

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

~~ANNEE 2023/2024~~ ANNEE 2023/2024 AGOGIQUES
DESTINE AUX ETUDIANTS DES CYCLES « LMD MASTER »

DES FILIERES :

- « RESEAUX ELECTRIQUES »
- « COMMANDE ELECTRIQUE »
- « MACHINES ELECTRIQUES »
- « ELECTROTECHNIQUE »
- « ELECTROMECHANIQUE »
- « ENERGIES RENOUVELABLES »

ANNEE 2023/2024

Le système énergétique doit assurer la qualité de l'énergie fournie aux consommateurs. Cette qualité, pour un système triphasé est caractérisée par les écarts et les variations de tensions, par sa dissymétrie et par sa déviation de la tension et de la déviation de la fréquence des normes prescrites.

Pour un bon fonctionnement normal des consommateurs, il faut maintenir la tension sur les bornes dans les limites données du fait que l'écart peut provoquer des dommages considérables.

L'écart ou la variation de tension du réseau représente la différence entre les tensions réelles et nominales. Pour avoir une qualité de l'énergie électrique, la tension aux jeux de barres de la distribution doit être proche le plus possible de la tension nominale.

La qualité de l'énergie électrique est un problème de très grande actualité, dont l'importance est imposée par le rôle déterminant que l'énergie électrique joue dans la vie de la société contemporaine. La nécessité d'étudier la qualité de celle-là dérive de la présence de perturbations, qui affectent défavorablement l'alimentation des consommateurs à tous les investissements du système (production, transport, distribution).

La qualité de l'énergie électrique doit être analysée dans le contexte de la relation entre les fournisseurs et le client (le bénéficiaire de l'énergie). Celle-ci peut être définie comme l'ensemble des paramètres (indicateurs) qui conditionnent l'usage de l'énergie électrique, et satisfont les nécessités des récepteurs (consommateurs électriques) en concordance avec leur fonction. La garantie de la qualité de l'énergie électrique signifie le maintien de ces indicateurs dans des limites admissibles.

Il est important de préciser que la qualité de l'énergie électrique est déterminée à la fois par la demande individuelle et collective des clients et par les avaries provoquées dans le système de production, de transport et de distribution par les contraintes électriques ou mécaniques dues à des facteurs très variés (conditions climatiques, usure normale, vieillissement etc.). C'est pour cette raison que les caractéristiques de l'énergie électrique sont traitées en termes de statistique et de probabilité.

*Les paramètres et leurs principales «anomalies», permettant de caractériser une alimentation électrique, sont les suivants, (**tension et fréquence**) [1]:*

- *Amplitude: variations lente, coupures (flicker ou papillotement), creux de tension (voltage dip), surtensions.*
- *Fréquence: variations.*
- *Forme d'onde: harmoniques, transitoires, courants porteurs.*
- *Phase: déséquilibre de tensions polyphasées: apparition de tension inverse ou homopolaire.*
- *Stabilité à court, moyen et long terme (uniquement grand transport).*

Tous les aspects mentionnés auparavant doivent être considérés et analysés sous l'incidence des perturbations (les causes de l'apparition, leurs effets et les mesures pour leur réduction).

L'intérêt de plus en plus marqué pour ce domaine est expliqué par les spécialistes par l'émergence des aspects suivants, [1]:

- *Les réseaux électriques sont soumis à de multiples perturbations électromagnétiques.*
- *Les récepteurs modernes, notamment les appareils électroniques et ceux de contrôle-commande et de protection, sont très sensibles à la qualité de l'énergie les alimentant.*
- *Les appareils électroniques (démarreur progressif, convertisseurs de fréquence, redresseurs à commande de phase, micro-ordinateurs, TV, appareils électroménagers, ballasts électroniques, etc.) sont de plus en plus nombreux.*
- *Les équipements modernes engendrent des perturbations dans le système d'alimentation.*
- *Les exigences de disponibilité du service (pour la production, la gestion ou le commerce) sont de plus en plus élevées.*
- *Les fournisseurs veulent aussi améliorer la qualité «du produit électricité» pour éviter, d'une part, de payer des pénalités aux clients et les dysfonctionnements, voire la destruction de composants de leurs réseaux électriques, d'autre part. Dans les conditions de l'ouverture du marché d'énergie, la qualité de l'électricité fournie peut représenter un argument décisif pour fidéliser ou attirer les clients.*
- *La qualité de l'énergie électrique peut être actuellement mesurée.*

La qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. Ces défauts détériorant la qualité de la tension se manifestent sous formes de différentes perturbations: surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique et creux de tension..

Les principales perturbations susceptibles d'altérer le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont les creux de tension, les harmoniques et inter-harmoniques, les fluctuations de tension ou Flicker, les déséquilibres de tension, les surtensions, les surtensions temporaires et les surtensions transitoires. Afin de caractériser et de quantifier ces perturbations, les industriels ont développés des « mesureurs » de la qualité de l'énergie (qualimètre, flickermètre, perturbographe, analyseur de réseau, analyseur de puissance.), [2].

