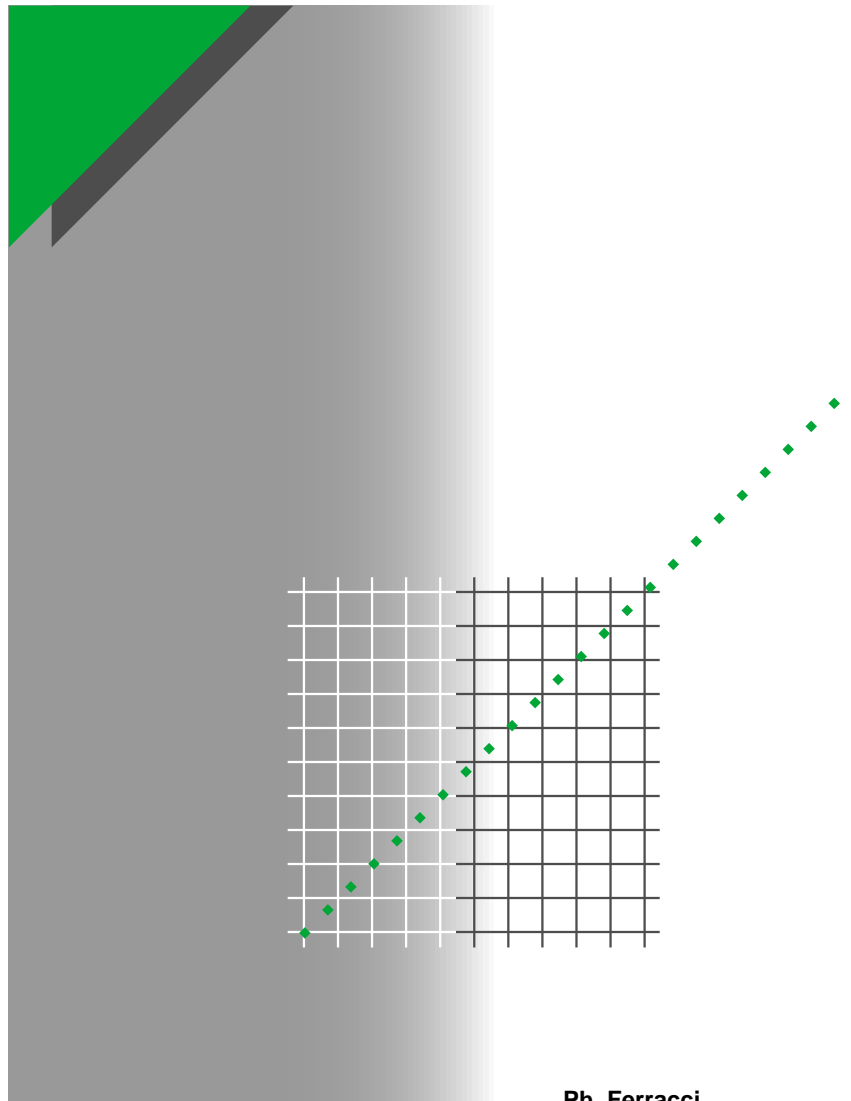


Cahier technique n° 199

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 9kHz),
- 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 power frequency 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 considérés 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

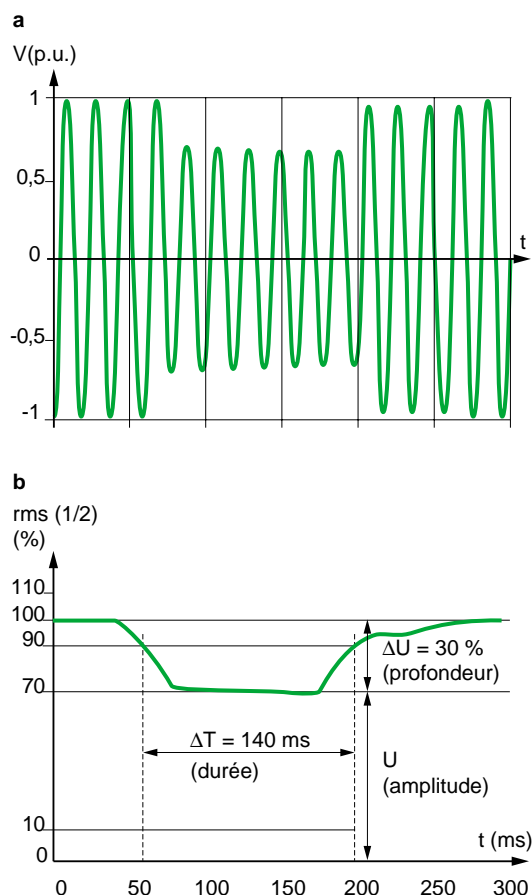


Fig. 1 : paramètres caractéristiques d'un creux de tension ; [a] forme d'onde, [b] rms (1/2).

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 intempesive 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 :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} Y_h^2}}{Y_1}$$

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.

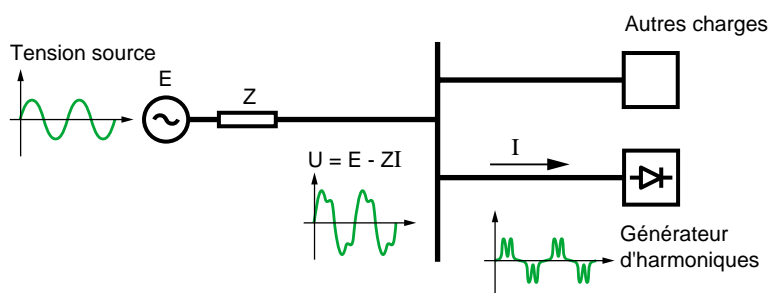


Fig. 2 : dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire.

■ 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.

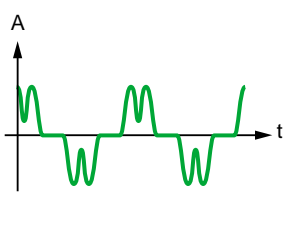
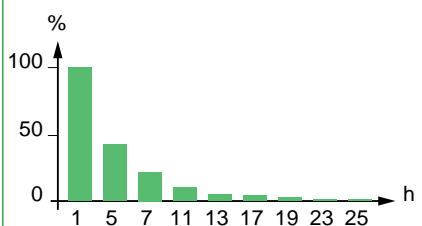
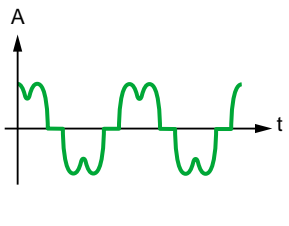
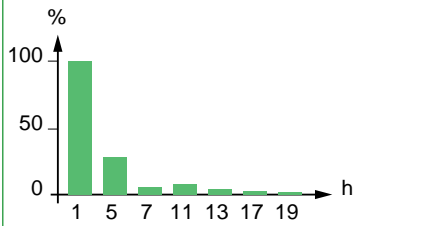
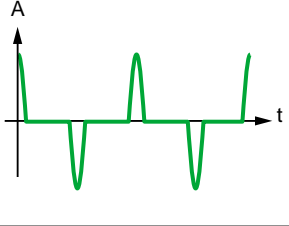
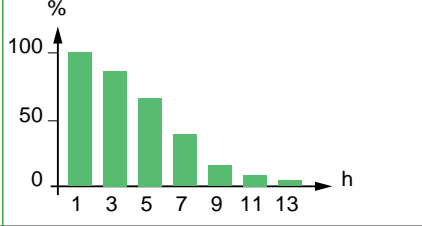
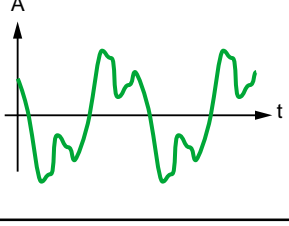
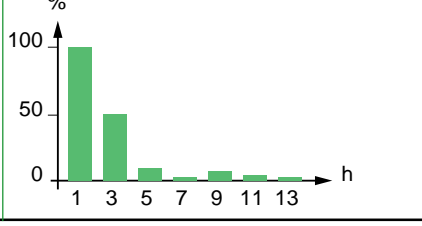
Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THDI
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

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					
□ Défaut d'isolement					
□ Manœuvres					
■ Equipements					
□ Moteur asynchrone					
□ Moteur synchrone					
□ Machine à souder					
□ Four à arc					
□ Convertisseur					
□ Charges informatiques					
□ Eclairage					
□ Onduleur					
□ 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**).

