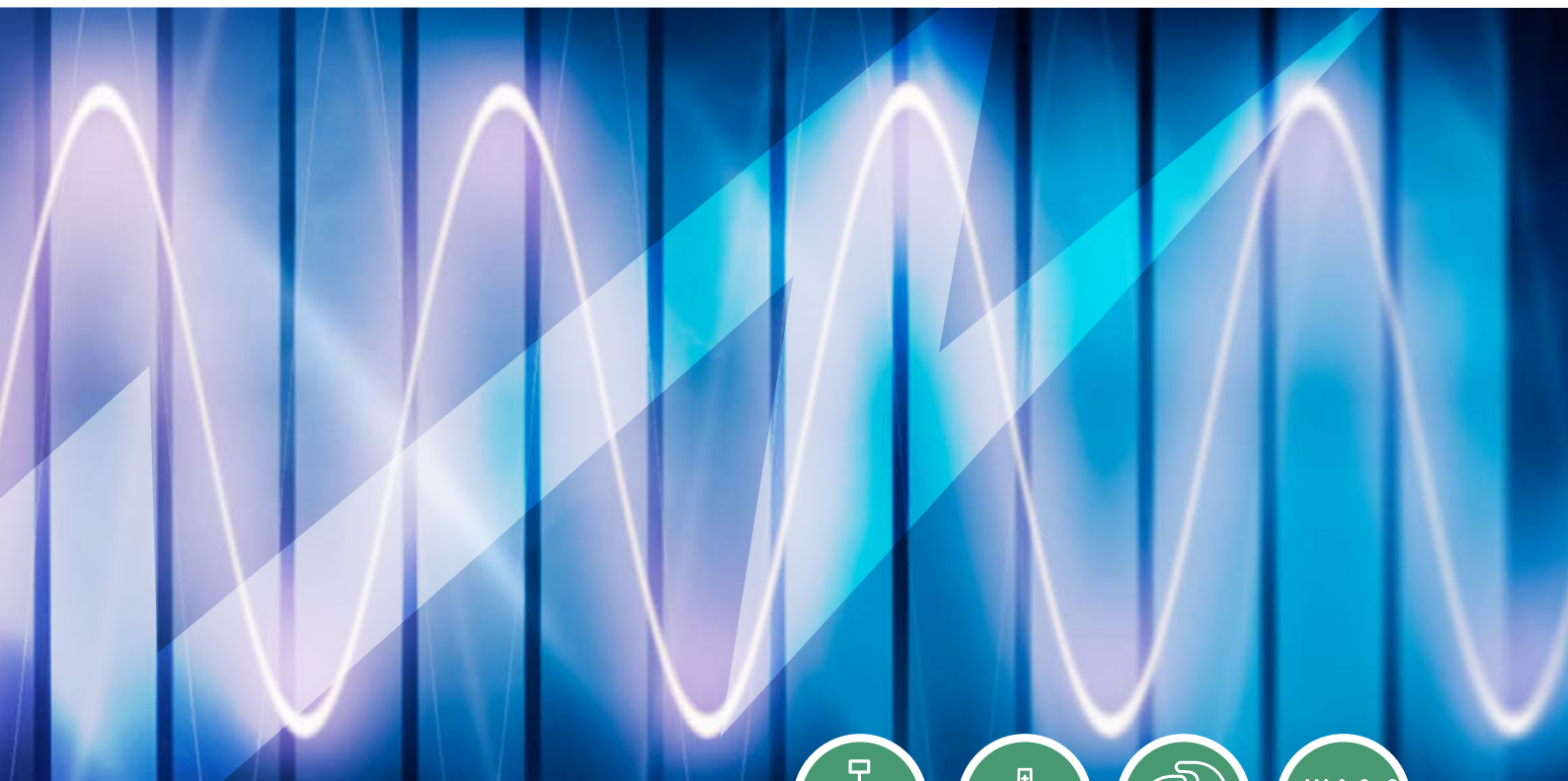




# LA COMPTABILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE **APERÇU DE LA QUALITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES**



Le Comité Technique 77 de l'AFSEC, ATC77  
Première édition

## Remerciements

Liste des auteurs du comité technique de l'AFSEC, TC 77 (ATC 77) ayant contribué au développement du guide de la CEM sur l'aperçu de la qualité des réseaux électriques :

1. Amevi **ACAKPOVI**  
Président – Ghana
2. Ade **OGUNSOLA**  
Ancien président & membre – Nigéria
3. Mai **ELHAFEZ**  
Secrétaire – Égypte
4. Sohair **FAKHRY**  
Membre – Égypte
5. Chijioke **OBIEKEZIE**  
Membre – Nigéria
6. Dominic **NYITAMEN**  
Membre – Nigéria
7. Thelela **MYAMBO**  
Membre – Afrique du Sud
8. Etienne **NTAGWIRUMUGARA**  
Membre – Rwanda
9. Bwanga **MBULA**  
Membre – Zambie
10. Michael **OGANGA**  
Membre – Kenya

# LA COMPTABILITÉ ÉLECTROMAGNÉTIQUE

## **APERÇU DE LA QUALITÉ DES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES**



# Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	<b>2</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>2 La comptabilité électromagnétique</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Sources de dégradation de la qualité de l'alimentation</b> .....	<b>10</b>
<b>4 Qualité de l'Énergie</b> .....	<b>12</b>
4.1 Classification de la qualité d'énergie .....	12
<b>5 Indices de fiabilité</b> .....	<b>20</b>
5.1 Indice de fréquence moyenne d'interruptions du système (SAIFI) .....	20
5.2 Indice de durée moyenne d'interruptions du système (SAIDI) .....	20
5.3 Indice de durée moyenne d'interruption par client (CAIDI) .....	21
5.4 Les indices et les valeurs de catégories internationales .....	21
<b>6 Sommaire</b> .....	<b>22</b>
<b>Références</b> .....	<b>24</b>

# 1 Introduction

La forme d'onde idéale du courant alternatif (CA) a deux caractéristiques importantes: (1) elle ne contient aucune composante harmonique outre sa fréquence fondamentale et (2) son amplitude est consistante sur une longue période. Une déviation par rapport à l'une de ces caractéristiques entraîne ce qu'on appelle un problème de qualité d'alimentation. Malheureusement, la forme idéale d'onde n'existe pas dans le monde réel. Les caractéristiques non linéaires de la plupart des équipements électriques et la commutation des charges entraînent la déformation des formes d'onde de tension et de courant. Des équipements, tels que les transformateurs et les moteurs, peuvent provoquer des distorsions en raison de la saturation de leurs noyaux magnétiques. Les convertisseurs électroniques de puissance peuvent également provoquer des distorsions dues à la commutation continue de leurs composants. La commutation cyclique de charge, comme celle de scieries et d'usines de concassage de pierres, peut provoquer des papillotements de tension. La surcharge des départs de distribution peut entraîner des problèmes de basse tension sur les sites de clients. La plupart des équipements et des dispositifs électriques tolèrent de petites distorsions dans les formes d'ondes du courant alternatif. Cependant, lorsque les distorsions sont suffisamment importantes pour affecter les équipements ou être perçues par le public comme des nuisances, il s'agit alors des problèmes de la qualité d'alimentation. Bien que l'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance modernes entraîne certains problèmes de qualité d'alimentation en raison de leurs actions de commutation, l'électronique de puissance peut également résoudre un grand nombre de ces problèmes.

Les systèmes d'alimentation des réseaux électriques s'occupent de la production, de la transmission, de la distribution et de l'utilisation d'électricité dans les établissements de clients. La fourniture d'une alimentation fiable, qui répond aux exigences nécessaires en termes de puissance, de tension et de fréquence, et la continuité d'alimentation, sont les préoccupations majeures de qualité et d'efficacité pour les consommateurs, car ces aspects peuvent affecter la durée de vie et le bon fonctionnement des dispositifs électroménagers. La multiplication de dispositifs électroménagers complexes, généra-

lement appelés charges non linéaires, contribue de manière significative à la génération d'harmoniques sur les réseaux de distribution d'électricité, pouvant ainsi entraîner une instabilité de tension et de courant. L'activation ou la désactivation du même type de dispositifs produit également des harmoniques et entraîne des papillotements et des fluctuations de puissance qui sont des questions relatives à la qualité.

Les principaux problèmes de la qualité d'alimentation sont relatifs à la tension et à la fréquence. Les problèmes de tension comprennent le papillotement de tension, les chutes de tension, les surtensions, les tensions parasites, les tensions transitoires et les coupures. Les problèmes de fréquence incluent les distorsions harmoniques et les variations de fréquence. Les interférences électromagnétiques, qu'elles proviennent de circuits alimentés à proximité ou d'éruptions solaires, sont également considérées comme des problèmes de qualité de l'alimentation.