1.1. INTRODUCTION

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes.

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes

- les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme la non symétrie (déséquilibrées) de tension, les tensions harmoniques et les creux de tension,
- les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs.

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, le personnel 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 est 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'éclairage 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 qualité de l'énergie électrique 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,[9].

- 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 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...),[10].

Dans ce chapitre, nous étudierons les objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie, les caractéristiques générales des perturbations électriques. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles de ces perturbations et nous présenterons et comparerons des solutions de compensation de ces perturbations généralement proposées dans la littérature.

1.2. OBJECTIFS DE LA MESURE DE LA QUALITE DE L'ENERGIE

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.

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 être 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, [11].

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).

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 qualité de l'énergie électrique. Disposer d'une qualité de l'énergie électrique adaptée aux besoins est un objectif des personnels d'exploitation, de maintenance et de gestion de sites tertiaires ou industriels, [12].

Des outils logiciels complémentaires assurant le contrôle-commande et la surveillance permanente de l'installation sont alors nécessaires.

Des enquêtes nécessitent 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 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 corrélée avec le raccordement de nouvelles charges. Les tendances saisonnières ou des dérives peuvent aussi être étudiées et permettent de comparer la qualité de l'énergie électrique fournie par le distributeur 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 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 et de 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,[13].

1.3. CARATERISTIQUES DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES

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

- perturbations à basse fréquence (< 9 kHz),
- perturbations à haute fréquence (≥ 9 kHz),
- décharges électrostatiques.

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites à basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau).

Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, non symétrie du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques.

En général, il n'est pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations.

Elles peuvent être groupées en quatre catégories:

- *la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif,*
- *l'amplitude des trois tensions,*
- *la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,*
- *la fréquence.*

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,[12].

On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- *la non symétrie du système triphasé, que l'on appelle déséquilibre.*

On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficiles à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde: ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à *10 ms*.

- *les variations de l'amplitude* : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non;

- *la modification de la forme d'onde de la tension* : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à *50 Hz*, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de *50 Hz*, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;

- *les fluctuations de la fréquence* : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau au niveau de la production ou du transport;

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques en basse tension et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension,[5].

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, et/ou déséquilibrées à base d'électronique de puissance La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbations ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

1.3.1. NON SYMETRIE (DESEQUILIBRE) DE LA TENSION ET DU COURANT

1.3.1.1. ORIGINE DE LA NON SYMETRIE (DESEQUILIBRE)

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire, [12].

la non symétrie du système triphasé de tensions est représentée sur la figure 1.1 .

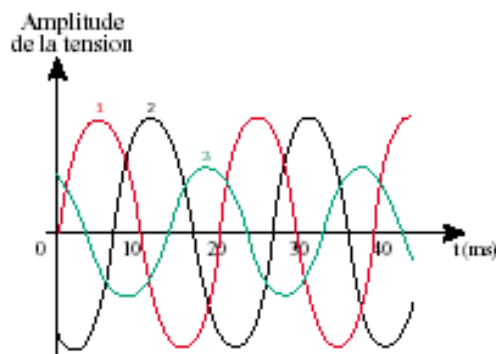


Figure. 1.1: Représentation de la non symétrie du système triphasé de tensions

1.3.1.2. CONSEQUENCES DE LA NON SYMETRIE (DESEQUILIBRE)

Il est plus intéressant d'aborder le problème de la non symétrie par type d'équipement. La non symétrie d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés, [14]:

_ Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),

_ Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de la non symétrie entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande,[5].

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

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

La non symétrie en tension est caractérisée par son degré qui est défini en utilisant la méthode des composantes de Fortescue par le rapport des amplitudes des tensions inverse V_i et directe V_d [11, 15].

$$K_2 \% = \frac{V_i}{V_d} \times 100 \quad (1.1)$$

K_2 : Coefficient de non symétrie

La compagnie d'électricité (Sonelgaz) s'engage à fournir, aux clients raccordés aux réseaux HT et BT, une tension dont le taux moyen de la non symétrie (déséquilibre) ne dépasse pas 7%.

Cependant la compagnie d'électricité (Sonelgaz) demandera aux clients qui ne sont pas couverts par ces champs de ne pas provoquer un taux de déséquilibre supérieur à 5 %.

1.3.2. PERTURBATIONS HARMONIQUES EN COURANT ET EN TENSION

1.3.2.1. ORIGINE DES HARMONIQUES

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau, [16, 17, 18].

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre).

Joseph FOURIER a démontré que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé fondamental, et les autres à des fréquences multiples des fondamentaux appelés harmoniques, [5].