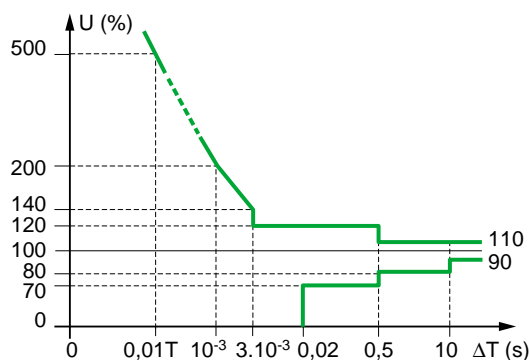


Fig. 4 : tolérance typique définie par la courbe ITI.

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).

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.

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.	$FVH \leq 2\%$
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).	

$$FVH = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} U_h^2 / U_1^2} \text{ (facteur de variation harmonique)}$$

Fig. 5 : effets des harmoniques et niveaux admissibles habituels.

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	Creux de tension > 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).

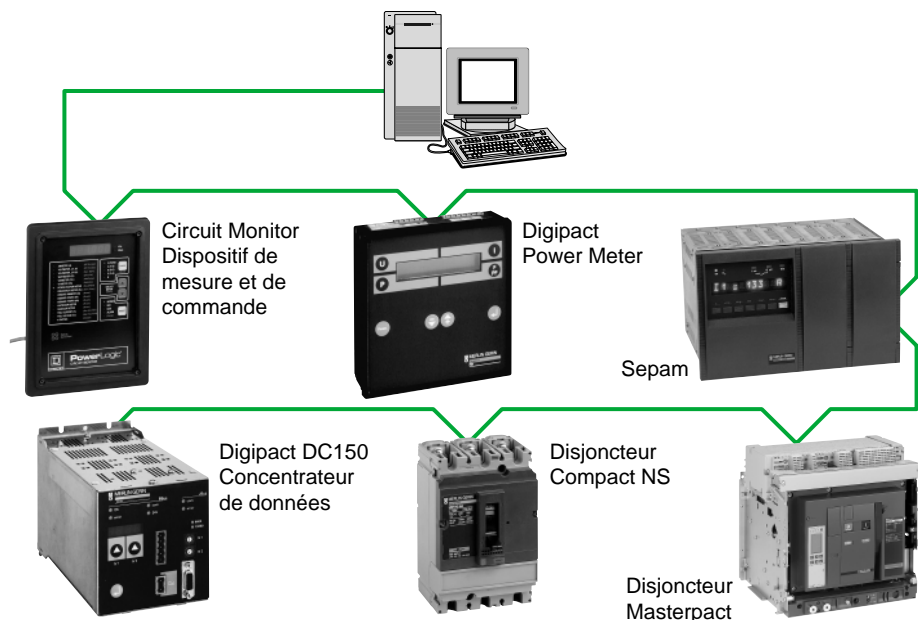


Fig. 6 : quelques produits communicants (marque Merlin Gerin).

4.2 La CEM et les niveaux de planification

La compatibilité électromagnétique (CEM)

La compatibilité électromagnétique est l'aptitude d'un appareil ou d'un système à fonctionner dans son environnement électromagnétique de façon satisfaisante et sans produire lui-même des perturbations électromagnétiques intolérables pour tout ce qui se trouve dans son environnement (VEI 60050 (161)). L'objectif de la compatibilité électromagnétique est d'assurer que :

- L'émission de chaque source séparée de perturbations est telle que l'émission combinée de toutes les sources n'excède pas les niveaux de perturbation attendus dans l'environnement.
- Le niveau d'immunité des équipements permet le niveau de performance approprié au niveau de perturbations attendu selon trois classes d'environnement (cf. **fig. 7**).

A noter que l'environnement est déterminé aussi par les caractéristiques spécifiques de l'installation de l'utilisateur (schéma électrique de l'installation, types de charges) et par les caractéristiques de la tension d'alimentation.

Un moyen d'assurer les niveaux de compatibilité est de spécifier les limites d'émission des installations des usagers avec une marge suffisante en dessous du niveau de compatibilité. En pratique ceci est réalisable pour les installations de grande puissance (CEI 61000-3-6, CEI 61000-3-7). Pour les autres installations (par ex. BT) les normes « produits » spécifient des limites d'émission par familles d'équipements (ex. la norme CEI 61000-3-2 impose les limites d'émission harmoniques en courant pour les charges de moins de 16 A).

Dans certains cas, il est nécessaire de mettre en œuvre des moyens techniques qui maintiennent les niveaux d'émission en dessous des niveaux prescrits.

Caractéristiques de la tension

La méthode permettant d'évaluer les caractéristiques réelles de la tension en un point donné du réseau et de les comparer aux limites précitées, est basée sur un calcul statistique sur une période donnée de mesures. Par exemple, pour la tension harmonique la période de mesure est d'une semaine et 95 % des valeurs efficaces calculées sur des périodes successives de 10 minutes ne doivent pas dépasser les limites spécifiées.

Niveaux de planification

Ce sont des objectifs internes de qualité spécifiés par l'exploitant du réseau et utilisés pour évaluer l'impact sur le réseau de toutes les charges perturbatrices. Ils sont habituellement égaux ou inférieurs aux niveaux de compatibilité.

Résumé

La **figure 8** résume les relations entre les différents niveaux de perturbation.

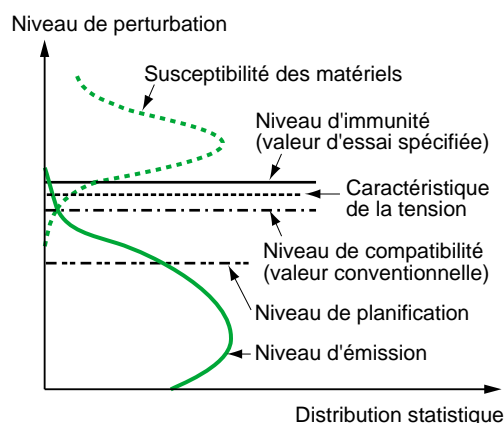


Fig. 8 : relations entre les différents niveaux de perturbation.

Perturbations	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Variations de tension $\Delta U / U_N$	$\pm 8 \%$	$\pm 10 \%$	+10 % -15 %
Creux de tension ⁽¹⁾ $\Delta U / U_N$ ΔT (nombre de demi-période)	10 % à 100 % 1	10 % à 100 % 1 à 300	10 % à 100 % 1 à 300
Coupures brèves (s)	aucune	—	≤ 60
Déséquilibre de tension U_I / U_d	2 %	2 %	3 %
Variations de fréquence $\Delta f / f_N$	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 2 \%$

(1) Ces valeurs ne sont pas des niveaux de compatibilité : elles sont données à titre indicatif.

Fig. 7 : les niveaux de compatibilité selon la norme CEI 61000-2-4.

5 Solutions pour améliorer la QEE

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques. Ceci suppose trois éléments :

- un ou plusieurs générateurs de perturbations,
- un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations,
- entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations.

Les solutions consistent à agir sur tout ou partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs).

Ces solutions peuvent être mise en œuvre pour :

- corriger un dysfonctionnement dans une installation,
- agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes,
- mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie,
- réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en kVA, réduction de la consommation).

Les récepteurs n'étant pas sensibles aux mêmes perturbations et avec des niveaux de sensibilité différents, la solution adoptée, en plus d'être la plus performante d'un point de vue technico-économique, doit garantir un niveau de QEE sur mesure et adapté au besoin réel.

Un diagnostic préalable effectué par des spécialistes, de façon à déterminer la nature des

perturbations contre lesquelles il faut se prémunir (par ex. les remèdes sont différents selon la durée d'une coupure), est indispensable. Il conditionne l'efficacité de la solution retenue. L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent aussi être effectués par des spécialistes.

L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend :

- Du niveau de performance souhaité

Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...)