La qualité de l'électricité fournie aux clients dans un système d'alimentation demeure l'un des plus importants sujets d'étude dans le domaine de l'énergie, car une faible qualité d'énergie électrique peut affecter négativement le fonctionnement et la durée de vie des équipements électriques formant le réseau d'énergie électrique, par exemple, les transformateurs d'énergie et les équipements du client. Les fournisseurs et les clients ont de différents points de vue sur le niveau de qualité à atteindre ainsi que sur la responsabilité de la dégradation de la qualité des réseaux électriques d'alimentation.

Ce guide présente un aperçu de la qualité d'énergie du point de vue de la compatibilité électromagnétique et décrit les paramètres importants de qualité d'énergie pris en compte et contrôlés dans l'industrie de l'énergie. Le guide présente en outre un résumé des normes CEI traitant les problèmes de qualité d'énergie et cela est très bénéfique pour les fournisseurs d'électricité, afin d'assurer une bonne qualité de prestation de service. Enfin, le guide a, également, présenté les paramètres essentiels de fiabilité et leur méthode d'estimation pour les réseaux électriques avec des exemples substantiels.

## 2 La comptabilité électromagnétique

Tout phénomène électromagnétique susceptible de créer des troubles de fonctionnement d'un dispositif, d'un appareil ou d'un système, ou d'affecter défavorablement la matière vivante ou inerte est considéré comme une perturbation électromagnétique. Les performances d'équipements et des systèmes peuvent être affectées négativement par les perturbations électromagnétiques et, à l'inverse, tout équipement électrotechnique est lui-même une source potentielle de perturbations électromagnétiques. Les perturbations causent des problèmes indésirables, par conséquent, l'objectif clé de l'ingénierie de la compatibilité électromagnétique (CEM) est d'éviter les interférences électromagnétiques (EMI). En ce sens, il est possible de considérer la «qualité des réseaux électriques» comme un sous-ensemble spéciale de la compatibilité électromagnétique (CEM), limité au domaine des phénomènes conduits à basse fréquence.

La CEM est définie comme l'aptitude d'un équipement ou d'un système à fonctionner comme prévu dans son environnement électromagnétique sans affecter le bon fonctionnement des équipements à proximité. La CEM implique alors ce qui suit:

- Le besoin de s'assurer que les perturbations électromagnétiques d'un système électrique ne dépassent pas un niveau permettant aux appareils de radio et de télécommunication et aux autres appareils de fonctionner tel que prévu ;
- Le besoin de s'assurer que le système électrique a un niveau adéquat d'immunité intrinsèque contre les perturbations électromagnétiques leur permettant de fonctionner tel que prévu ;

La performance fiable et à l'abri de tout incident équivaut généralement à une alimentation électrique de haute qualité. Cependant, la performance des équipements dépend autant de leur immunité contre les perturbations d'alimentation que de leurs caractéristiques réelles d'alimentation. Il est de plus en plus nécessaire d'assurer la compatibilité du service électrique entre le dispositif de l'utilisateur final et le système d'alimentation du dispositif. Par ailleurs, les caractéristiques d'alimentation seront influencées par la «qualité» de la charge qui y est connectée.

Dans le réseau électrique, les perturbations électromagnétiques se produisent inévitablement et il existe donc un certain chevauchement entre les niveaux d'émission et d'immunité. Les caractéristiques de tension peuvent être égales ou supérieures au niveau de compatibilité. Les niveaux de planification peuvent également être égaux ou inférieurs au niveau de compatibilité - les niveaux de planification sont définis par le propriétaire du réseau. Les niveaux d'essai d'immunité sont définis par de normes pertinentes ou sont convenus entre les fabricants et les utilisateurs.

Le tableau 1 détaille les normes de qualité de l'énergie électrique publiées par des organismes de normalisation, tels que la Commission électrotechnique internationale (CEI) et l'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens (IEEE).

Numéro de la norme	Titre de la norme
IEC 62510	Normalisation des caractéristiques d'électricité
EN 50160	Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution
IEC 61000-2-2	Compatibilité électromagnétique (CEM). Environnement. Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension
IEC. 61000-3-2	Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils $\leq 16$ A par phase)
IEC 61000-3-3	Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension, pour les équipements ayant un courant nominal $\leq 16$ A par phase et non soumis à un raccordement conditionnel
IEC 61000-3-4	Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux d'alimentation basse tension pour les équipements ayant un courant nominal supérieur à 16 A
IEC 61000-3-5	Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limitation des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant nominal supérieur à 75 A
IEC 61000-3-6	Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Évaluation des limites d'émission pour les installations déformantes raccordées aux réseaux électriques MT, HT et THT
IEC 61000-3-7	Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Évaluation des limites d'émission pour les installations fluctuantes raccordées aux réseaux électriques MT, HT et THT
IEC 61000-4-1	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Vue d'ensemble de la série d'IEC 61000-4
IEC 61000-4-2	Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure. Essais d'immunité aux décharges électrostatiques
IEC 61000-4-3	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques
IEC 61000-4-4	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salves
IEC 61000-4-5	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essai d'immunité aux ondes de choc
IEC 61000-4-6	Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-6. Techniques d'essai et de mesure. Immunité aux perturbations conduites, induites par les champs radioélectriques
IEC 61000-4-7	Compatibilité électromagnétique (CEM). Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'inter-harmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés
IEC 61000-4-11	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essais d'immunité aux creux de tensions, coupures brèves et variations de tension pour les appareils à courant d'entrée inférieur ou égal à 16 A par phase



Numéro de la norme	Titre de la norme
IEC 61000-4-15	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Flickermètre. Spécifications fonctionnelles et de conception. Publication fondamentale en CEM
IEC 61000-4-30	Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Méthodes de mesure de la qualité de l'alimentation
Norme IEEE-120	Guide principal d'essais pour les mesures électriques dans les circuits électriques
Norme IEEE-141	Pratique recommandée à l'égard de la distribution d'énergie électrique pour les installations industrielles avec effet de perturbations de tension sur les équipements dans une zone industrielle
Norme IEEE-142	Pratique recommandée pour la mise à la terre des réseaux électriques industriels et commerciaux
Norme IEEE-213	Procédure standard pour la mesure des émissions conduites dans la plage de 300 kHz à 25 MHz des récepteurs de télévision et de radiodiffusion FM aux lignes d'alimentation
Norme IEEE-241	Pratique recommandée pour les systèmes d'alimentation électrique dans les bâtiments commerciaux
Norme IEEE-449	Norme pour les régulateurs de tension à ferro-résonance
Norme IEEE-465	Spécifications d'essai pour les parafoudres
Norme IEEE-519	Pratique recommandée pour le contrôle des harmoniques et la compensation réactive des convertisseurs statiques électroniques
Norme IEEE-859	Termes standard pour le reportage et l'analyse des occurrences d'indisponibilité et états de panne des installations de transport d'électricité
Norme IEEE-1159	Pratique recommandée pour la surveillance de la qualité des réseaux électriques d'alimentation. Catégories de phénomènes électromagnétiques des réseaux électriques
Norme IEEE-1250	Guides de service pour les équipements sensibles aux perturbations momentanées de tension
Norme IEEE-1346	Pratique recommandée pour évaluer la compatibilité des réseaux électriques d'alimentation avec les équipements électroniques
Norme IEEE-1453	Pratique recommandée pour l'analyse des installations fluctuantes sur les réseaux d'alimentation

Tableau 1: Normes de qualité de l'alimentation

### 3 Sources de dégradation de la qualité de l'alimentation

Le terme «qualité de l'alimentation» fait référence au maintien d'une forme d'onde quasi sinusoïdale de tension et de courant des réseaux de distribution à la fréquence et à l'amplitude nominales. En CEM, le terme se réfère à une grande variété de phénomènes électromagné-

tiques qui caractérisent la tension et le courant à un moment et à un emplacement sur le réseau d'alimentation. L'IEC 61000-2-5 [9] classe les phénomènes électromagnétiques en plusieurs groupes, tel qu'indiqué dans le tableau 2.