A ces termes purement sinusoïdaux peut se rajouter une éventuelle composante continue.

$$y(t) = Y_0 + \sum Y_h \sqrt{2} \sin(2\pi \cdot h \cdot f + \phi_h) \quad (1-2)$$

avec : Y_0 : valeur de la composante continue,

Y_h : valeur efficace de l'harmonique de rang h ,

$\omega = 2\pi f$: pulsation de la fréquence du fondamental,

ϕ_h : déphasage de la composante harmonique de rang h.

Cette notion d'harmonique s'applique à l'ensemble des phénomènes périodiques quelle que soit leur nature, en particulier au courant alternatif.

h: est appelé rang harmonique ($h > 1$).

La composante de rang 1 est la composante fondamentale.

La valeur efficace est:

$$y_{\text{eff}} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + Y_h^2 + \dots} \quad (1-3)$$

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique (THD : Total Harmonic Distortion) en tension ou en courant :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_h \left(\frac{Y_h}{Y_1} \right)^2} \quad (1-4)$$

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 comme il est représenté dans la figure 1.2.

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 , [19, 20].

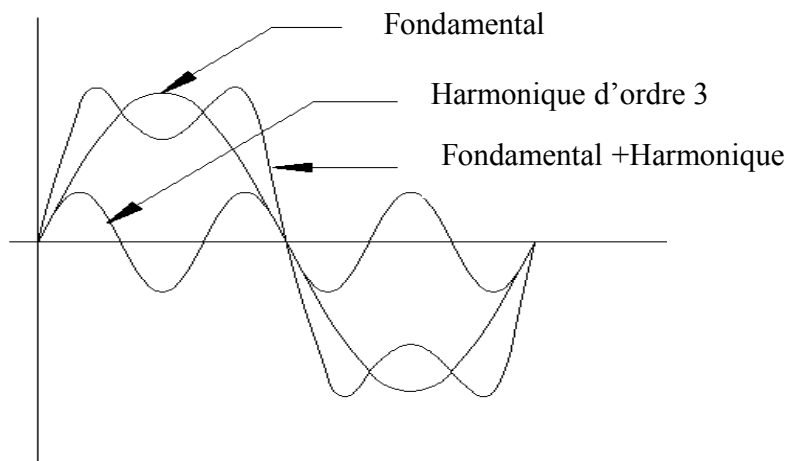


Figure. 1.2: Représentation de la déformation de la tension.

Les principales sources d'harmoniques sont :

- Les charges industrielles qui se composent des équipements d'électronique de puissance (variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage) et les 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.

- 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.

A noter que l'utilisation de ce type d'appareils croît en nombre et parfois en puissance unitaire.

Les niveaux d'harmoniques 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 comme il est représenté sur la figure 1. 3.

La mise sous tension de transformateurs ou les charges polarisées (redresseurs mono-alternance) ainsi que les fours à arc génèrent aussi (en plus des rangs impairs) des harmoniques de rangs pairs.

Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental 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, cyclo-convertisseurs). Les fréquences de télécommande utilisées par le distributeur sont aussi des inter-harmoniques.

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,[20].