- Des conséquences financières du dysfonctionnement

Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...) conduit à une perte ou à une non qualité de la production voire une remise en état de l'outil de production.

- Du temps de retour sur investissement souhaité

C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production...) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

D'autres critères tels que les habitudes, la réglementation et les limites de perturbations imposées par le distributeur sont aussi à prendre en compte.

5.1 Creux de tension et coupures

L'architecture du réseau, les automatismes de réalimentation, le niveau de fiabilité des matériels, la présence d'un système de contrôle-commande ainsi que la politique de maintenance jouent un rôle important dans la réduction et l'élimination des temps de coupure.

Pour choisir une solution efficace, il faut avant tout réaliser un bon diagnostic. Par exemple, au point de couplage commun (entrée électrique du client), il est important de savoir si le creux de tension provient de l'installation du client (avec augmentation correspondante de l'intensité) ou du réseau (sans augmentation). Différents types de solutions existent.

Réduction du nombre de creux de tensions et de coupures

Les distributeurs peuvent prendre certaines dispositions telles que la fiabilisation des ouvrages (maintenance préventive ciblée, renouvellement, mise en souterrain), la restructuration des réseaux (raccourcissement de la longueur des départs). Ils peuvent aussi, au sein des réseaux à neutre impédant, remplacer des disjoncteurs déclencheurs-réenclencheurs automatiques par des disjoncteurs shunt qui ont le gros avantage de ne pas provoquer de coupures sur le départ avarié en cas de défaut fugitif à la terre (réduction du nombre de coupures brèves).

Ces disjoncteurs provoquent l'extinction des défauts fugitifs à la terre en annulant pendant au moins 300 ms la tension aux bornes du défaut par la mise à la terre de la seule phase en défaut au niveau du jeu de barres du poste source. Ce qui ne modifie pas la tension entre phases alimentant la clientèle.

Réduction de la durée et de la profondeur des creux de tension

- Au niveau du réseau
 - Augmentation des possibilités de bouclage (nouveaux postes source, interrupteur de bouclage).
 - Amélioration du niveau de performance des protections électriques (sélectivité, automatisme de reprise d'alimentation, organes télécommandés en réseau, téléconduite, remplacement des éclateurs par des parafoudres...).
 - Augmentation de la puissance de court circuit du réseau.

- Au niveau des équipements

Diminution de la puissance absorbée par les charges de fortes puissances lors de leur mise sous tension avec des compensateurs automatiques en temps réel et des démarreurs progressifs qui limitent les pointes de courant (ainsi que les sollicitations mécaniques).

Insensibilisation des installations industrielles et tertiaires

Le principe général de désensibilisation contre les creux de tension et les coupures est de compenser le manque d'énergie par un dispositif à réserve d'énergie intercalé entre le réseau et l'installation. Cette réserve doit avoir une autonomie supérieure à la durée du défaut de tension dont on veut se protéger.

Les informations nécessaires au choix du dispositif d'insensibilisation sont :

- qualité de la source (niveau maximal de perturbations présent),
- exigences des récepteurs (sensibilité dans le plan durée-profondeur).

Seule une analyse fine du process et des conséquences techniques et financières de la perturbation permet de les réunir.

Différentes solutions de désensibilisation sont possibles selon la puissance nécessaire à l'installation et la durée du creux de tension ou de la coupure.

Il est souvent intéressant d'étudier les solutions en distinguant l'alimentation du Contrôle-

Commande et des régulations de celle des moteurs et des gros consommateurs d'énergie. En effet, un creux de tension ou une coupure (même brève) peut être suffisante pour faire ouvrir tous les contacteurs dont les bobines sont alimentées par le circuit de puissance. Les récepteurs commandés par des contacteurs ne sont alors plus alimentés lors du retour de la tension.

Insensibilisation du contrôle-commande

L'insensibilisation d'un process est généralement basée sur l'insensibilisation du contrôle commande.

Le contrôle-commande des équipements est en général peu consommateur d'énergie et sensible aux perturbations. Il est donc souvent plus économique de désensibiliser uniquement le contrôle-commande et non pas l'alimentation en puissance des équipements.

Le maintien de la commande sur les machines suppose :

- qu'il ne peut y avoir danger pour la sécurité du personnel et des équipements lors du retour de la tension,

- que les charges et les procédés admettent une coupure brève du circuit de puissance (forte inertie ou ralentissement toléré) et puissent réaccélérer à la volée lors du retour de la tension,

- que la source peut assurer l'alimentation de l'ensemble des récepteurs en régime permanent (cas d'une source de remplacement) mais aussi l'appel de courant provoqué par le redémarrage simultané de nombreux moteurs.

Les solutions consistent à alimenter toutes les bobines des contacteurs par une source auxiliaire sûre (batterie ou groupe tournant avec volant d'inertie), ou à utiliser un relais temporisé à la retombée, ou encore par l'intermédiaire d'un redresseur et d'un condensateur branché en parallèle avec la bobine.

Insensibilisation de l'alimentation en puissance des équipements

Certains récepteurs n'acceptent pas les niveaux de perturbations attendus, voire ni creux de tension ni coupures. C'est le cas des charges « prioritaires » telles que les ordinateurs, éclairages et systèmes de sécurité (hôpitaux, balisage des aéroports, locaux recevant du public) et les chaînes de fabrication continue (fabrication de semi-conducteurs, centres de calcul, cimenterie, traitement de l'eau, manutention, industrie du papier, sidérurgie, pétrochimie, etc.).

En fonction de la puissance nécessaire à l'installation et de la durée du creux de tension ou de la coupure le choix se fait entre les différentes solutions techniques suivantes.

■ Alimentation statique sans interruption (ASI)

Une ASI est constituée de trois éléments principaux :

- un redresseur-chargeur, alimenté par le réseau, transforme la tension alternative en tension continue ;
- une batterie est maintenue chargée, qui, lors d'une coupure, fournit l'énergie nécessaire à l'alimentation de la charge par l'onduleur ;
- un onduleur qui transforme la tension continue en tension alternative.

Deux technologies sont couramment utilisées : on-line ou off-line.

□ La technologie on-line

En fonctionnement normal, l'alimentation est délivrée en permanence par l'onduleur sans solliciter la batterie. C'est par exemple le cas des onduleurs Comet, Galaxy de la marque MGE-UPS. Ils assurent la continuité (pas de délais de commutation) et la qualité (régulation de tension et de fréquence) de l'alimentation pour des charges sensibles de quelques centaines à plusieurs milliers de kVA.

Plusieurs ASI peuvent être mises en parallèle pour obtenir plus de puissance ou pour créer une redondance.

En cas de surcharges, l'utilisation est alimentée par le contacteur statique (cf. fig. 9) à partir du réseau 2 (qui peut être confondu avec le réseau 1).

La maintenance est assurée sans coupure via un by-pass de maintenance.

□ La technologie off-line (ou stand-by)

Elle est employée pour des applications ne dépassant pas quelques kVA.

En fonctionnement normal, l'utilisation est alimentée par le réseau. En cas de perte du réseau ou lorsque la tension sort des tolérances prévues, l'utilisation est transférée sur l'onduleur. Cette commutation provoque une coupure de 2 à 10 ms.

■ La permutation de sources

Un dispositif élabore les ordres de permutation de la source principale à une source de remplacement (et inversement) pour l'alimentation des charges prioritaires et si nécessaire émet les ordres de délestage des charges non prioritaires. Trois types de permutation existent selon la durée de transfert (Δt) :

- synchrone ($\Delta t = 0$),
- à temps mort ($\Delta t = 0,2$ à 30 s),
- pseudo-synchrone ($0,1$ s $< \Delta t < 0,3$ s).

Ces dispositifs imposent des précautions particulières (cf. Cahier Technique n°161). Par exemple, lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs réaccélération simultanées provoquent une chute de tension qui peut empêcher le redémarrage ou conduire à des redémarrages trop longs (avec des risques d'échauffement). Il est alors judicieux de prévoir un automate qui réalise un redémarrage échelonné des moteurs prioritaires, particulièrement avec une source de remplacement (de secours) de faible puissance de court-circuit.

