbés, de déterminer l'heure et la date (fixe ou aléatoire) du problème, la corrélation éventuelle avec des conditions météorologiques particulières (vent fort, pluie, orage) ou avec une modification récente de l'installation (installation de nouvelles machines, modification du réseau).

■ Connaissance et vérification de l'installation

Cette phase suffit parfois à déterminer rapidement l'origine du dysfonctionnement.

Les conditions d'environnement telles que l'humidité, la poussière, la température ne doivent pas être sous-estimées.

L'installation, en particulier le câblage, les disjoncteurs et les fusibles, doit être vérifiée.

■ Instrumentation de l'installation

Cette étape consiste à équiper le site d'appareils de mesure qui permettent de détecter et d'enregistrer l'événement à l'origine du problème. Il peut être nécessaire d'instrumenter plusieurs points de l'installation et en particulier (lorsque c'est possible) au plus près de l'(des) équipement(s) perturbé(s).

L'appareil détecte des événements par dépassement de seuils sur les paramètres de mesure de la qualité de l'énergie et enregistre les données caractéristiques de l'événement (par exemple date, heure, profondeur d'un creux de tension, THD). Les formes d'ondes juste avant, pendant et après la perturbation peuvent aussi être sauvegardées. Les seuils doivent être paramétrés en fonction de la sensibilité des équipements.

Lorsque des appareils portatifs sont utilisés, la durée des mesures doit être représentative du cycle de fonctionnement d'une usine (par ex. une semaine). Il faut alors attendre que la perturbation se reproduise.

Des appareils fixes permettent une surveillance permanente de l'installation. Si ces appareils sont correctement paramétrés, ils assurent une fonction de prévention et de détection en consignnant chaque perturbation. Les informations peuvent être visualisées soit localement soit à distance par un réseau Intranet ou Internet. Ceci permet de diagnostiquer les événements mais aussi d'anticiper les problèmes (maintenance préventive). Il en est ainsi avec les appareils de la gamme Power Logic System (Circuit Monitor - Power Meter), Digipact et la dernière génération de disjoncteurs Masterpact équipés de déclencheur Micrologic P (cf. **fig. 6**).

Les enregistrements de perturbations provenant du réseau du distributeur et ayant causé des dommages (destruction de matériels, pertes de production...) peuvent être aussi utiles en cas de négociation de dédommagement.

■ Identification de l'origine

La signature (forme d'onde, profil de valeur efficace) de la perturbation permet en général à des experts de localiser et d'identifier la source du problème (un défaut, un démarrage moteur, un enclenchement de banc de condensateurs...). La connaissance simultanée de la signature en tension et en courant permet en particulier de déterminer si l'origine du problème est située en amont ou en aval du point de mesure. La perturbation peut en effet provenir de l'installation ou du réseau du distributeur.

■ Etude et choix de solutions

La liste et les coûts des solutions sont établis. Le choix de la solution s'effectue souvent en comparant son coût avec le manque à gagner en cas de perturbations. Après la mise en œuvre d'une solution, il est important de vérifier, par la mesure, son efficacité.

Optimiser le fonctionnement des installations électriques

Ce souci d'optimiser le fonctionnement d'une installation électrique se traduit par trois actions complémentaires :

■ Economiser l'énergie et réduire les factures d'énergie

- Sensibiliser les utilisateurs aux coûts,
- Affecter les coûts en interne (par site, par service ou par ligne de produits),

- Localiser les économies potentielles,
- Gérer les crêtes de consommation (délestage, sources autonomes),
- Optimiser le contrat d'énergie (réduction de la puissance souscrite),
- Améliorer le facteur de puissance (réduction de la puissance réactive).

■ Assurer la qualité de l'énergie

- Visualiser et surveiller les paramètres de mesure de la qualité de l'énergie,
- Détecter par anticipation les problèmes (surveillance des harmoniques et du courant de neutre...) pour une maintenance préventive.

■ Veiller à la continuité de service

- Optimiser la maintenance et l'exploitation,
- connaître le réseau en temps réel,
- surveiller le plan de protection,
- diagnostiquer les défauts,
- reconfigurer un réseau suite à un défaut,
- assurer un transfert de source automatique.

Des outils logiciels assurent le contrôle-commande et la surveillance de l'installation. Ils permettent par exemple de détecter et d'archiver les événements, de surveiller en temps réel les disjoncteurs et les relais de protections, de commander à distance les disjoncteurs, et de façon générale d'exploiter les possibilités des appareils communicants (cf. fig. 6).

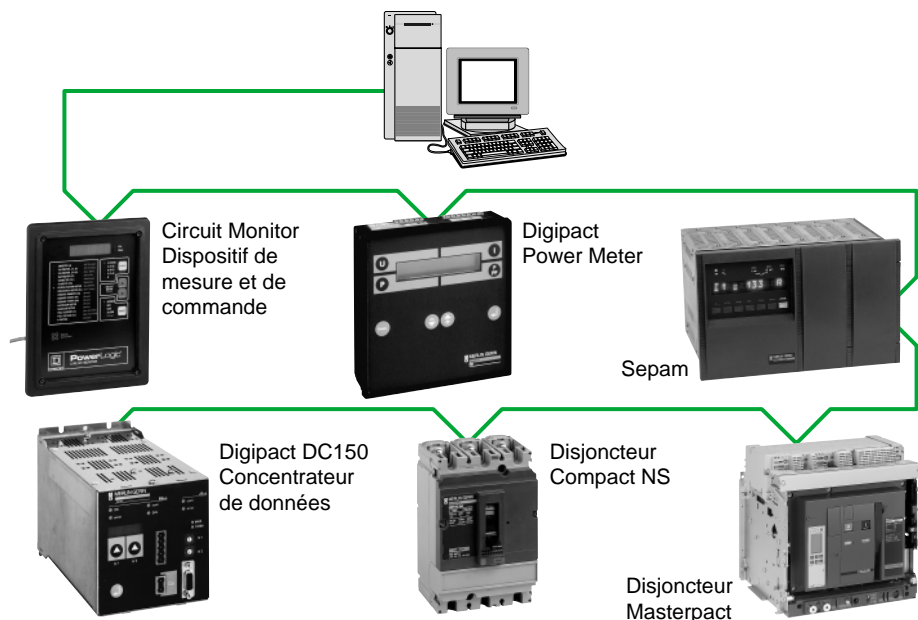


Fig. 6 : quelques produits communicants (marque Merlin Gerin).