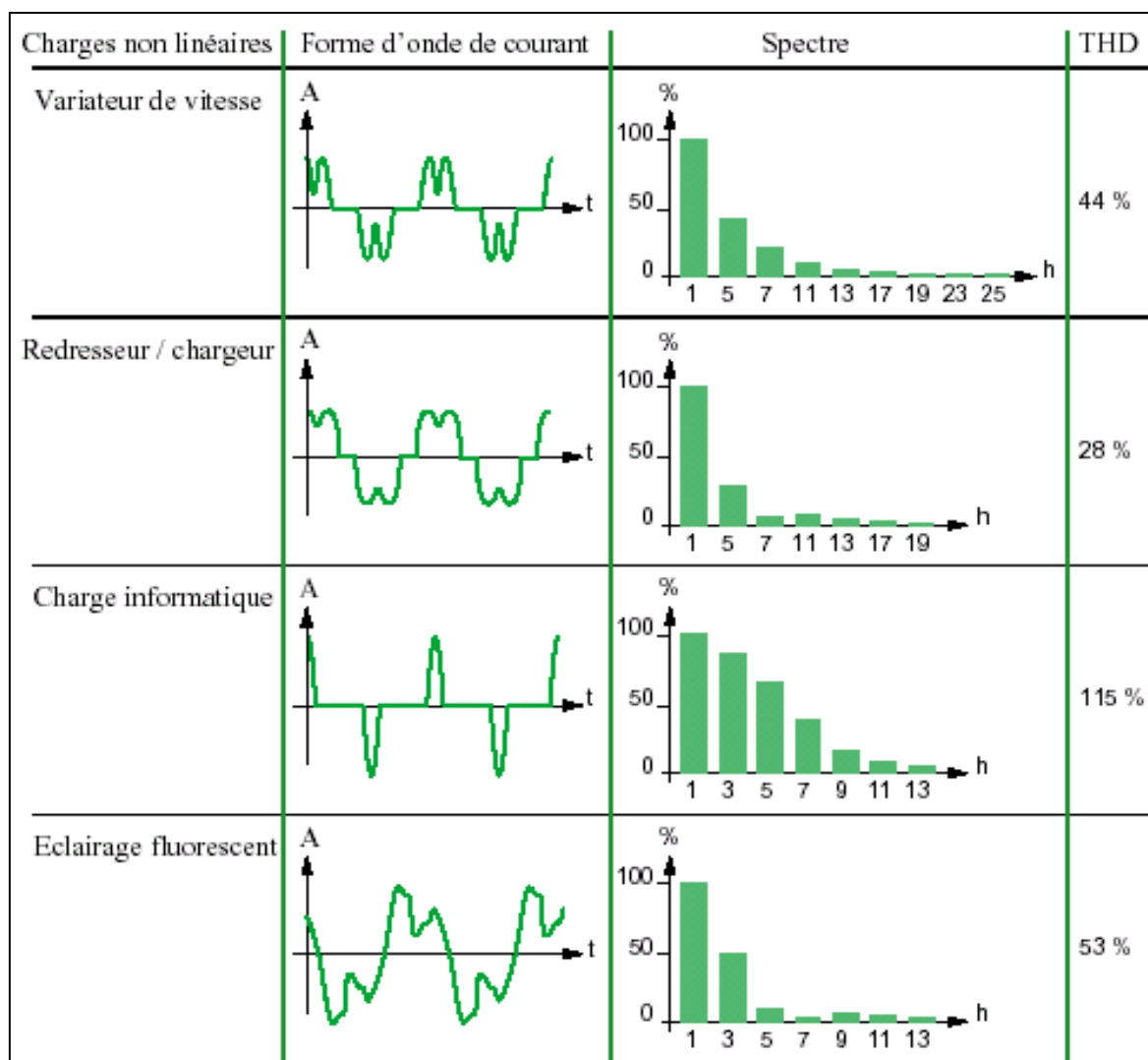


Figure. 1.3: caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques, [20]

1.3.2.2. CONSEQUENCES DES 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.

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance.

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) ;
- L'influence sur les transformateurs du réseau (augmentation des pertes à vide à cause de l'effet particulier des courants harmoniques) ;
- L'influence sur les câbles de HT(diminuent la durée de vie du câble, dégradation du matériel isolant).
- Pertes supplémentaires dans les condensateurs, les transformateurs,...;
- Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils;
- L'influence sur le fonctionnement des redresseurs;
- L'influence sur la télécommande dans les réseaux;
- L'influence sur les condensateurs des réseaux;
- Effets instantanés ou à court terme:
 - * Déclenchements intempestifs des protections;
 - * Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur...);
 - * Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs);
 - * Destruction par surcharge thermique de condensateurs;
 - * Perte de précision des appareils de mesure
- Effets à long terme:

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

* Echauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer.....);

* Fatigue mécanique (couples pulsatoires dans les machines asynchrones.....);

* Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes joule et diélectriques;

* Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...);

* Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire.....), [5, 18, 21].

Le tableau.1.1 résume les principaux effets des harmoniques.

Matériels	Effets
Condensateurs de puissance	Echauffement, vieillissement prématuré (claquage), résonance.
Moteurs	Pertes et échauffements supplémentaires. Réduction des possibilités d'utilisation à pleine charge. Couple pulsatoire (vibrations, fatigue mécanique). Nuisances sonores.
Transformateurs	Pertes (ohmique-fer) et échauffements supplémentaires. Vibrations mécaniques. Nuisances sonores.
Disjoncteurs	Déclenchements intempestifs (dépassements des valeurs crêtes de la tension...).
Câbles	Pertes diélectriques et ohmiques supplémentaires (particulièrement dans le neutre en cas de présence d'harmonique 3).
Ordinateurs	Troubles fonctionnelles.
Electronique de Puissance	Troubles liées à la forme d'onde (commutation, synchronisation).

Tableau.1.1: Effets des harmoniques

1.3.3 CREUX DE TENSION

1.3.3.1. ORIGINE DES CREUX DE TENSION

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 90 % et 10 % d'une tension de référence (Uref) 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 comme il est représenté dans la figure.1.4.a.

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 (régulateur 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 de l'amplitude de la tension « RMS » du signal sur une période du fondamental toutes les demi-périodes (recouvrement d'une demi-période) comme il est représenté dans la figure. 1.4.b.

Les paramètres caractéristiques d'un creux de tension sont la profondeur ΔU (ou son amplitude U) et la durée ΔT , définie comme le laps de temps pendant lequel la tension est inférieure à 90%, [12, 15, 22].

On parle de creux de tension à x % si la valeur de l'amplitude de la tension « RMS » passe en dessous de x % de la valeur de référence U_{ref} .

Les coupures représentent un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90%.