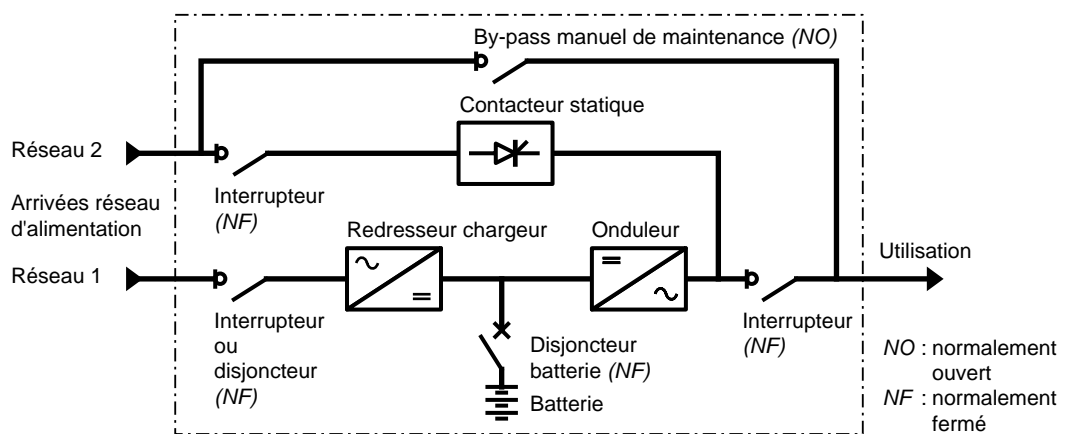


Fig. 9 : schéma de principe d'une alimentation sans interruption (ASI) on-line.

Cette solution est à retenir lorsqu'une installation ne peut pas supporter une longue interruption, supérieure à quelques minutes, et/ou nécessite une grosse puissance disponible. Elle peut aussi être prévue en complément d'une ASI.

■ Groupe à temps zéro

Dans certaines installations, l'autonomie nécessaire en cas de coupure est telle qu'un groupe électrogène est installé (des batteries conduiraient à des coûts prohibitifs, à des problèmes de réalisation technique ou à des problèmes d'installation). Cette solution permet, en cas de perte de l'alimentation, d'effectuer grâce à l'autonomie de la batterie, le démarrage du groupe électrogène, sa mise en vitesse, un éventuel délestage et un couplage sans coupure au moyen d'un inverseur de source automatique.

■ Compensateurs électroniques

Ces dispositifs électroniques modernes compensent dans une certaine mesure les creux de tension et les coupures avec un faible temps de réponse, par exemple le compensateur automatique en temps réel réalise une

compensation en temps réel de la puissance réactive ; il est particulièrement bien adaptée au cas des charges variant rapidement et de façon importante (soudeuses, élévateurs, presses, concasseurs, démarrages moteur...).

L'arrêt propre

Si un arrêt est acceptable, l'impossibilité d'une remise en marche non contrôlée est particulièrement indiquée lorsqu'un redémarrage intempestif présente un risque pour l'opérateur sur machine (scie circulaire, machine tournante) ou pour le matériel (cuve de compression encore sous pression ou étalement des redémarrages dans le temps de compresseurs de climatiseurs, pompes à chaleur ou de groupes frigorifiques) ou pour l'application (nécessité de contrôler le redémarrage de la fabrication). Un redémarrage automatique du procédé peut être ensuite assuré par un automate selon une séquence de redémarrage préétablie quand les conditions sont redevenues normales.

Résumé (cf. tableau ci-dessous)

Puissance de l'installation	Durée (grandeurs indicatives) et impératifs techniques						Solution de désensibilisation
	0 à 100 ms	100 ms à 400 ms	400 ms à 1 s	1 s à 1 min	1 min à 3 min	> 3 min	
Quelques VA							Temporisation des contacteurs.
							Alimentation en courant continu avec stockage par capacité.
< 500 kVA							Groupe tournant avec volant d'inertie.
< 1 MVA							Permutation de source Groupe diesel.
< 300 kVA	Entre 15 minutes et plusieurs heures, suivant la capacité de la batterie.						Alimentation en courant continu avec stockage par batterie.
< 500 kVA	La permutation sur une source de secours peut provoquer une coupure brève.						Groupe tournant avec volant d'inertie et moteur thermique ou source de secours.
< 500 kVA	Entre 15 minutes et plusieurs heures, suivant la capacité de la batterie.						Moteur à courant continu associé à une batterie et un alternateur.
< 1 MVA (jusqu'à 4800 kVA avec plusieurs ASI en parallèle)	Entre 10 minutes (standard) et plusieurs heures, suivant la capacité de la batterie.						ASI.

- Système de désensibilisation efficace
- Système de désensibilisation inefficace

5.2 Harmoniques

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leur influence. Un paragraphe particulier aborde la question des protections.

■ Réduction des courants harmoniques générés

□ Inductance de ligne

Une inductance triphasée est placée en série avec l'alimentation (ou intégrée dans le bus continu pour les convertisseurs de fréquence). Elle réduit les harmoniques de courant de ligne (en particulier ceux de rang élevés) donc la valeur efficace du courant absorbé ainsi que la distorsion au point de raccordement du convertisseur. Il est possible de l'installer sans intervenir sur le générateur d'harmoniques et d'utiliser des inductances communes à plusieurs variateurs.

□ Utilisation de redresseurs dodécaphasés

Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile, l'autre en triangle, et permet de ne générer que les harmoniques de rang $12k \pm 1$.

□ Appareils à prélèvement sinusoïdal (cf. Cahier Technique n°183)

Cette méthode consiste à utiliser des convertisseurs statiques dont l'étage redresseur exploite la technique de commutation MLI qui permet d'absorber un courant sinusoïdal.

■ Modification de l'installation

□ Immuniser les charges sensibles à l'aide de filtres

□ Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation

□ Déclasser des équipements

□ Confiner les charges polluantes

En premier, il faut raccorder les équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation.

Ensuite, il faut identifier puis séparer les charges polluantes des charges sensibles, par exemple en les alimentant par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés. Tout cela en sachant que les solutions qui consistent à agir sur la structure de l'installation sont, en général, lourdes et coûteuses.

□ Protections et surdimensionnement des condensateurs

Le choix de la solution dépend des caractéristiques de l'installation. Une règle simplifiée permet de choisir le type d'équipement avec

Gh puissance apparente de tous les générateurs d'harmoniques alimentés par le même jeu de barres que les condensateurs, et Sn puissance apparente du ou des transformateurs amont :

- si $Gh/Sn \leq 15\%$ les équipements type standard conviennent,

- si $Gh/Sn > 15\%$ deux solutions sont à envisager.

1 - Cas de réseaux pollués

($15\% < Gh/Sn \leq 25\%$) : il faut surdimensionner en courant les appareillages et les liaisons en série et en tension les condensateurs.

2 - Cas de réseaux très pollués

($25\% < Gh/Sn \leq 60\%$) : il faut associer des selfs anti-harmoniques aux condensateurs accordées à une fréquence inférieure à la fréquence de l'harmonique le plus bas (par exemple 215 Hz pour un réseau 50 Hz) (cf. **fig. 10**). Ceci élimine les risques de résonance et contribue à réduire les harmoniques.

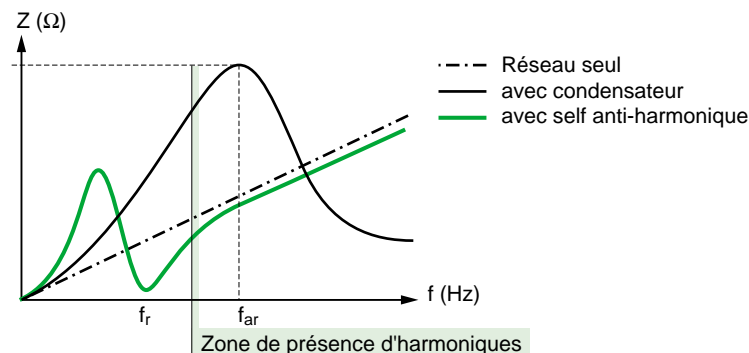


Fig 10 : effets d'une self anti-harmonique sur l'impédance d'un réseau.