Harmoniques, Inter-harmoniques	
Systèmes de signalisation (courant porteur en ligne)	
Fluctuations de tension	
Creux et interruptions de tension	
Déséquilibre de tension	<b>Phénomène conduit à basse fréquence</b>
Variations de fréquence d'alimentation	
Tensions induites à basse fréquence	
Courant direct (CD) dans des réseaux à courant alternatif (CA)	
Champs magnétiques	<b>Phénomènes rayonnés à basse fréquence</b>
Champs électriques	
Onde continue de tension induite	
Transitoires unidirectionnels	<b>Phénomène conduit à haute fréquence</b>
Transitoires oscillatoires	
Champs magnétiques	
Champs électriques	
Champs électromagnétiques	<b>Phénomènes rayonnés à haute fréquence</b>
Ondes continues	
Transitoires	
Impulsion électromagnétique nucléaire	
Décharge électrostatique	<b>Décharge électrostatique</b>
Impulsion électromagnétique nucléaire	<b>Impulsion électromagnétique nucléaire</b>

Tableau 2: Les phénomènes principaux provoquant des perturbations électromagnétiques

La qualité de l'énergie est relative aux phénomènes conduits et peut être divisée en trois grandes catégories, à savoir:

1. Les perturbations
2. Les phénomènes en régime permanent (perturbations de longue durée)
3. La continuité (coupure)

Il convient de noter que le phénomène en régime permanent est référencé dans le sens stochastique, c.-à-d. il fournit des informations sur le fonctionnement normal du système.

Les sources de mauvaise qualité de l'énergie peuvent être classées en deux groupes: (1) les charges actuelles, les dispositifs et les composants et (2) les sous-systèmes des systèmes de transmission et de distribution. Une mauvaise qualité est normalement causée par les perturbations de la ligne électrique telles que les impulsions, le Notching, les creux de tension et les surtensions, les déséquilibres de tension et de courant, les interruptions momentanées et les distorsions harmoniques. La classification de la qualité de l'énergie par la CEI (et l'IEEE) inclut la perte d'équilibre comme une source de perturbation. Les autres principaux contributeurs à la mauvaise qualité de l'énergie sont les harmoniques et la puissance réactive. Le contrôle à semi-conducteurs de l'alimentation Courant Alternatif (CA) à l'aide de commutateurs haute vitesse est la principale source d'harmoniques, lorsque les différentes charges non-linéaires contribuent à une consommation excessive de puissance réactive. Cela entraîne des conséquences catastrophiques telles que de longs temps d'arrêt de production, un dysfonctionnement des dispositifs et une durée de vie réduite des équipements.

Alors que la fiabilité de l'alimentation électrique, la qualité du service et les questions de qualité de l'alimentation sont généralement abordées sous le thème de la qualité d'énergie, il suffit généralement de distinguer entre: la «qualité de la tension» et la «continuité de l'alimentation».

La qualité de la tension, autrement appelée «la qualité de puissance» (PQ), se rapporte aux caractéristiques techniques de l'électricité, en un point donné sur un système électrique, évaluées par rapport à un ensemble de paramètres techniques de référence [26]. Dans ce terme, les écarts de tension (ou du courant) par rapport aux conditions idéales sont analysés, tout en considérant l'électricité comme une onde sinusoïdale à fréquence unique d'amplitude et de fréquence constantes. La continuité d'alimentation s'intéresse à la probabilité du fonctionnement satisfaisant d'un système électrique sur le long terme. Elle dénote l'aptitude de fournir un service électrique adéquat, presque en permanence, avec peu d'interruptions sur une longue période de temps. Cela est couvert par des indices de fiabilité ; les trois plus courants sont dénommés SAIFI (indice de durée moyenne d'interruption du système), SAIDI (indice de fréquence moyenne d'interruption du système) et CAIDI (indice de durée moyenne d'interruption par client), définis dans [39].

La faible qualité d'énergie affecte la croissance économique et l'industrialisation des États membres de l'AFSEC. Alors que les ingénieurs ont tendance à considérer les réseaux électriques de façon technique à travers l'analyse de la planification et du fonctionnement, le consommateur est plus préoccupé par la qualité de l'énergie, la sécurité et la continuité de l'alimentation. Ce guide de l'AFSEC fournit donc des directives sur la manière d'assurer une qualité d'énergie fiable pour les consommateurs et les fournisseurs de services au sein des États membres.

## 4 Qualité de l'Énergie

La qualité de l'énergie électrique décrit la variation de la tension, du courant et de la fréquence dans un système électrique. Le concept fondamental de la qualité de l'énergie est d'identifier les paramètres et leur degré de variation par rapport à leur amplitude nominale qui sont à la raison principale de la dégradation de qualité de l'énergie électrique. Les sources de problèmes de la qualité d'énergie sont les régions, les emplacements ou les événements susceptibles de provoquer des variations indésirables de ces paramètres. Les effets d'une mauvaise qualité d'énergie sont les effets que subissent le système et les dispositifs du consommateur après la survenue des perturbations. Grâce à la modélisation et à l'analyse, des tentatives sont prises pour configurer les perturbations, leur survenue, leurs sources et leurs effets; principalement basées sur un contexte mathématique. Pour surveiller la qualité de l'énergie, la mesure et la supervision constantes des paramètres électriques sont nécessaires. La solution globale, c.-à-d. l'approvisionnement d'énergie pure au consommateur, est pratiquement impossible. L'objectif est de minimiser la probabilité de survenue des perturbations et de réduire les effets de problèmes de la qualité d'énergie.

### 4.1 Classification de la qualité d'énergie

Les problèmes de la qualité d'énergie se produisent en raison de divers types de perturbations électriques. La plupart des perturbations dépendent de l'amplitude ou de la fréquence ou des deux à la fois. En fonction de la durée des perturbations de la qualité d'énergie électrique, les événements peuvent être divisés en types court, moyen ou long. Il existe différentes classifications

pour les problèmes de la qualité d'énergie électrique, chacune utilisant une propriété spécifique pour catégoriser le problème. Certaines d'entre elles classifient les événements en «régime permanent» et «régime non permanent». Dans certains règlements (par exemple, l'Institut National de Normalisation Américain ANSI C84.1 [41]), le facteur le plus important est la durée de l'événement. D'autres directives (par exemple, Norme IEEE-519 [34]) utilisent la forme d'onde (durée et amplitude) de chaque événement pour classifier les problèmes de qualité d'énergie électrique. D'autres normes (par exemple, la CEI) utilisent la gamme de fréquences de l'événement pour la classification.

Par exemple, l'IEC 61000-2-5 [9] utilise la gamme de fréquence et divise les problèmes en trois catégories principales: basse fréquence (< 9 kHz), haute fréquence (> 9 kHz) et phénomènes de décharges électrostatiques. De plus, chaque gamme de fréquences est divisée en perturbations «rayonnées» et «conduites». Le tableau 2 présente les principaux phénomènes provoquant des perturbations électromagnétiques selon les classifications de la CEI. Tous ces phénomènes sont considérés comme des problèmes de qualité d'énergie électrique; cependant, les deux catégories conduites sont plus fréquemment abordées par l'industrie.

L'ampleur et la durée des événements peuvent être utilisées pour classifier les événements de qualité d'énergie électrique, tel que montré dans la figure 1. Dans le graphique d'amplitude-durée, il y a neuf sections différentes [5]. Les différentes normes donnent des noms différents aux événements dans ces sections. L'amplitude de la tension est divisée en trois parties:

Durée de l'événement					
Ampleur de l'événement	Surtension très courte	Surtension courte	Surtension longue	Surtension très longue	110%
	Tension en fonctionnement normal				
	Sous-tension très courte	Sous-tension courte	Sous-tension longue	Sous-tension très longue	90%
		1-3 cycles	1-3 minutes	1-3 heures	

Figure 1: Classification des événements de la qualité d'énergie électrique dans un graphique d'amplitude-durée

- Coupure: l'amplitude de la tension est égale à zéro
- Sous-tension: l'amplitude de la tension est inférieure à sa valeur nominale
- Surtension: l'amplitude de la tension est supérieure à sa valeur nominale

La durée de ces événements est divisée en quatre sections: très courte, courte, longue et très longue. Compte tenu de ce qui précède, une brève description des perturbations, survenant sur les réseaux d'alimentation et provoquant une dégradation de la qualité d'énergie électrique, est présentée ci-dessous:

- La coupure: ce sont des types de perturbations très courants. Pendant une coupure de courant, le niveau de tension d'un bus particulier tombe à zéro. Les interruptions peuvent se produire pour une courte ou moyenne ou longue période. L'interruption se produit lorsque la tension d'alimentation (ou le courant de charge) diminue à moins de 0,1 pu pendant moins d'une minute, tel que montré dans la figure 2. Certaines interruptions peuvent être le résultat de pannes d'équipement, de dysfonctionnement du contrôle, de fusibles fondus ou de l'ouverture du disjoncteur. La différence entre la coupure longue (ou continue) et la coupure brève est que l'alimentation est rétablie manuellement dans le premier cas, tandis que l'alimentation est rétablie automatiquement dans le deuxième cas. La coupure est généralement mesurée par sa durée. Par exemple, selon la norme européenne EN-50160 [7]:

- Une coupure brève dure jusqu'à 3 minutes; et
- Une coupure longue dure plus de 3 minutes.