Elles sont caractérisées par un seul paramètre: la durée. Les coupures brèves sont de durée inférieure à une minute, elles sont notamment occasionnées par les réenclenchements automatiques lents destinés à éviter les coupures longues (réglés entre 1 et 3 minutes); les coupures longues sont de durée supérieure. Les coupures brèves et les coupures longues sont différentes tant du point de vue de l'origine que des solutions à mettre en œuvre pour s'en préserver ou pour en réduire le nombre.

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

En fonction du contexte, les tensions mesurées peuvent être entre conducteurs actifs (entre phases ou entre phase et neutre), entre conducteurs actifs et terre (Phase/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,[12].

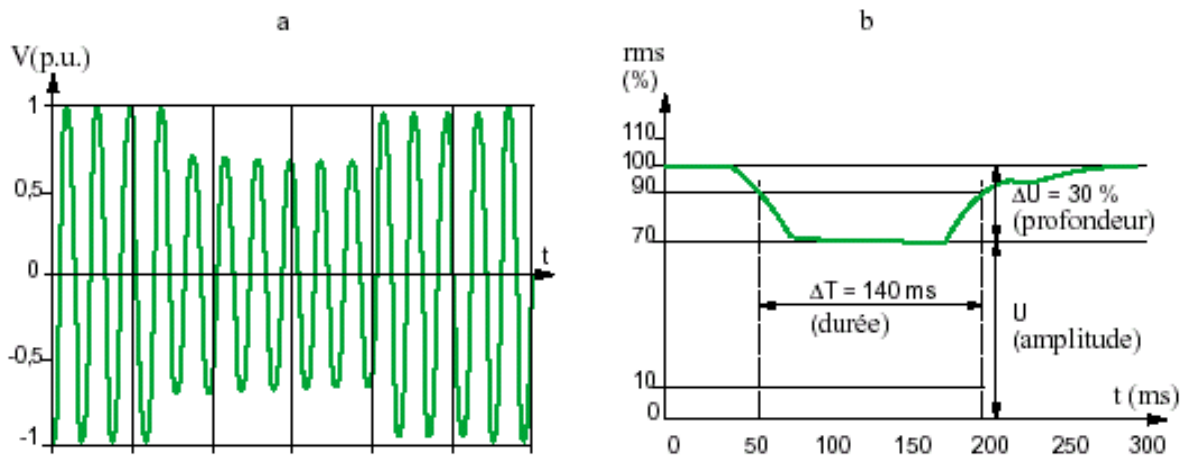


Figure.1.4: Paramètres caractéristiques d'un creux de tension; [a] et [b], [12]

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.

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

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

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

Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil.

Les creux de tension ou coupures se propagent vers les niveaux de tension inférieurs à travers les transformateurs. Le nombre de phases affectées ainsi que la sévérité de ces creux de tension dépend du type de défaut et du couplage du transformateur.

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

Les transitoires ($\Delta T < T/2$) sont causés, 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,[12, 13].

1.3.3.2 CONSEQUENCES DES CREUX DE TENSION

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f . Il peut durer de 10 ms à 3 mn [23]. Il est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie.

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms .

Il y a deux types de phénomènes à l'origine des creux de tension :

- ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.),

- ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés.

Les conséquences des creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le Tableau. 1.2 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [12, 18].

Les creux de tension étant caractérisés par leur profondeur et leur durée, avec des limites de 30% et de 600 ms, comme le montre la figure. 1.5.

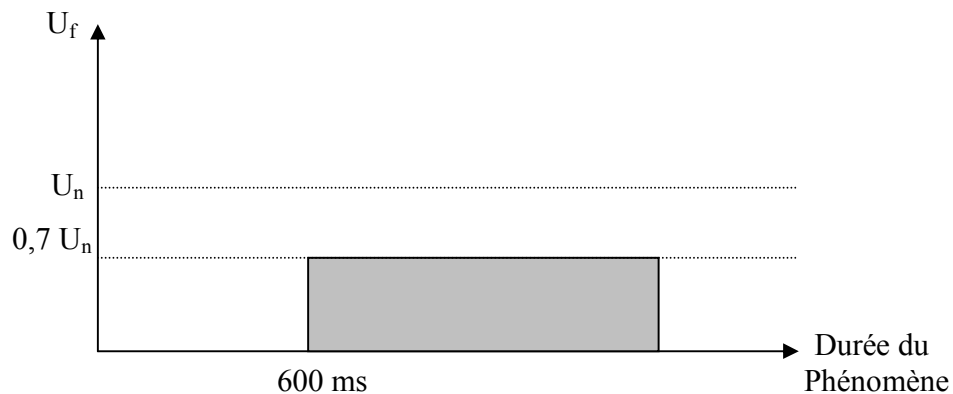


Figure. 1.5: Creux de la tension en fonction de la durée du phénomène , [15]

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et ré allumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension

Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> _ En mode onduleur : destruction des protections _ En mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

Tableau .1.2: Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

1.3.4. SURTENSIONS

1.3.4.1. ORIGINE DES 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. Les surtensions sont de trois natures, [24, 25, 26] :

- 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).