■ Filtrage

Dans le cas où $Gh/Sn > 60\%$, le calcul et l'installation de filtre d'harmonique doivent être réalisés par des spécialistes (cf. **fig. 11**).

□ Le filtrage passif (cf. Cahier Technique n°152)

Il consiste à réaliser une impédance faible aux fréquences à atténuer grâce à l'agencement de composants passifs (inductance, condensateur, résistance). Cet ensemble est placé en dérivation sur le réseau. Plusieurs filtres passifs en parallèle peuvent être nécessaires pour filtrer plusieurs composantes. Le dimensionnement des filtres harmoniques doit être soigné : un filtre passif mal conçu peut conduire à des résonances dont l'effet est d'amplifier des fréquences qui n'étaient pas gênantes avant son installation.

□ Le filtrage actif (cf. Cahier Technique n°183)

Il consiste à neutraliser les harmoniques émis par la charge en analysant les harmoniques

consommés par la charge et en restituant ensuite le même courant harmonique avec la phase convenable. Il est possible de mettre en parallèle plusieurs filtres actifs. Un filtre actif peut être, par exemple, associé à une ASI de façon à réduire les harmoniques réinjectés en amont.

□ Le filtrage hybride

Il est composé d'un filtre actif et d'un filtre passif accordé sur le rang de l'harmonique prépondérant (ex. 5) et qui fournit l'énergie réactive nécessaire.

■ Cas particulier : les disjoncteurs (cf. Cahier Technique n°182)

Les harmoniques peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des dispositifs de protection, pour les éviter il convient de bien choisir ces appareils.

Les disjoncteurs peuvent être équipés de deux types de déclencheurs, magnétothermiques ou électroniques.

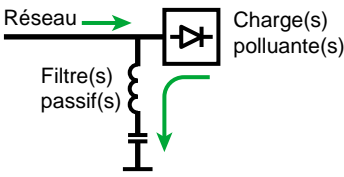
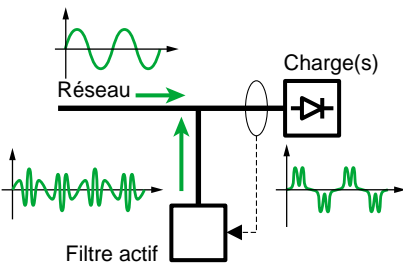
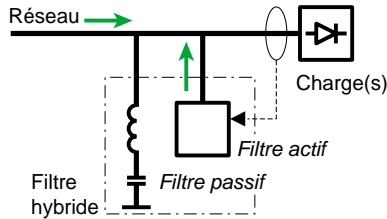
Filtre	Principe	Caractéristiques
Passif	<p>Dérivation par un circuit LC accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pas de limites en courant harmonique. ■ Compensation d'énergie réactive assurée. ■ Elimination d'un ou plusieurs rangs harmoniques (habituellement : 5, 7, 11). Un filtre pour un ou deux rangs à compenser. ■ Risque d'amplification des harmoniques en cas de modification du réseau. ■ Risque de surcharge par pollution extérieure. ■ Filtre « réseau » (global). ■ Etude au cas par cas.
Actif	<p>Génération d'un courant annulant tous les harmoniques créés par la charge.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Solution bien adaptée au filtrage « machine » (local) ■ Filtrage sur une large bande de fréquence (élimination des harmoniques des rangs 2 à 25). ■ Auto-adaptatif : <ul style="list-style-type: none"> □ modification du réseau sans influence, □ s'adapte à toutes variations de charge et de spectre harmonique, □ solution évolutive et souple en fonction de chaque type de charge. ■ Etude simplifiée.
Hybride		<p>Cumule les avantages des solutions filtrage passif et actif et couvre un large domaine de puissance et de performances :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Filtrage sur une large bande de fréquences (élimination des harmoniques de rangs 2 à 25). ■ Compensation d'énergie réactive. ■ Grande capacité de filtrage en courant. ■ Bonne solution technico-économique pour un filtrage « réseau ».

Fig. 11 : principes et caractéristiques du filtrage passif, actif, hybride.

Les premiers cités sont surtout sensibles aux harmoniques par leurs capteurs thermiques qui appréhendent bien la charge réelle imposée aux conducteurs par la présence des harmoniques. De ce fait ils sont bien adaptés à leur usage, essentiellement domestique et industriel, sur les circuits de petites intensités.

Les seconds, selon leur mode de calcul des intensités véhiculées, peuvent présenter le risque de déclenchement intempestif, aussi il convient de bien choisir ces appareils et de veiller à ce qu'ils mesurent la valeur efficace

vraie du courant (RMS). De tels appareils présentent alors l'avantage de mieux suivre l'évolution de la température des câbles notamment dans le cas de charges à fonctionnement cyclique car leur mémoire thermique est plus performante que celle des bilames à chauffage indirect.

■ Le déclassement

Cette solution, applicable à certains équipements, est une réponse facile et souvent suffisante à la gêne occasionnée par les harmoniques.

5.3 Surtensions

Obtenir une bonne coordination d'isolement c'est réaliser la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique.

Elle nécessite (cf. Cahier Technique n°151) :

- de connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau,
- de choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes,
- d'utiliser des protections quand cela est nécessaire.

En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées.

Surtensions à fréquence industrielle

- Mettre hors service tout ou partie des condensateurs en période de faible charge,
- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de ferorésonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène (cf. Cahier Technique n°190).

Surtensions de manœuvre

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l'installation de self de choc, résistances de préinsertion. Les compensateurs automatiques statiques qui permettent de maîtriser l'instant d'enclenchement sont particulièrement adaptés aux applications BT n'acceptant pas les surtensions transitoires (automates industriels, informatique).
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires.
- Utiliser des disjoncteurs de branchement différentiels et sélectif (type « **S** ») en BT et des disjoncteurs de type « **si** » ($I_{\Delta n} = 30 \text{ mA}$ et 300 mA). Leur emploi évite les déclenchements intempestifs dus à des courants de fuite transitoires : surtensions atmosphériques, de

manœuvre, mise sous tension de circuits fortement capacitifs à la terre (filtres capacitifs reliés à la terre, réseaux de câbles étendus...) qui s'écoulent dans le réseau en aval du DDR (Dispositif à courant Différentiel Résiduel) par les capacités à la terre du réseau.

Surtensions atmosphériques

■ Protection primaire

Elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu).

■ Protection secondaire

Elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre.

Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposés et à l'entrée des postes MT/BT (cf. Cahier Technique n°151).

En BT, ils sont installés à la fois le plus en amont possible de l'installation BT (afin de protéger le plus globalement possible) et le plus près possible des récepteurs électriques. La mise en cascade de parafoudres est parfois nécessaire : un, en tête d'installation, et un, au plus près des récepteurs (cf. Cahier Technique n°179). Un parafoudre BT est toujours associé à un dispositif de déconnexion. D'autre part, l'utilisation d'un disjoncteur de branchement différentiel sélectif en BT évite que l'écoulement du courant à la terre par le parafoudre ne provoque de déclenchement intempestif du disjoncteur de tête incompatible avec certains récepteurs (congélateur, programmeur...). A noter que les surtensions peuvent se propager jusqu'à l'appareil par d'autres voies que l'alimentation électrique : les lignes téléphoniques (téléphone, fax), les câbles coaxiaux (liaisons informatiques, antennes de télévision). Il existe sur le marché des protections adaptées.

5.4 Fluctuations de tension

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L'amplitude de la fluctuation dépend du rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation. Les solutions consistent à :

- Changer de mode d'éclairage

Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence.

- Installer une alimentation sans interruption

Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés.

- Modifier le perturbateur

Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités.

- Modifier le réseau

- Augmenter la puissance de court circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point de l'alimentation.

- Eloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.

- Utiliser un compensateur automatique

Cet équipement réalise une compensation en temps réel phase par phase de la puissance réactive. Le flicker peut être réduit de 25 % à 50 %.

- Placer une réactance série

En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30 % le taux de flicker.

5.5 Déséquilibres

Les solutions consistent à :

- équilibrer les charges monophasées sur les trois phases,

- diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les

puissances des transformateurs et la section des câbles,

- prévoir une protection adaptée des machines,

- utiliser des charges L,C judicieusement raccordées (montage de Steinmetz).