Cependant, selon la norme IEEE-1250 [37]:

- Une interruption instantanée est comprise entre 0,5 et 30 cycles;
- Une interruption momentanée est comprise entre 30 cycles et 2 secondes;

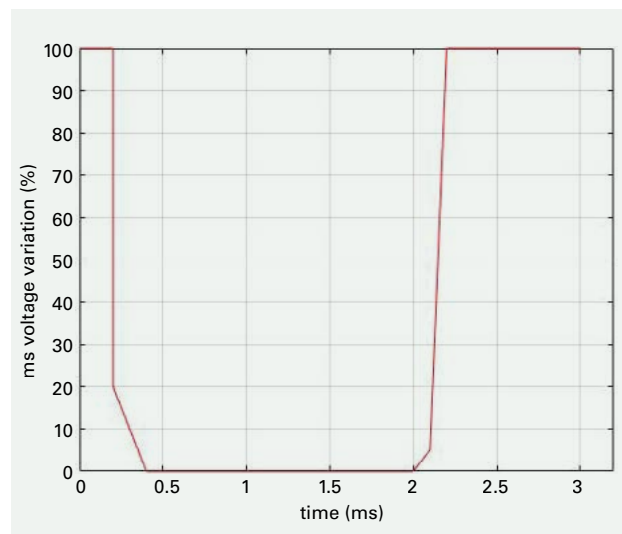


Figure 2: Interruption momentanée due à défaut

- Une interruption temporaire est comprise entre 2 secondes et 2 minutes; et
- Une interruption continue dure plus de 2 minutes.
- Interruption prolongée: une interruption prolongée (ou longue) est l'événement de la qualité d'alimentation le plus grave et le plus ancien au cours duquel la tension tombe à zéro et ne revient pas automatiquement. Selon la définition de la CEI, la durée d'interruption prolongée est plus de 3 minutes, tandis que selon la définition de l'IEEE, la durée est d'une minute. Le nombre et la durée des longues interruptions sont des caractéristiques très importantes pour mesurer l'aptitude d'un système électrique à fournir le service aux clients. Les principales raisons d'interruptions prolongées sont:
  - l'apparition d'un défaut dans une partie des systèmes électriques sans redondance ou avec la partie redondante hors service,
  - une intervention incorrecte d'un relais de protection entraînant un arrêt d'un composant, ou
  - une interruption programmée (ou planifiée) d'un réseau basse tension sans redondance.

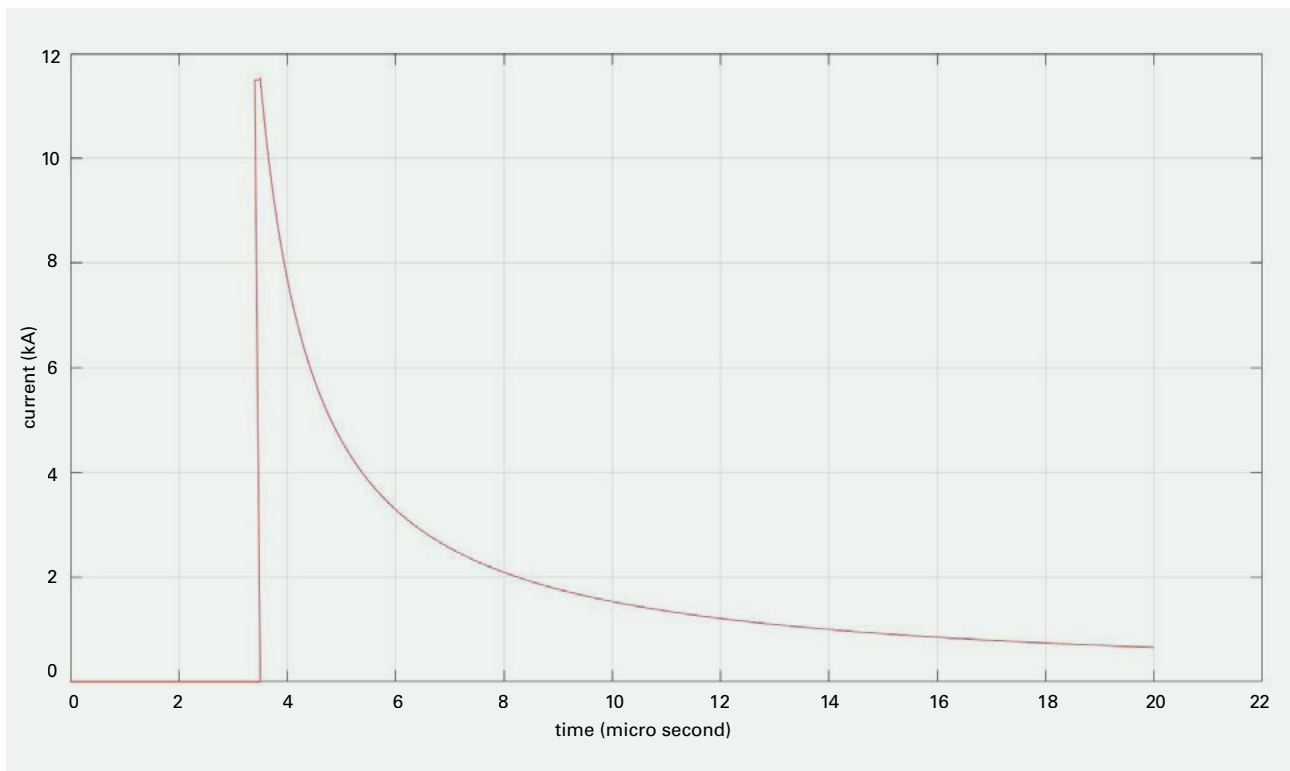


Figure 3: Transitoire impulsive provoqué par un coup de foudre

- **Sous-tension/surtension:** la sous-tension et la surtension sont une diminution et une augmentation des niveaux de tension d'un bus particulier par rapport à la tension de bus standard. Parfois, les sous-tensions et les surtensions de faible pourcentage sont autorisées; mais lorsqu'ils dépassent la limite du niveau de tension souhaité, ils sont traités comme des perturbations. De telles perturbations augmentent la quantité de puissance réactive prélevée ou fournie par un système, les problèmes d'isolation et la stabilité de tension. La condition de sous-tension se produit lorsque la tension efficace diminue à 0,8–0,9 pu pendant plus d'une minute et la surtension est définie comme une augmentation de la tension efficace à 1,1–1,2 pu pendant plus d'une minute. Il existe trois types de surtensions:
  - Des surtensions générées par un défaut d'isolement, une ferro-résonance, de défauts au niveau du régulateur de l'alternateur, du changeur de prises d'un transformateur ou d'une surcompensation ;
  - Des surtensions de foudre; et
  - Des surtensions de commutation produites par des modifications rapides de la structure du réseau, telles que l'opération des dispositifs de protection ou la mise en marche de circuits capacitifs.
- **Transitoires :** les signaux transitoires du système d'alimentation électrique sont des événements indésirables et de durée rapide et courte qui produisent des distorsions. Leurs caractéristiques et leurs formes d'onde dépendent du mécanisme de génération et des paramètres du réseau (par exemple, la résistance, l'inductance et la capacité) au point d'intérêt. Les «perturbations conduites» sont souvent considérées comme synonyme de perturbations transitoires. Les transitoires peuvent être classés selon leurs nombreuses composantes caractéristiques telles que l'amplitude, la durée, le temps de croissance, la fréquence de polarité, la capacité de fourniture d'énergie, la densité spectrale d'amplitude et la fréquence de survenue. Les transitoires sont généralement classés en deux catégories: impulsif et oscillatoire. Un signal transitoire impulsif est un changement brusque de la tension, du courant ou des deux par rapport aux conditions nominales. Il est de polarité unidirectionnel (Figure 3). La cause la plus fréquente des transitions impulsifs est la foudre. Les signaux transitoires impulsifs peuvent exciter la fréquence propre du système d'alimentation. Un transitoire oscillatoire est un changement brusque de la tension, du courant ou des deux par rapport aux conditions nominales. Il comprend à la fois des valeurs positives et négatives de polarité. Les signaux transitoires oscillatoires se produisent pour différentes raisons dans les

systèmes d'alimentation, tels que la commutation des dispositifs, la commutation de batteries de condensateurs, les dispositifs de protection contre les surintensités à action rapide et la Ferro-résonance.