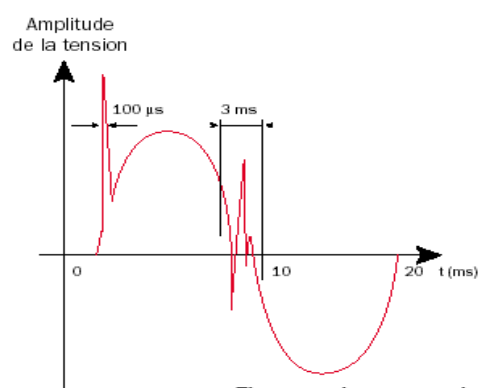


Figure 2 : les surtensions transitoires

Figure. 1.6: Exemple de cas de surtensions transitoires, [27]

1.3.4.1.1. Surtensions à fréquence industrielle

- Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz). Elles sont aussi causées par les défauts d'isolement ;

- Ferro résonance, 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 ;

- Rupture du conducteur de neutre ;

- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;

- Surcompensation de l'énergie réactive.

1.3.4.1.2. Surtensions de manœuvre

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...), [34]. On distingue particulièrement trois types :

- Surtensions de commutation en charge normale ;

- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs ;

- Surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs).

1.3.4.1.3. 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).

1.3.4.2 CONSEQUENCES DES 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 et 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 ;

- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :

- * La foudre essentiellement ;
- * 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, [15].

1.3.5 VARIATIONS ET FLUCTUATIONS DE TENSION

1.3.5.1. ORIGINE DES 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 et 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, [15,18, 27] comme illustré sur la figure 1.7.

- 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.

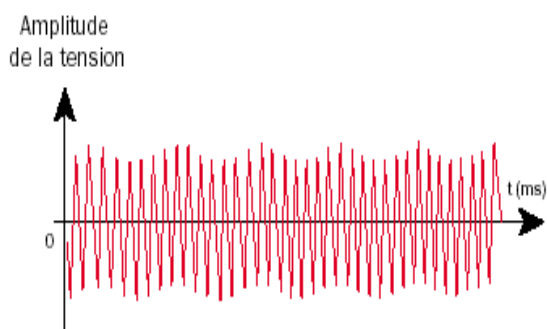


Figure. 1.7: Exemple de variations rapide de la tension, [27]

1.3.5.2 CONSEQUENCES DES VARIATIONS ET DES 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). 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, [15, 27].

1.3.6. FREQUENCE

1.3.6.1. ORIGINE DES FLUCTUATIONS DE LA FREQUENCE

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, [12, 15, 27], la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustré sur la figure 1.8.

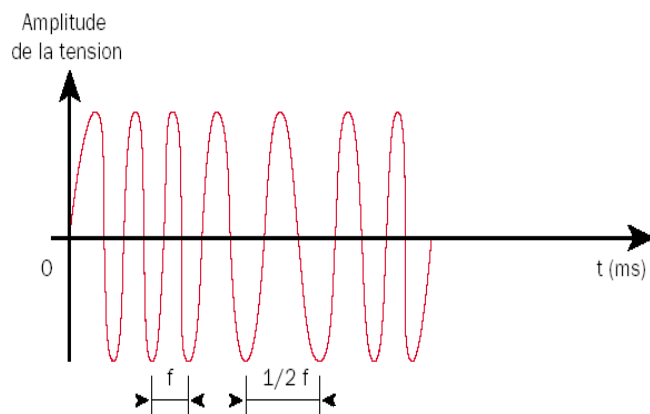


Figure. 1.8: Exemple de fluctuation de la fréquence, [27].

1.7. SOLUTIONS POUR AMELIORER LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE

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 sur une partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs).

Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de 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 qualité de l'énergie électrique 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 production de mauvaise qualité.

- 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[11, 12, 14].

1.7.1. NON SYMETRIE (DESEQUILIBRES) DE LA TENSION

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, les solutions sont:

- Equilibrer 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,[21, 41].
- Augmentation de la puissance de court-circuit,
- Dispositif de ré-équilibrage,
- Modification de l'architecture du réseau
- Compensation de la puissance réactive,

L'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La figure.1.9 montre ce compensateur, appelé *montage de Steinmetz*,[5]. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le *montage de Steinmetz* provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

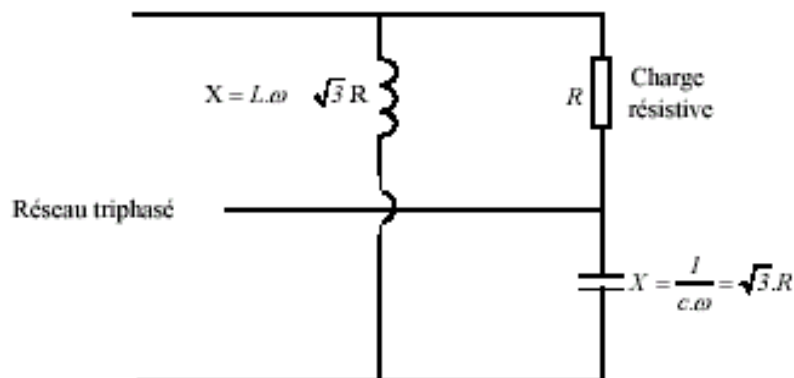


Figure 1.9: Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

1.7.2. CREUX DE TENSION ET COUPURES

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension qui sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de non symétrie de tension.