5.6 Résumé

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions (équipement spécifiques et modifications)
Variations et fluctuations de tension	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel, compensateur électronique série, régulateur en charge.
Creux de tension	Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur...).	Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.	ASI, compensateur automatique en temps réel, régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série. Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc). Modifier la sélectivité des protections.
Coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif.		ASI, permutation mécanique de sources, permutation statique de sources, groupe à temps zéro, disjoncteur shunt, téléconduite.
Harmoniques	Charges non linéaires (vari-ateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, inductance de ligne. Augmenter la Pcc. Confiner les charges polluantes. Déclasser les équipements.
Inter-harmoniques	Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	Réactance série.
Surtensions transitoires	Manœuvre d'appareillages et de condensateurs, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation.	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de préinsertion, self de choc, compensateur automatique statique.
Déséquilibres de tension	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance...).	Couples moteurs inverses (vibrations) et surchauffement des machines asynchrones.	Équilibrer les charges. Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. Augmenter la Pcc.

6 Etudes de cas

6.1 Filtrage hybride

Description de l'installation

Des remontées mécaniques sont alimentées par un transformateur MT/BT (800 kVA).

Les charges connectées sont des télésièges ainsi que d'autres charges telles que des caisses enregistreuses, les systèmes de validation des forfaits, l'installation de chronométrage officiel pour compétition et un réseau téléphonique.

Problèmes rencontrés

Lors du fonctionnement du télésiège, le réseau basse tension issu du transformateur MT/BT est perturbé.

Les mesures effectuées sur le site mettent en évidence un fort taux préexistant de distorsion harmonique en tension (THDU \approx 9 %) provenant du réseau MT ainsi qu'une pollution harmonique de la part du départ télésiège. La déformation résultante de la tension d'alimentation (THDU \approx 12 %) perturbe les récepteurs sensibles (caisses enregistreuses, chronométrage...).

Solutions

L'objectif du dispositif est d'assurer à la fois la compensation d'énergie réactive en présence d'harmoniques et la neutralisation des harmoniques susceptibles de perturber l'installation. La solution retenue (cf. fig. 12) est la mise en œuvre d'un filtre hybride (cf. fig. 13) composé d'un filtre passif accordé sur le rang de l'harmonique prépondérant (H5) qui fournit l'énergie réactive nécessaire (188 kvar) et d'un filtre actif de calibre 20 A affecté au traitement des autres rangs d'harmoniques.

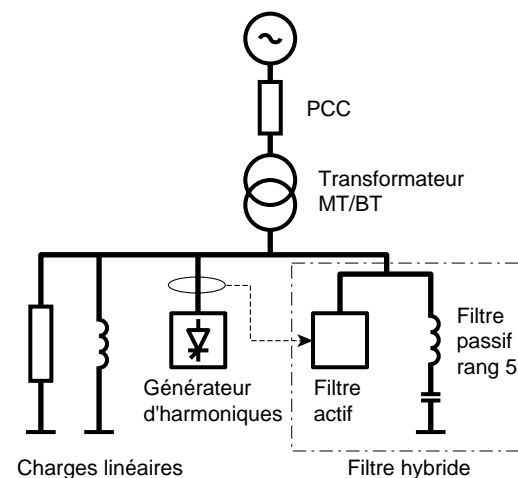


Fig. 12 : mise en œuvre de la solution.

Les mesures, après mise en service, montrent que ce dispositif permet de réduire l'amplitude des harmoniques sur une large gamme de rang d'harmoniques en courant et en tension (cf. fig. 14) et ramène le taux de distorsion en tension de 12,6 % à 4,47 %. Il a aussi pour effet de ramener le facteur de puissance de l'installation de 0,67 à 0,87. Cette solution a permis de résoudre tous les problèmes puisqu'aucun dysfonctionnement n'a été constaté depuis.



Fig. 13 : équipement Rectiphase de filtrage hybride (marque Merlin Gerin).

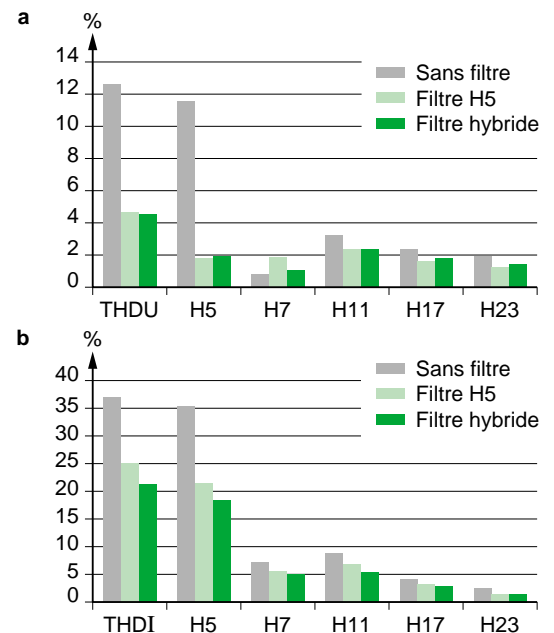


Fig. 14 : spectres montrant l'efficacité d'un filtre hybride : [a] en tension, [b] en courant.

6.2 Compensation automatique en temps réel

Description de l'installation

L'usine d'un équipementier automobile localisée à Concord (Ontario - Canada) est alimentée par un transformateur de 2000 kVA - 27,6 kV / 600 V - Yy - U_{cc} = 5,23 %.

Elle fabrique des pots d'échappement à partir de tôles d'acier grâce à des soudeuses par point et à roulette.

Problèmes rencontrés

- Fatigue visuelle et nerveuse du personnel, due à la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker), lorsque les soudeuses sont en fonctionnement.
 - Nuisances sonores et vieillissement mécanique prématuré des équipements provoqués par des vibrations principalement au niveau du transformateur et des appareils de coupure lorsque les soudeuses sont en fonctionnement.
 - Impossibilité d'ajouter des équipements de peur de surcharger l'installation (présence d'un courant crête au moment du soudage supérieur au courant nominal du disjoncteur d'arrivée). L'expansion de l'installation nécessite alors des investissements coûteux, soit pour redimensionner l'installation existante, soit pour créer un nouveau poste d'alimentation.
 - Pénalités annuelles de 35 kF pour dépassement de consommation de puissance réactive (facteur de puissance de 0,75).
 - Pièces défectueuses à cause de défauts de soudure apparaissant en fin de fabrication au moment du cintrage des tubes.
- Tout cela détériore la productivité de l'entreprise.

Solutions

Des mesures effectuées lors du fonctionnement des soudeuses mettent en évidence une tension nominale de 584 V, des creux de tension de profondeur 5,8 %, des pics de courant de 2000 A, des pics de puissance réactive de 1200 kvar (cf. **fig. 15**).

	Avant	Après
Tension (V)	584	599
Creux de tension		
■ Profondeur (%)	5,8	3,2
■ Durée (cycle)	20 à 25	10 à 15
Courant		
■ Moyen	1000	550
■ Crête	2000	1250
Puissance réactive (kvar)	600 – 1200	0 – 300
Facteur de puissance	0,75	> 0,92
THDI (%)	5 – 12	4 – 12

Fig. 15 : améliorations apportées par le compensateur automatique en temps réel.

Les problèmes rencontrés ont clairement pour origine les fluctuations de tension provoquées par le fonctionnement des soudeuses qui sont des charges à variations rapides et fréquentes qui consomment une puissance réactive importante.

Un creux de tension de 6 % a pour conséquence une réduction de 12 % ($1-0,94^2$) de l'énergie disponible pour la soudure. Cela explique le nombre important de soudures défectueuses.

Les dispositifs classiques de compensation d'énergie réactive utilisant des contacteurs électromécaniques ne permettent pas d'atteindre les temps de réponse nécessaires ; les manœuvres de gradins de condensateurs sont volontairement temporisées de façon à réduire le nombre de manœuvre et ne pas dégrader la durée de vie des contacteurs par une usure prématurée, mais aussi de façon à permettre la décharge des condensateurs.