- Déséquilibre de tension/courant : un déséquilibre de tension et de courant peut se produire en raison d'un déséquilibre au niveau du système de production ou de transmission des réseaux électriques et aussi d'une charge déséquilibrée. Lors d'un déséquilibre, des composantes de séquence négatives apparaissent. Cela entrave les performances du système et peut affecter la stabilité de tension en certains cas.
- Harmoniques: les harmoniques sont des composantes alternatives ayant des fréquences autres que celle de la fondamentale présente dans les signaux de tension ou de courant. Les harmoniques ont des effets négatifs sur le système de production, de transmission et de distribution ainsi que sur les dispositifs de clients. Avec une fréquence fondamentale de 50 Hz (ou 60 Hz), les harmoniques sont de fréquences  $50n$  Hz (où  $n$  est un nombre entier). La série de Fourier nous informe que tout signal périodique peut-être décomposé en une combinaison linéaire de plusieurs composants sinusoïdaux et de courant continu. Les amplitudes relatives et les phases d'harmoniques déterminent la forme des signaux périodiques. Pour évaluer le degré des signaux sinusoïdaux, la distorsion harmonique totale (THD) est utilisée. La distorsion harmonique totale (THD) est la racine carrée de la somme des carrés d'harmoniques et de la composante fondamentale. Les harmoniques sont classées en harmoniques entiers, sous-harmoniques et inter-harmoniques. Les harmoniques entiers et les inter-harmoniques sont les plus courants dans le système d'alimentation. Les harmoniques sont également classés en termes de temps et d'espace.
  - Harmoniques entiers: les harmoniques entiers ont des fréquences qui sont de multiples entiers de la fréquence de la fondamentale.
  - Sous-harmoniques: les sous-harmoniques ont des fréquences inférieures
    - à la fréquence de la fondamentale. Il y a rarement de sous-harmoniques dans les réseaux d'alimentation. Cependant, en raison du contrôle rapide des alimentations électroniques des ordinateurs, les inter-harmoniques et les sous-harmoniques sont générés dans le courant d'entrée [42]. La résonance entre les courants ou les tensions harmoniques avec la capacité et l'inductance du système d'alimentation (série) peut provoquer de sous-harmoniques, appelés résonance sous-synchrone [43]. Ils peuvent être générés lorsqu'un système est hautement inductif (comme un four à arc lors du démarrage) ou lorsque le système d'alimentation contient de grandes batteries de condensateurs pour la correction du facteur de puissance ou le filtrage.
  - Inter-harmoniques : les fréquences d'inter-harmoniques ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de la fondamentale. Les inter-harmoniques apparaissent comme des fréquences discrètes ou comme un spectre de bande. Les principales sources de formes d'onde inter-harmoniques sont les convertisseurs statiques de fréquence, les cyclo-convertisseurs, les moteurs à induction, les dispositifs à arc et les ordinateurs. Les inter-harmoniques provoquent de papillotement, de couples à basse fréquence, une élévation supplémentaire de température dans les machines à induction et un dysfonctionnement des relais de protection (sous-fréquence). Les inter-harmoniques sont abordées dans un certain nombre de normes internationales telles que l'IEC 61000-4-7 [23] et l'IEEE-519 [34].
- Chute de tension: les chutes, également appelées creux, sont une diminution de la tension efficace pour une courte durée entre 0,1 et 0,9 pu. Les chutes de tension sont provoquées par:
  - Activation de charges importantes;
  - Démarrage de gros moteurs à induction;
  - Ligne-terre crête du réseau; et
  - Transfert de charge d'une source d'alimentation à une autre.

Les creux sont les principales raisons de dysfonctionnement des dispositifs électriques à basse tension. L'alimentation sans interruption (ASI) ou les conditionneurs d'alimentation sont principalement utilisés pour éviter les chutes de tension.

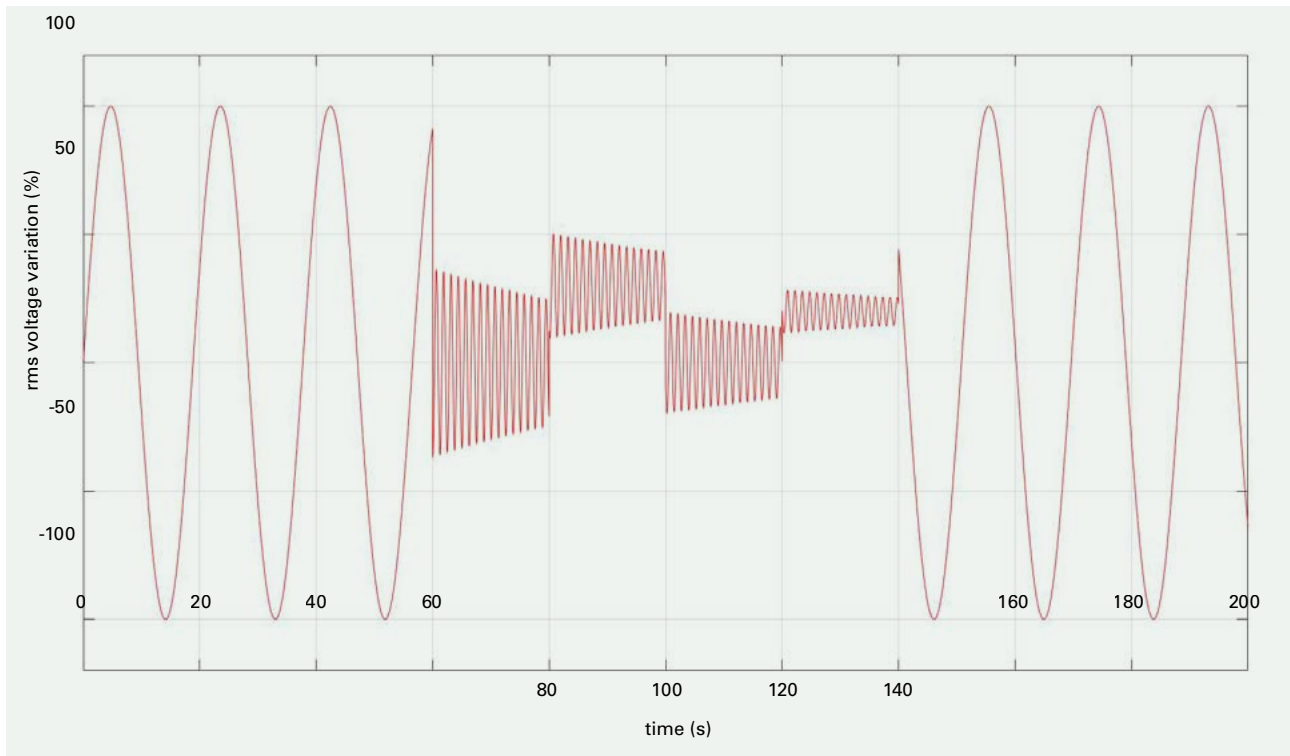


Figure 4: Chute de tension provoquée par un défaut de ligne unique à la terre

- Le Notching: le Notching est une perturbation périodique de la tension provoquée par le fonctionnement normal des dispositifs d'électroniques de puissance lorsque le courant est commuté d'une phase à une autre. Il peut être considéré à la fois comme un phénomène transitoire et une distorsion harmonique. Puisque le Notching se produit en continu (en régime permanent), il peut être caractérisé par le spectre harmonique de la tension affectée.