Quant à la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

La solution moderne pour la compensation des creux de tension se base sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASIs (Alimentation Sans Interruption), [1, 12, 18]. Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

1.7.3. HARMONIQUES

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leurs influence :

- Réduction des courants harmoniques générés :

- * Inductance de ligne ;
- * Utilisation de redresseurs dodécaphasés ;
- * Appareils à prélèvement sinusoïdal.

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, [20, 28, 29].

* Protections et surdimensionnement des condensateurs.

- Filtrage :

* Le filtrage passif ;

* Le filtrage actif ;

* Le filtrage hybride.

- Cas particulier des disjoncteurs :

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

- Le déclassement

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

1.7.4. 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 de :

- Connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau ;

- Choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes ;

- Utiliser des protections quand cela est nécessaire.

En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées, [24, 25].

1.7.4.1. SURTENSIONS A FREQUENCE INDUSTRIELLE

- Mettre hors service tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge ;

- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de ferrorésonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène.

1.7.4.2. SURTENSIONS DE MANŒUVRE

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l'installation de self de choc, résistances de préinsertion ;

- 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

1.7.4.3. SURTENSIONS ATMOSPHERIQUES

- 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, [15, 25].

1.7.5. 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 d'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, [15, 18, 27].

1.8. CLASSIFICATION DES PERTURBATIONS DE L'ALIMENTATION ELECTRIQUE

Le classement général suivant, permet de distinguer le type et la durée des phénomènes faisant l'objet de ce chapitre, ainsi que leurs effets sur les équipements et les différentes méthodes de mesure préconisées qui est représenté dans le tableau.1.3.

Phénomènes (Durée typique)	Types	Effets possibles	Mesure
De longue durée ou Permanents (> 1 min)	- Tension en régime permanent	Échauffement de l'électronique, des moteurs et des transformateurs	Valeurs efficaces sur 10 minutes
	- Tension de neutre	Tensions parasites pouvant affecter la production agricole	
	- Interruption	Arrêt des équipements	Durée d'interruption
	- Tension harmonique	Échauffement de l'électronique, des moteurs et des transformateurs	Valeurs efficaces sur 10 minutes
	- Déséquilibre de tension		Valeurs efficaces sur 2 heures
- Fluctuations	Inconvénients Physiologiques	Moyenne cubique sur 2 heures	
Transitoires lents (> 0,008 s et < 1 min)	- Coupure brève	Arrêt des équipements	Durée d'interruption
	- Creux de tension	Arrêt des procédés industriels ou mauvais fonctionnement des équipements	Valeurs efficaces sur 1 cycle à quelques secondes
	- Surtension temporaire		
	- Variations de fréquence		
- Variations rapides de tension			
Transitoires rapides (< 0,008 s)	- Surtension transitoire	Arrêt des procédés industriels, claquage des isolants	Valeur crête et forme d'onde

Tableau .1.3 : Type et la durée des phénomènes des perturbations, [15]

Le tableau.1.4 résume les solutions des équipements spécifiques pour les différents types de perturbations, [15].

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 (variateurs 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.
Interharmonique	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.
Non symétrie de tension	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance).	Couples moteurs inverses (vibrations) et surchauffement des machines asynchrones.	- Equilibrer les charges. - Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. - Augmenter la Pcc.

1.9. CONCLUSION

Nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, la non symétrie (déséquilibre) de tension, les harmoniques et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. 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, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements, 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. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées.

Annexe : Les normes européennes (EN 50 160) définissent les limites suivantes :