La solution retenue a été la mise en œuvre d'une compensation automatique en temps réel (cf. **fig. 16**). Ce dispositif innovant permet :

- une compensation ultra rapide des variations de puissance réactive en une période du fondamental (16,6 ms à 60 Hz), particulièrement bien adaptée au cas des charges variant rapidement et de façon importante (soudeuses, élévateurs, presses, concasseurs, démarrages moteurs...);
- un enclenchement sans transitoire par la maîtrise de l'instant d'enclenchement, particulièrement intéressant en présence de charges n'acceptant pas de surtensions transitoires (automates industriels, informatiques...);
- une durée de vie accrue des condensateurs et des contacteurs du fait de l'absence de pièces mécaniques en mouvement et de surtensions.

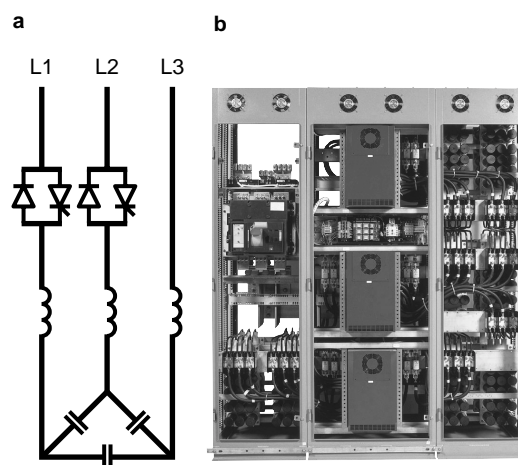


Fig. 16 : compensateur automatique en temps réel : [a] principe, [b] réalisation pratique.

Une compensation de 1200 kvar aurait permis de minimiser les creux de tension, mais 800 kvar ont été jugés suffisants pour maintenir la tension à un niveau acceptable par tous les procédés de l'usine dans toutes les conditions de charge.

La mise en œuvre de la solution a permis (cf. **fig. 17**) :

- de réduire les pics de courant à 1250 A et ainsi de pouvoir ajouter des charges supplémentaires sans modification de l'installation, avec amélioration du rendement de l'installation par la réduction des pertes Joule ;

- de réduire les pics de puissance réactive à 300 kvar et d'augmenter le facteur de puissance au dessus de 0,92. Ce qui évite les pénalités de facturation énergétique ;

- d'augmenter la tension nominale à 599 V et de réduire la profondeur des creux de tension à 3,2 % (cf. **fig. 16**). Cela est une conséquence de l'augmentation du facteur de puissance et de la réduction de l'amplitude du courant (cf. **fig. 18**). La fatigue visuelle et nerveuse du personnel due au flicker est ainsi éliminée. La qualité de la soudure a été améliorée, ainsi que la cadence de production.

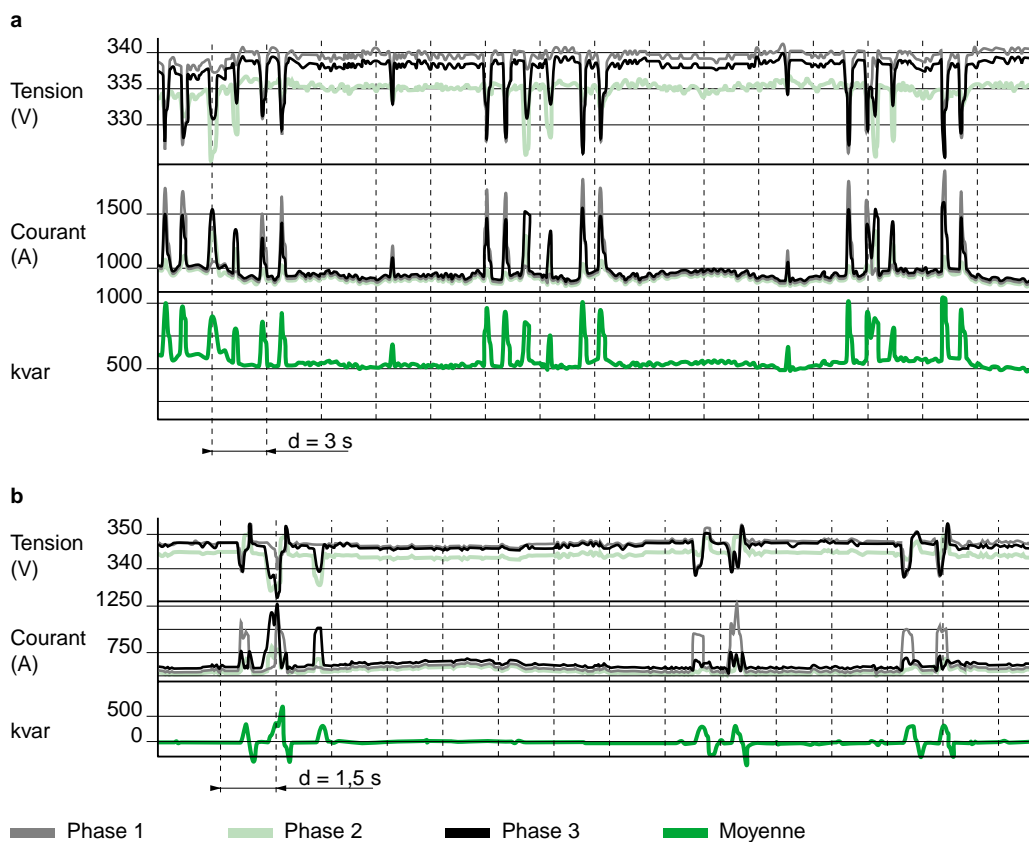


Fig. 17 : mesure des courants, tensions et puissance réactive : **[a]** sans compensation, **[b]** avec compensation.

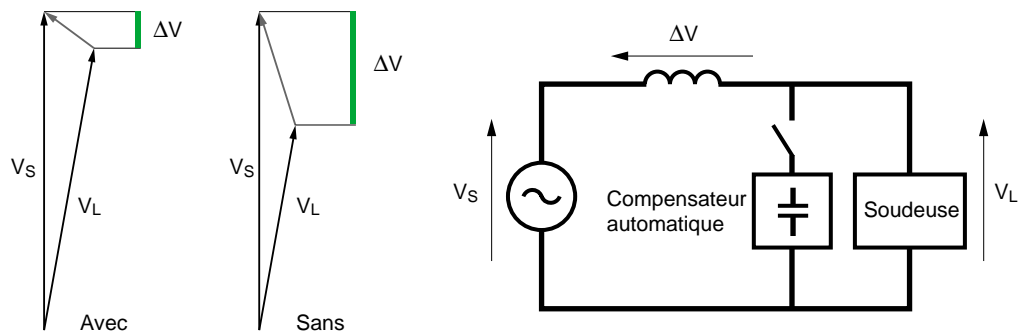


Fig. 18 : réduction de la chute de tension obtenue avec un compensateur automatique en temps réel.

6.3 Protection contre la foudre

Description de l'installation

Le site est constitué de bureaux (matériel informatique, centrale d'éclairage et de chauffage), d'un poste de garde (alarme incendie, alarme intrusion, contrôle d'accès, vidéo surveillance) et de trois bâtiments de process de fabrication installés sur 10 hectares dans la région d'Avignon (densité de foudroiement de 2 impacts par km² et par an).

Le site est entouré de quelques arbres et de structures métalliques (pylônes). Tous les bâtiments sont équipés de paratonnerres. Les alimentations MT et BT sont souterraines.

Problèmes rencontrés

Un orage s'est abattu sur le site détruisant l'installation basse tension de sécurité du poste de garde, et provoquant 240 kF de pertes d'exploitation. La présence de paratonnerres a évité l'incendie de la structure, mais les équipements électriques détruits n'étaient pas protégés par des parafoudres contrairement à la recommandation des normes UTE C-15443 et CEI 61024.

Solutions

Après analyse du réseau d'équipotentialité et du réseau des prises de terre, puis vérification de l'installation des paratonnerres et contrôle de la valeur des prises de terre, il a été décidé d'installer des parafoudres.

Des parafoudres sont installés en tête d'installation (TGBT) et, en cascade, dans chaque bâtiment de fabrication (cf. **fig. 19**). Le schéma de liaison à la terre étant TNC, la protection n'est utile qu'en mode commun (entre phases et PEN).

