

CHAPITRE 2

Dégradation de la qualité d'énergie

Partie 1 : Perturbations (Définitions et Origines)

1 Perturbations :

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau, ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanent l'onde de la tension ou du courant.

1.1 Classification

Ces perturbations peuvent être classées selon deux critères :

1.1.1 Selon la durée de persistances :

a) Des perturbations périodiques (qui durent dans le temps), comme :

- ✓ Les distorsions harmoniques
- ✓ Les chutes de tension dues au flux de puissance réactive dans le réseau
- ✓ Les déséquilibres

b) Des perturbations apériodiques (l'ensemble des phénomènes fugitifs souvent très difficiles à prévoir), comme :

- ✓ Les creux de tension
- ✓ Les surtensions transitoires

1.1.2 Selon leurs manifestations (conséquences sur les grandeurs électriques) :

- ✓ Perturbations sur l'amplitude de la tension-Flicker
- ✓ Déséquilibre des systèmes triphasés

2- Perturbations de tension

2.1 Creux de tension et coupures

On appelle creux de tension (voltage sag), une diminution brutale de l'amplitude de la tension à une valeur située entre 10 et 90% de sa valeur nominale. Un creux de tension est caractérisé par une profondeur ΔV et une durée ΔT prise conventionnellement supérieure à 10 ms et usuellement inférieure à 3 min. La coupure brève est un cas particulier du creux de tension avec une profondeur supérieure à 90 %.

- Les coupures brèves, de durée comprise entre 1 s et 3 min.
- les coupures longues, de durée supérieure ou égale à 3 min.

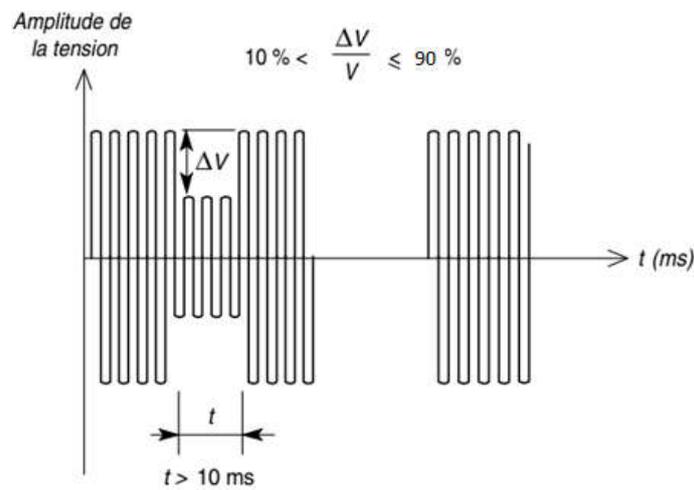


Figure 2.1 Creux de Tensions

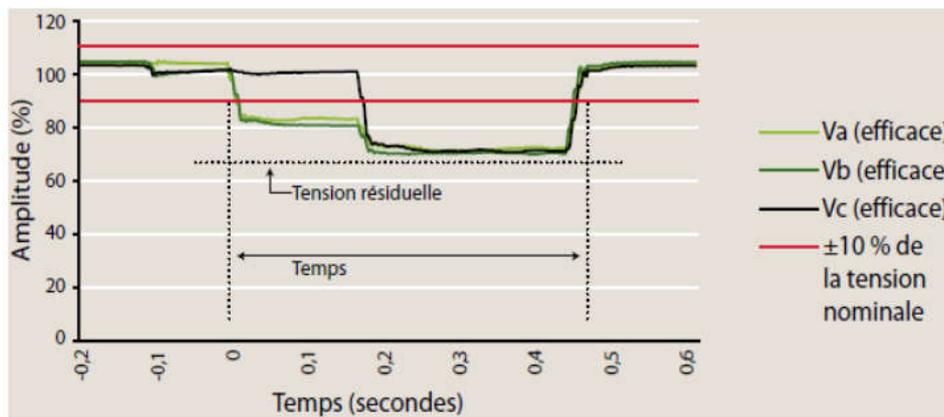


Figure 2.2 Exemple d'un creux de tension au réseau de distribution BT

Origines

Les principales causes des creux de tensions sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux, comme la mise sous tension des gros transformateurs, les court circuits, enclenchement des condensateurs, simple démarrage des gros moteurs. . . etc.

Effets

Les creux de tension ont comme effets, la perturbation des couples dans les machines tournantes, déclenchement des contacteurs, pannes intempestives . . . etc.

2.2 Surtensions

La surtension est toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête dépasse les limites d'une plage ($U_n + 10\%$).

Les surtensions ont trois natures :

- 1) Surtension temporaires à fréquence industrielle :

C'est une augmentation brutale de la valeur efficace de la tension sur une ou plusieurs phases (plus de 110 % de la tension nominale) pour une durée de 3 sec à 1 min, elles sont à la même fréquence que celle du réseau.

Origine :

- Un défaut d'isolement entre phase et terre,
 - Ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur,
 - La surcompensation de l'énergie réactive,
- 2) Surtension de manœuvre,
 Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau électrique, mise en service de condensateur, d'une ligne à vide.
- 3) Surtension d'origine atmosphérique
 Les réseaux de distribution aériens sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique (la foudre).