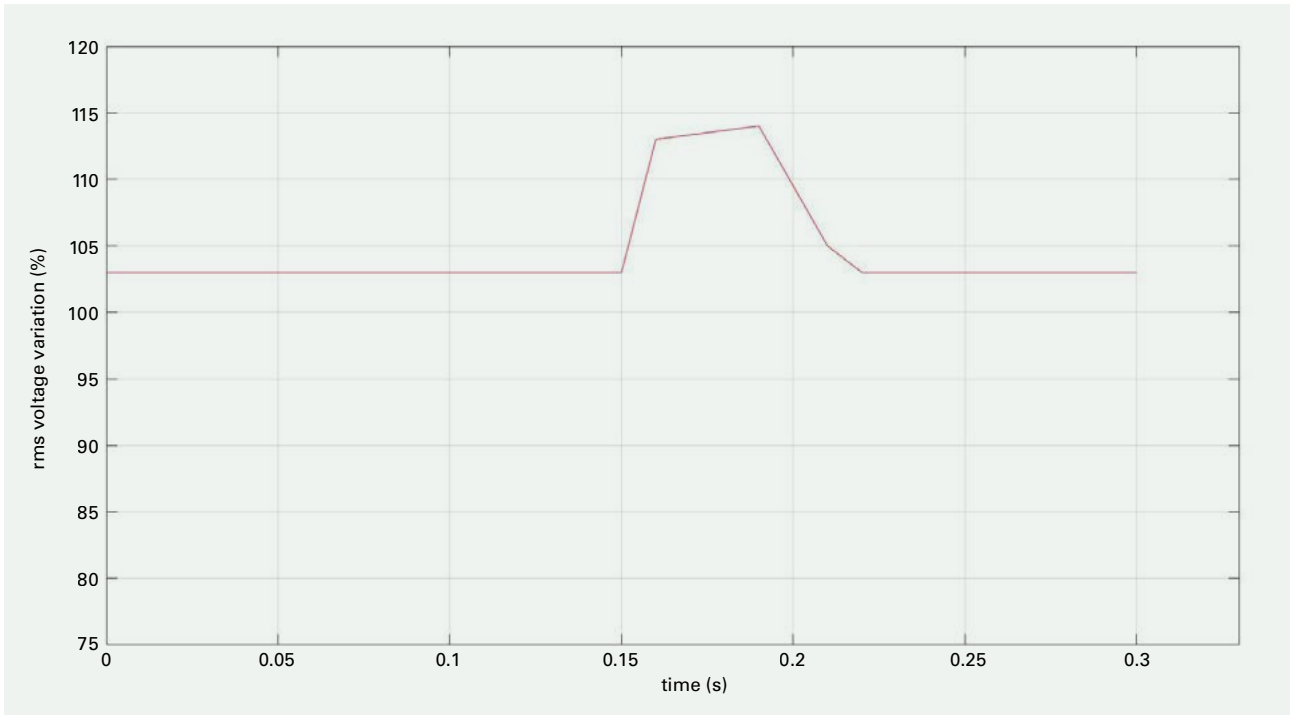


Figure 5: Exemples de Notching

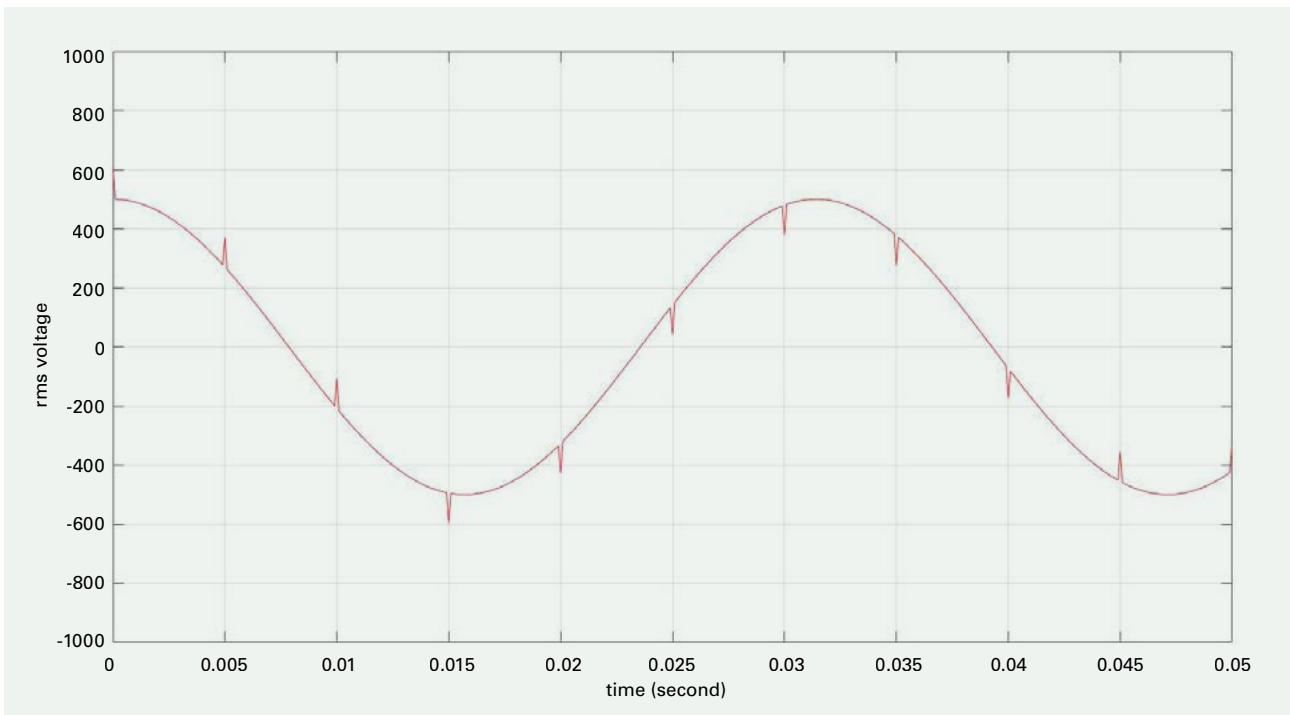


Figure 6: Surtension provoqué par un défaut de ligne-terre

- Surtension: les surtensions sont une augmentation de courte durée de la tension efficace entre 1,1 et 1,8 pu. Les surtensions sont provoquées par:
  - Arrêt d'une charge importante;
  - Activation d'une batterie de condensateurs; ou
  - Augmentation de la tension des phases sans défaut lors d'un défaut ligne-terre.
- Fluctuation de la tension : les fluctuations de tension sont des variations systématiques de l'enveloppe de tension ou une série de variations aléatoires de la tension dont l'amplitude ne dépasse normalement pas les marges de tension spécifiées :
  - Variations de tension par échelons, à temps régulier ou irrégulier; et
  - Variations de tension cycliques ou aléatoires produites par des variations d'impédances de charge.

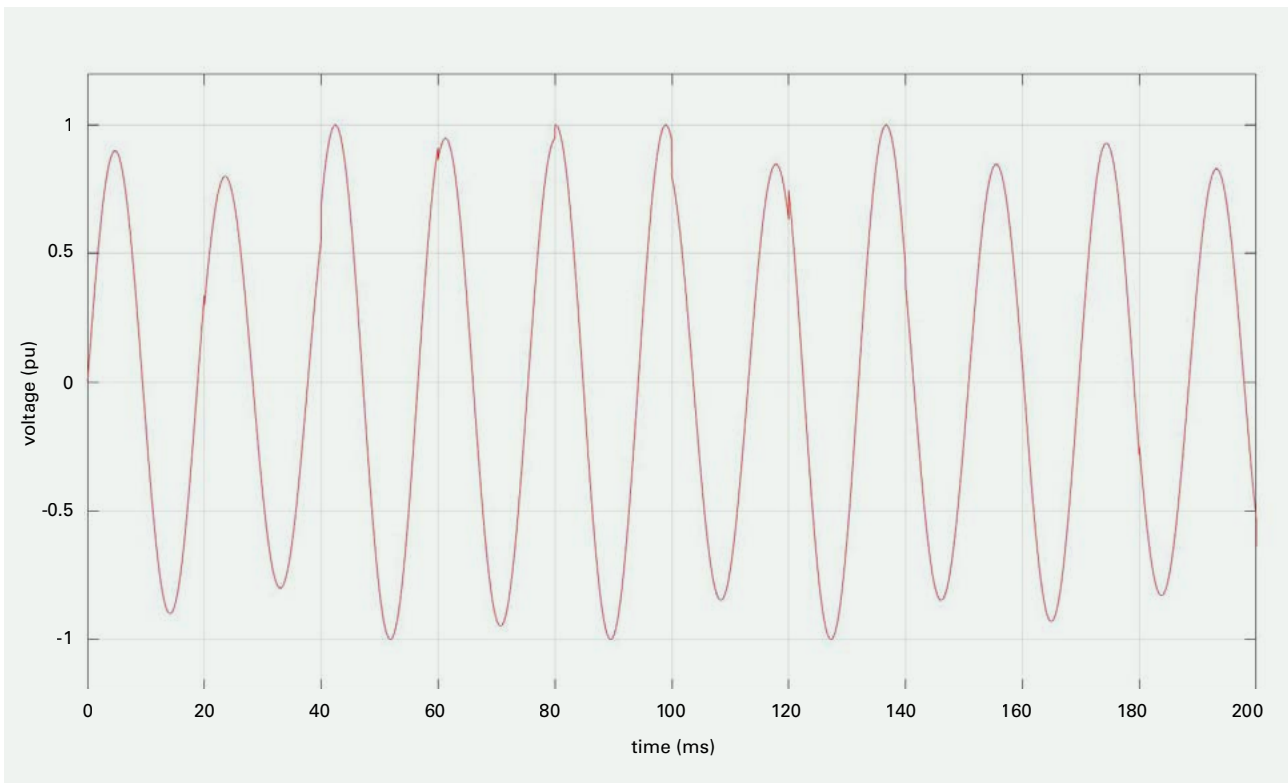


Figure 7: Voltage flicker caused by arc furnace operation

Les fluctuations de tension diminuent la performance de dispositifs et entraînent une instabilité de tensions et de courants internes des dispositifs électroniques. Cependant, les fluctuations de tension de moins de 10% n'affectent pas les dispositifs électroniques. Les principales raisons des fluctuations de tension sont la sortie pulsée de puissance, les machines à souder par résistance, le démarrage de conducteurs, les fours à arc, les conducteurs avec de charges rapidement changeantes et les laminoirs.