Conformément au guide UTE C-15443, en présence de paratonnerre, les caractéristiques des parafoudres PF65 et PF8 de marque Merlin Gerin (cf. **fig. 20**), sont :

- En tête d'installation

$I_n = 20 \text{ kA} - I_{max} = 65 \text{ kA} - U_p = 2 \text{ kV}$,

- En cascade (distants d'au moins 10 m)

$I_n = 2 \text{ kA} - I_{max} = 8 \text{ kA} - U_p = 1,5 \text{ kV}$.

Ces derniers assurent une protection fine au niveau des tableaux divisionnaires (bureaux et poste de garde).

Le schéma de liaison à la terre étant transformé en TNS, il convient d'assurer la protection en mode commun (entre phase et PE) et en mode différentiel (entre phases et neutre). Les dispositifs de déconnexion associés sont ici des disjoncteurs d'un pouvoir de coupure de 22 kA.

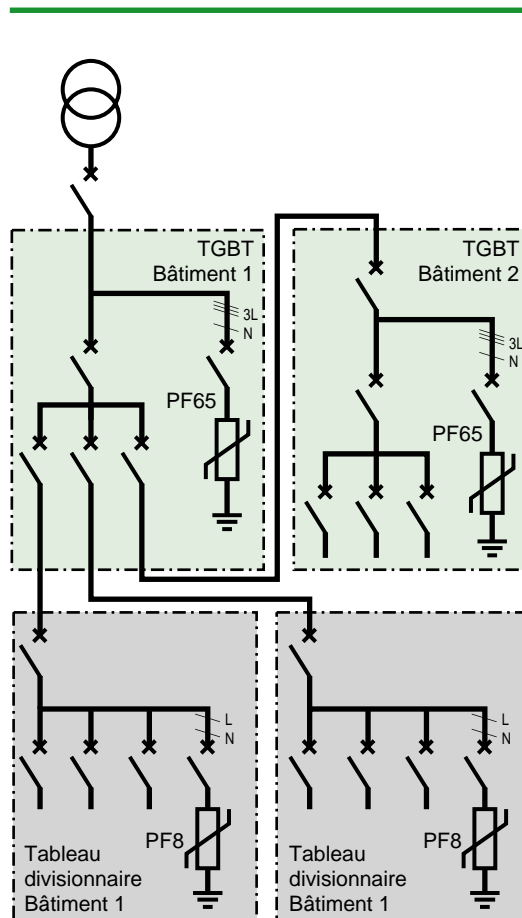


Fig. 19 : schéma d'installation en cascade de plusieurs parafoudres.



Fig. 20 : parafoudres basse tension (PF65 et PF8 de marque Merlin Gerin).

7 Conclusion

Des perturbations électriques peuvent prendre naissance dans le réseau du distributeur, l'installation de l'utilisateur perturbé ou dans l'installation d'un utilisateur voisin.

Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application : de l'inconfort à la perte de l'outil de production, voire même à la mise en danger des personnes.

La recherche d'une meilleure compétitivité des entreprises, la dérégulation du marché de l'énergie électrique font que la qualité de

l'électricité est devenu un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance, de gestion de sites tertiaires ou industriels ainsi que pour les constructeurs d'équipements.

Cependant, les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. Leur définition et leur mise en œuvre dans le respect des règles de l'art, ainsi que leur maintenance par des spécialistes permettent une qualité d'alimentation personnalisée adaptée aux besoins de l'utilisateur.

6 Bibliographie

Normes

- CEI 61000-X-X – Compatibilité électromagnétique (CEM) :
 - 2-1 : Environnement électromagnétique.
 - 2-2 : Niveaux de compatibilité (réseaux publics d'alimentation à basse tension).
 - 2-4 : Niveaux de compatibilité (installations industrielles basse tension et moyenne tension).
 - 2-5 : Classification des environnements électromagnétiques.
 - 3-2 : Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé ≥ 16 A).
 - 3-3 et 3-5 : Limitation des fluctuations de tension et du flicker dans les réseaux basse tension pour les courants appelés ≥ 16 A.
 - 3-6 : Evaluation des limites d'émission pour les charges déformantes raccordées au réseau MT et HT.
 - 3-7 : Evaluation des limites d'émission des charges fluctuantes sur les réseaux MT et HT.
 - 4-7 : Mesures d'harmoniques et d'interharmonique
 - 4-11 : Essais d'immunité aux creux de tension, coupures brèves et variations de tensions.
 - 4-12 : Essais d'immunité aux ondes oscillatoires.
 - 4-15 : Flickermètre.
- Autres normes et lois
 - European Union « Council Directive 85/374 on the approximation of the laws of the Member States relating to the liability for defective products », Official Journal (07.08.1985).
 - EN 50160 Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution (07-1994).
 - Application Guide to the European Standard EN 50160 on « Voltage Characteristics of Electricity by Public Distribution Systems » July 1995 -UNIPEDÉ.
 - IEEE Std 1159-1995 : Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.
 - IEEE Std 1000-1992: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment.
 - CEI 60071-1 : Coordination de l'isolement.
 - VEI 60050(161) : Vocabulaire Electrotechnique International.

Cahiers Techniques Schneider Electric

- Les dispositifs différentiels résiduels en BT. R. CALVAS, Cahier Technique n° 114.
- Les perturbations électriques en BT. R. CALVAS, Cahier Technique n° 141.
- La CEM : la compatibilité électromagnétique. F. VAILLANT, Cahier Technique n° 149.
- Surtensions et coordination de l'isolement. D. FULCHIRON, Cahier Technique n° 151.
- Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement. C. COLLOMBET, J.-M. LUPIN et J. SCHONEK, Cahier Technique n° 152.

- Onduleurs et harmoniques (cas des charges non linéaires). J.-N. FIORINA, Cahier Technique n° 159.
- Harmoniques en amont des redresseurs des ASI. J.-N. FIORINA, Cahier Technique n° 160.
- Permutation automatique des alimentations dans les réseaux HT et BT. G. THOMASSET, Cahier Technique n° 161.
- La conception des réseaux industriels en HT. G. THOMASSET, Cahier Technique n° 169.
- Les schémas des liaisons à la terre en BT (régimes du neutre) - B. LACROIX et R. CALVAS, Cahier Technique n° 172.
- Les schémas de liaison à la terre dans le monde et évolutions – B. LACROIX, R. CALVAS, Cahier Technique n° 173.
- Flicker ou scintillement des sources lumineuses. R. WIERDA, Cahier Technique n° 176.
- Perturbations des systèmes électroniques et schémas des liaisons à la terre. R. CALVAS, Cahier Technique n° 177.
- Le schéma IT (à neutre isolé) des liaisons à la terre en BT. F. JULLIEN, I. HERITIER, Cahier Technique n° 178.
- Surtensions et parafoudres en BT – coordination de l'isolement BT. Ch. SERAUDIE, Cahier Technique n° 179.
- Les disjoncteurs BT face aux courants harmoniques, impulsifs et cycliques. M. COLLOMBET, B. LACROIX, Cahier Technique n° 182.
- Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs. E. BETTEGA, J.-N. FIORINA, Cahier Technique n° 183.
- Coexistence courants forts-courants faibles. R. CALVAS, J. DELABALLE, Cahier Technique n° 187.
- Manœuvre et protection des batteries de condensateurs MT. D. KOCH, Cahier Technique n° 189.
- La ferrorésonance. Ph. FERRACCI, Cahier Technique n° 190.

Ouvrages divers

- Guide to quality of electrical supply for industrial installations Part 2 : voltage dips and short interruptions Working Group UIE Power Quality 1996.
- Guide de l'ingénierie électrique des réseaux internes d'usines Collection ELECTRA.
- Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks – Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs, June, 1918 - C.L. FORTESCUE .
- Supply Quality Issues at the Interphase between Power System and Industrial Consumers , PQA 1998, A. ROBERT.

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : (33) 04 76 57 98 60

Réalisation : AXESS - Saint-Péray (07).
Edition : Schneider Electric
Impression : Imprimerie du Pont de Claix - Claix - 1000.
- 100 FF-