Caractéristiques de la tension d'alimentation	Valeurs et domaines de valeurs		Paramètres de mesure et d'évaluation			
	BT	MT	Valeur de base	Intervalle d'intégration	Période d'observation	Pourcentage
Fréquence	49,5 Hz à 50,5 Hz 47 Hz à 52 Hz		moyenne	10 s	1 semaine	95 % 100 %
Variations de tension	230 V ± 10 % 1)	$U_n \pm 10 \%$	valeur eff.	10 min	1 semaine	95 %
Variations rapides de tension	5 % max. 10 %	4 % max. 6 %	valeur eff.	10 ms	1 jour	100 %
Papillotement (spécific, seulement pour pap. de longue durée)	$P_{It} = 1$		algorithme du papillotement	2 h	1 semaine	95 %
Creux de la tension d'alimentation (≤ 1 min)	des dizaines à 1000 par an (au-dessous de 85 % U_n)		valeur eff.	10 ms	1 an	100 %
Interruptions brèves d'alimentation (≤ 3 min)	des dizaines à centaines par an (au-dessous de 1 % U_n)		valeur eff.	10 ms	1 an	100 %
Interruptions accidentelles (> 3 min)	des dizaines à 50 par an (unter 1 % U_n)		valeur eff.	10 ms	1 an	100 %
Surtensions temporaires à fréquence industrielle (phases - terre)	la plupart < 1,5 kV	1,7 à 2,0 U_n (en fonction du régime du neutre)	valeur eff.	10 ms	pas de données	100 %
Surtensions transitoires (phases - terre)	la plupart < 6 kV	en fonction de la coordination d'isolement	valeur crête	aucun	pas de données	100 %
Déséquilibre de tension (relation système inverse - système direct)	la plupart 2 % en cas particulier jusqu'à 3 %		valeur eff.	10 min	1 semaine	95 %
Tension harmonique (valeur de référence U_n)	harm. rang 3 max. 5 % U_N harm. rang 5 max. 6 % U_N taux global de distorsion harmonique = 8 %		valeur eff.	10 min	1 semaine	95 %

Cause :

Orage : 10 %

Intempéries : 1.5 %

Pollution : 0.7 %

Défaillance du matériel : 36 %

Facteur humain : 27 %

Enclenchement. Sur défaut : 11.6%

Divers et indéterminé : 13.2%

Références

- [1] Olivier Richardot « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée » Thèse de doctorat INPG, 2000.
- [2] Dr. F. HAMOUDI Architectures des réseaux électriques Power system design.
- [3] B. Berseneff, << Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur >>, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Décembre 2010.
- [4] (ETUDE DE LA CONSTRUCTION D'UNE LIGNE, Promotion [2013/2014])
- [5] <https://www.ddline.fr/la-haute-tension-courant-continu-hvdc-un-marche-a-tres-forte-croissance/>.
- [6] A. Doulet. Réseaux de distribution d'électricité - présentation. Techniques de l'ingénieur :Réseaux électriques et applications, Cahier D (4200), Mai 2010.
- [7] K. Fouad « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT » mémoire de magistère, Constantine.
- [8] H. Rachida, « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique », Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure de l'enseignement Technologique d'Oran, 2008-2009.
- [9] Hydro-Québec. (2011). *Service d'électricité en moyenne tension, Norme E.21-12*, (3e éd.). Récupéré de http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-rouge/livre_rouge.pdf
- [10] Hydro-Québec. (2014). *Service d'électricité en basse tension, Norme E.21-1 0*, (10e éd.). Récupéré de http://www.hydroquebec.com/publications/fr/docs/livre-bleu/livre_bleu.pdf
- [11] B. Berseneff (2010), "Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur", rapport de thèse de doctorat, G2elab, 2010.
- [12] document technique de SONELGAZ.
- [13]E. Acha and V.G. Agelidis, 'Power Electronic Control in Power Systems', Newns, London 2002.
- [14]TuranGönen : Electric power distribution system engineering. McGraw-Hill, 1986
- [15]TuränGonen : Electric power transmission system engineering. Analysis and Design. John Wiley & Sons, 1988
- [16] http://fr.wikipedia.org/wiki/Jeu_de_barres
- [17] Georges VALENTIN « Postes à moyenne tension » Techniques d'ingénieur.[N° 158 h] « cahier technique »
- [18] Techniques de l'ingénieur: Plan de défense des réseaux contre les incidents majeurs [D4 807]
- [19] Réseaux d'interconnexion et de transport: fonctionnement [D4 091] ;
- [20] Réseaux d'interconnexion et de transport: réglages et stabilité [D4 092].
- [21] <http://www.rte-france.com>
- [22]T. Gönen., *Power Distribution*, Book chapter in Electrical Engineering Handbook, Elsevier Academic Press, London, England, 2004.
- [23]G. Andersson., *Modelling and Analysis of Electric Power Systems*, Lecture Notes Swiss Federal Institute of Technology Zürich 2008.
- [24]T. Wildi., *Electrotechnique*, McGraw Hill 3rd Edition. 2000.
- [25]J. Arrillaga and N.R. Watson., *Computer Modelling of Electrical Power Systems*, John Wiley & Sons, 2nd Edition. Chichester, England, 2001.

- [26]F. A. Viawan., *Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation*, PhD thesis, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden 2008.
- [27]R. C. Dugan., *Electrical Power Systems Quality*, McGraw Hill, 2nd Edition, 2004
- [28]*Guide de conception des réseaux électriques industriels*, Schneider Electric 2003.
- [29]M. Kezunovic., *Fundamentals of Power System Protection*, Book chapter in Electrical engineering hand- book, Elsevier Academic Press, London, England, 2004.
- [30]*Electrical network protection guide*, Schneider Electric 2003.
- [31]*Protection des réseaux HTA industriels et tertiaires*, Cahier Technique Merlin Gerin, 2005.