- Flicker (papillotement): le terme Flicker est dérivé de l'impact de fluctuation de la tension sur les lampes de sorte qu'elles sont perçues par l'œil humain comme des papillotements. Cela peut être provoqué par un four à arc qui est une des raisons les plus courantes de fluctuations de tension dans les réseaux de transmissions et distribution publiques.
- Variations de la fréquence d'alimentation : l'écart de la fréquence fondamentale du système d'alimentation, par rapport à sa valeur nominale spécifiée, est défini comme une variation de fréquence d'alimentation. Si l'équilibre entre la production et la demande (charge) n'est pas maintenu, la fréquence du système électrique s'écartera en raison des changements de vitesse de rotation des générateurs électromécaniques. Le degré et la durée du décalage de la fréquence dépendent des caractéristiques de la charge et de la réponse du système de contrôle de la production aux changements de charge. Les défauts du système de transmission d'électricité peuvent également utiliser les variations de fréquence en dehors de la plage acceptée pour les opérations normales en régime permanent hors du système d'alimentation.

## 5 Indices de fiabilité

Les coupures d'électricité perturbent plus le monde d'affaires que tout autre secteur. En général, la fiabilité est la possibilité qu'un système puisse fonctionner comme prévu pendant une certaine période de temps. La fiabilité de la distribution peut être exprimée comme la fréquence à laquelle le système subit une panne générale d'électricité, la durée de la panne et le temps nécessaire pour la régler. Le système à haute fiabilité sera capable de fournir l'énergie électrique requise à tout moment, tandis que le système à faible fiabilité entraînera de pannes d'électricité fréquentes. Les statistiques de fiabilité, basées sur les interruptions de longue durée, sont la principale référence utilisée par les distributeurs d'énergie et les régulateurs pour identifier la qualité du service. Les défauts sur le réseau de distribution provoquent la plupart des interruptions de longue durée; un fusible, un disjoncteur, un réenclencheur ou un sectionneur verrouillant la section en défaut.

De nombreux distributeurs d'énergie utilisent les indices de fiabilité pour suivre la performance des réseaux de distribution, d'une zone ou d'un circuit. Les régulateurs exigent que la plupart des réseaux de distribution appartenant aux investisseurs déclarent leurs indices de fiabilité. La tendance réglementaire s'oriente vers des taux basés sur la performance où la performance est pénalisée ou récompensée en fonction de l'évaluation quantitative par des indices de fiabilité. Certains réseaux de distribution paient également des bonus aux gestionnaires ou aux autres basés en partie sur les indices. Certains clients commerciaux et industriels demandent aux réseaux de distribution leurs indices de fiabilité lors de la localisation d'une installation.

Les indices de fiabilité, également appelés les indices de qualité, mesurent la performance d'un système électrique. La mauvaise fiabilité de la part de la distribution électrique est pénalisée sur la base de l'évaluation quantitative par des indices de fiabilité. Certains réseaux de distribution paient également des bonus au personnel de réseaux de distribution, sur la base de performance exceptionnelle. Les clients commerciaux et industriels se renseignent sur les indices de fiabilité lors de la localisation d'une nouvelle installation. La plupart des organismes de réglementation ont fixé des objectifs en matière des indices de fiabilité. Si les réseaux de distribu-

tion ne les remplissent pas (chiffres supérieurs à ceux définis), ils peuvent être pénalisés. Les plus importants indices pour mesurer la performance de fiabilité sont les suivants:

### 5.1 Indice de fréquence moyenne d'interruptions du système (SAIFI)

SAIFI est défini comme le nombre moyen d'interruptions d'alimentation par client au cours d'une période donnée qui est généralement d'un an. C'est calculé en divisant le nombre total d'interruptions chez le client au cours de cette période par le nombre total de clients servis. (Cela signifie les pannes d'électricité par client, non pas le nombre d'interruptions.)

L'unité, qui en résulte, est «les interruptions par client». Généralement, les clients d'un réseau de distribution ont en moyenne entre une et deux interruptions prolongées par an. SAIFI est également le taux moyen de défaillance, souvent marqué  $\lambda$ . Une autre mesure utile est le temps moyen entre les défaillances (MTBF), qui est l'inverse du taux de défaillance: MTBF en années =  $1/\lambda$ . Les interruptions par client (CI) sont également utiles avec SAIFI, la partie qui s'ajoute au numérateur de SAIFI.

$$SAIFI = \frac{\text{Total Number of Customer Interruptions}}{\text{Total Number of Customers Served}} \quad (1)$$

### 5.2 Indice de durée moyenne d'interruptions du système (SAIDI)

SAIDI est défini comme la durée moyenne d'interruption pour les clients desservis au cours d'une période spécifique, qui est normalement d'un an. C'est calculé en additionnant les minutes d'interruption de service par client au cours d'une période donnée et la somme sera divisée par le nombre moyen de clients desservis pendant la période. L'unité est en minutes.

SAIDI quantifie la moyenne de durée totale d'interruptions. SAIDI est indiqué en unités d'heures ou de minutes par an. Les minutes d'interruption par client (CMI) sont également utiles avec SAIDI, la partie qui s'ajoute au numérateur de SAIDI. L'index permet au réseau de distribution de signaler le temps (normalement en minutes)

pendant lequel les clients auraient été hors service, si tous les clients étaient hors service en même temps.

$$SAIDI = \frac{\text{Sum of all customer interruptions durations}}{\text{Total number of customer served}} \quad (2)$$

### 5.3 Indice de durée moyenne d'interruption par client (CAIDI)

CAIDI est le temps de réparation «apparent» (du point de vue de clients). C'est généralement beaucoup plus court que le temps réel de réparation car les réseaux de distribution procèdent normalement à sectionner les circuits pour réactiver le service chez autant de clients que possible avant que les équipes ne réparent les dommages réels.

CAIDI est le taux de SAIDI sur le SAIFI et il est défini par la formule suivante:

$$CAIDI = \frac{SAIDI}{SAIFI} = \frac{\text{Sum of all customer interruption durations}}{\text{Total number of customer interruptions}} \quad (3)$$

### 5.4 Les indices et les valeurs de catégories internationales

Un résumé de l'indice de fiabilité pour SAIFI et SAIDI est présenté dans le tableau 3.

Un examen de l'indice de fiabilité pour SAIFI et SAIDI en vigueur dans certains pays européens est présenté dans le tableau 4.

Pays	SAIFI	SAIDI
Autriche	0.9	72
Danemark	0.5	24
France	1.0	62
Allemagne	0.5	23
Italie	2.2	58
Pays-Bas	0.3	33
Espagne	2.2	104
Royaume-Uni	0.8	90

Tableau 4: Indices de fiabilité pour certains pays européens en 2013/2014 [48]

	SAIFI			SAIDI		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%
<b>Groupe de travail de l'IEEE sur la fiabilité de la distribution [44]</b>						
Nombre de jours d'évènement important (MEDs), 2.5	0.96	1.16	1.55	1.76	2.38	2.85
Distribution uniquement, pas de MED	0.83	1.05	1.35	1.57	2.12	2.65
Tous les évènements	1.33	1.64	2.20	3.37	5.17	10.33
Association des coopératives d'électricité rurale nationale NRECA 2001, pas de MED	0.90	1.29	1.88	1.30	2.07	3.17
<b>EI [45]</b>						
Sans tempêtes	0.92	1.32	1.71	1.16	1.74	2.23
Avec tempêtes	1.11	1.33	2.15	1.36	3.00	4.38
L'antigène carcino-embryonnaire (CEA) (Avec tempêtes) [46]	1.093	1.95	3.16	0.73	2.26	3.28
Comparaison de grandes villes d'IPL [47] (Entreprise d'Indianapolis Power & Light, 2000)	0.72	0.95	1.15	1.02	1.64	2.41

Tableau 3: Indices de fiabilité standard

## 6 Sommaire

La qualité d'énergie est un sujet important dans les systèmes électriques et elle ne reçoit pas souvent l'attention appropriée en raison des pressions d'opération, c'est-à-dire qu'il est plus important de s'assurer que tous les clients ont de l'électricité que d'assurer de la bonne qualité d'alimentation. Les phénomènes de qualité d'énergie sont divisés en catégories en fonction de la durée du décalage ainsi que du type d'impact sur les clients. Ces catégories sont:

- Les perturbations (événements);
- Les phénomènes en régime permanent (perturbations de longue durée); et
- La continuité (coupure).

Il est à noter que SAIFI et SAIDI sont des indices de performance pondérés. Ils mettent l'accent sur la performance des circuits les moins performants et sur la performance en cas de conditions climatiques défavorables. SAIFI et SAIDI ne sont pas nécessairement de bons indicateurs de performance type chez le client. Les incitations et les pénalités basées sur la fiabilité affectent directement une entreprise de distribution de réseaux électriques, et il est donc essentiel de comprendre la variabilité des indices de fiabilité d'une année à l'autre pour la gestion des risques financiers de réseaux de distribution.



## Références

1. IEC Electropedia, Vocabulaire électrotechnique international en ligne, <http://www.electropedia.org>, consulté en 26/05/2017.
2. C. Sankaran; «Qualité de l'alimentation», Presse de CRC, Boca Rotan, 2002.
3. V. J. Gosbell; B.S.P. Herath; "Nouveau cadre pour l'analyse de données de la qualité du réseau d'alimentation". Actes d'AUPEC'01, Perth, pages 77 – 582 (2001).
4. M. H. J. Bollen; "Comprendre les problèmes de la qualité d'alimentation – Chutes et interruptions de tension"; Presse de l'IEEE, New York, 2001.
5. J. Arrillaga; N.R. Watson; S. Chen; "Évaluation de la qualité du système électrique"; Wiley, New York, 2000.
6. IEC 62510, "Normalisation des caractéristiques de l'électricité".
7. EN 50160, "Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution".
8. IEC 61000-2-2, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Environnement. Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension".
9. IEC 61000-2-5, "Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 2-5: Environnement - Description et classification des environnements électromagnétiques".
10. IEC 61000-2-8, "Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 2-8: Environnement – Creux de tension et coupures brèves sur les réseaux d'électricité publics incluant des résultats de mesures statistiques".
11. IEC. 61000-3-2, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limites pour les émissions de courant harmonique (courant appelé par les appareils  $\leq 16$  A par phase)".
12. IEC 61000-3-3, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limitation des variations de tension, des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux publics d'alimentation basse tension, pour les équipements ayant un courant nominal  $\leq 16$  A par phase et non soumis à un raccordement conditionnel".
13. IEC 61000-3-4, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux d'alimentation basse tension pour les équipements ayant un courant nominal supérieur à 16 A".
14. IEC 61000-3-5, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Limitation des fluctuations de tension et du papillotement dans les réseaux basse tension pour les équipements ayant un courant nominal supérieur à 75 A".
15. IEC 61000-3-6, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Évaluation des limites d'émission pour les installations déformantes raccordées aux réseaux électriques MT, HT et THT".
16. IEC 61000-3-7, «Compatibilité électromagnétique (CEM). Limites. Évaluation des limites d'émission pour les installations fluctuantes raccordées aux réseaux électriques MT, HT et THT».
17. IEC 61000-4-1, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Vue d'ensemble de la série d'IEC 61000-4".



18. IEC 61000-4-2, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-2: Techniques d'essai et de mesure. Essais d'immunité aux décharges électrostatiques".
19. IEC 61000-4-3, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essai d'immunité aux champs électromagnétiques rayonnés aux fréquences radioélectriques".
20. IEC 61000-4-4, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essais d'immunité aux transitoires électriques rapides en salves".
21. IEC 61000-4-5, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essai d'immunité aux ondes de choc".
22. IEC 61000-4-6, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 4-6. Techniques d'essai et de mesure. Immunité aux perturbations conduites, induites par les champs radioélectriques".
23. IEC 61000-4-7, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Guide général relatif aux mesures d'harmoniques et d'inter-harmoniques, ainsi qu'à l'appareillage de mesure, applicable aux réseaux d'alimentation et aux appareils qui y sont raccordés".
24. IEC 61000-4-11, «Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Essais d'immunité aux creux de tensions, coupures brèves et variations de tension pour les appareils à courant d'entrée inférieur ou égal à 16 A par».
25. IEC 61000-4-15, "Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Flickermètre. Spécifications fonctionnelles et de conception. Publication fondamentale en CEM".
26. IEC 61000-4-30, «Compatibilité électromagnétique (CEM). Techniques d'essai et de mesure. Méthodes de mesure de la qualité de l'alimentation».
27. Norme IEEE-120, "Guide principal d'essais pour les mesures électriques dans les circuits électriques".
28. Norme IEEE-141, «Pratique recommandée à l'égard de la distribution d'énergie électrique pour les installations industrielles avec effet de perturbations de tension sur les équipements dans une zone industrielle».
29. Norme IEEE-142, "Pratique recommandée pour la mise à la terre des réseaux électriques industriels et commerciaux".
30. Norme IEEE-213, «Procédure standard pour la mesure des émissions conduites dans la plage de 300 kHz à 25 MHz des récepteurs de télévision et de radiodiffusion FM aux lignes d'alimentation».
31. Norme IEEE-241, "Pratique recommandée pour les systèmes d'alimentation électrique dans les bâtiments commerciaux".
32. Norme IEEE-449, "Norme pour les régulateurs de tension à ferro-résonance".
33. Norme IEEE-465, "Spécifications d'essai pour les parafoudres".
34. Norme IEEE-519, "Pratique recommandée pour le contrôle des harmoniques et la compensation réactive des convertisseurs statiques électroniques".
35. Norme IEEE-859, "Termes standard pour le reportage et l'analyse des occurrences d'indisponibilité et états de panne des installations de transport d'électricité".

36. Norme IEEE-1159, "Pratique recommandée pour la surveillance de la qualité des réseaux électriques d'alimentation. Catégories de phénomènes électromagnétiques des réseaux électriques».
37. Norme IEEE-1250, "Guides de service pour les équipements sensibles aux perturbations momentanées de tension".
38. Norme IEEE-1346, "Pratique recommandée pour évaluer la compatibilité des réseaux électriques d'alimentation avec les équipements électroniques".
39. Norme IEEE-1366, "Utilisation expérimentale de l'IEEE pour les indices de fiabilité de la distribution d'énergie électrique", New York: L'Institut des ingénieurs électriciens et électroniciens; 2012.
40. Norme IEEE-1453, "Pratique recommandée pour l'analyse des installations fluctuantes sur les réseaux d'alimentation".
41. ANSI-C84.1, "Norme nationale américaine relative aux réseaux et aux dispositifs d'alimentation - Tensions nominales (60 Hz)".
42. E. F., Fuchs; M.A.S., Masoum; M., Ladjevardi.; "Effets sur les câbles de distribution des charges électroniques basés sur la croissance future de la charge de pointe, Partie I: Mesures. En: Actes de la conférence internationale sur les systèmes électriques et énergétiques de l'Association internationale de science et de technologie pour le développement (IASTED) (EuroPEs 2005); 15 au 17 juin 2005».
43. B. L.; Agrawal; R. G., Farmer; "Amortissement efficace pour l'analyse de résonance sous-synchrone d'un turbogénérateur en parallèle", IEEE Trans Power Sys 1988 394): 1441-8.
44. Groupe de travail de l'IEEE sur la fiabilité de la distribution, Résultats de l'analyse comparative de l'IEEE 2011, <http://group-per.ieee.org/groups/td/dist/sd/doc/2012-07-01-Benchmarking-Results-2011.pdf>, 2012.
45. Enquête sur la fiabilité d'EEL, Compte rendu de 8ème réunion du Comité de distribution, 28-31 mars 1999.
46. Rapport annuel de la continuité du service sur la performance du système de distribution dans les réseaux d'électricité, l'Association canadienne de l'électricité, 2001.
47. Commentaires de l'entreprise Indianapolis Power & Light sur le sujet de discussion proposé, session 7, les problèmes de la qualité de service, présentées à la Commission de réglementation de l'Indiana, 2000.
48. C18-EQS-86-03, «Rapport de l'analyse comparative du Conseil des régulateurs européens de l'énergie (CEER) 6.1 sur la Continuité de l'approvisionnement en énergie et en gaz», la Qualité d'énergie des axes d'approvisionnement, Conseil des régulateurs européens de l'énergie, 2018.
49. R. K., Varma ; R.M., Mathur ; G.J., Rogers ; P., Kundur ; «Les effets de modélisation des variations de fréquence du système dans les études de stabilité à long terme», IEEE Trans. Power Sys, 1996, 11(2), pages 827 à 832.