Origine :

- Les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure).
- Les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montées en potentiel de la terre).

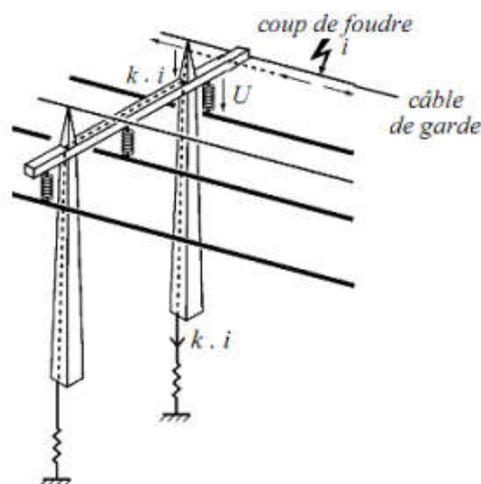


Figure 2.3 Coup de foudre

Conséquences

- Claquage diélectrique.
- Coupure longue
- Perturbation des circuits de contrôle, commande et de communication.
- Arrêt ou démarrage incontrôlé des machines électriques.

2.3 Variation de tension

2.3.1 Variations lentes de la tension

Définition : Augmentation ou diminution de tension provoquée par une variation lente de la charge totale du réseau de distribution ou une partie de ce réseau.

Origine :

Élévation ou baisse de la charge électrique (variation) sur le réseau électrique.

Valeurs typiques :

- ✓ 95 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage définie de tension nominale $U_n \pm 10\%$.
- ✓ 100 % des valeurs efficaces moyennées sur 10 minutes doivent se situer dans la plage $+ 10\%$ et

- 15 % (par rapport U_n).

Exemple de Tension nominale $U_n=230V$:

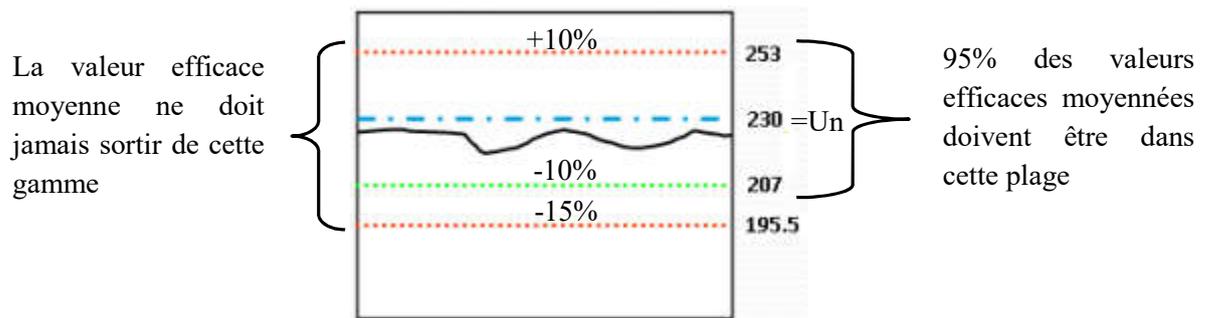


Figure 2.4 Exemple pour valeurs typiques de tension 230V

Conséquences :

Ces variations sont souvent acceptables pour les équipements.

2.3.2 Variations rapide de la tension-Flicker

Les fluctuations de tensions sont des variations rapides et répétitives de la valeur efficace de la tension. Ces variations ont une amplitude modérée (généralement $\pm 10\%$), mais peuvent se produire plusieurs fois par seconde, et peuvent être cycliques ou aléatoires. Cette fluctuation de tension est observée à travers le phénomène du Papillotement (**flicker**), qui reflète une impression d'instabilité de la tension visuelle due à un stimulus lumineux dont la luminosité ou la répartition spectrale fluctuent dans le temps.

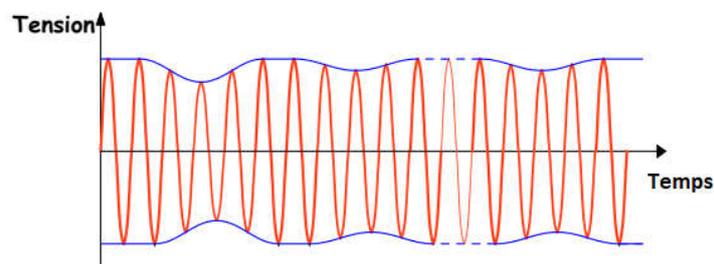


Figure 2.5 Fluctuation d'amplitude de la tension

Origines :

Les fluctuations de tension sont causées principalement par les charges dont l'appel en courant varie rapidement et d'une manière continue. Les exemples les plus connus sont les machines à souder, les fours à arc, moteurs à démarrage fréquents, imprimante laser, micro-onde, ...etc.

Les perturbations de tension précédentes qui représentent des variations d'amplitude qui durent plusieurs cycles peuvent être représentées sur le schéma ci-dessous :

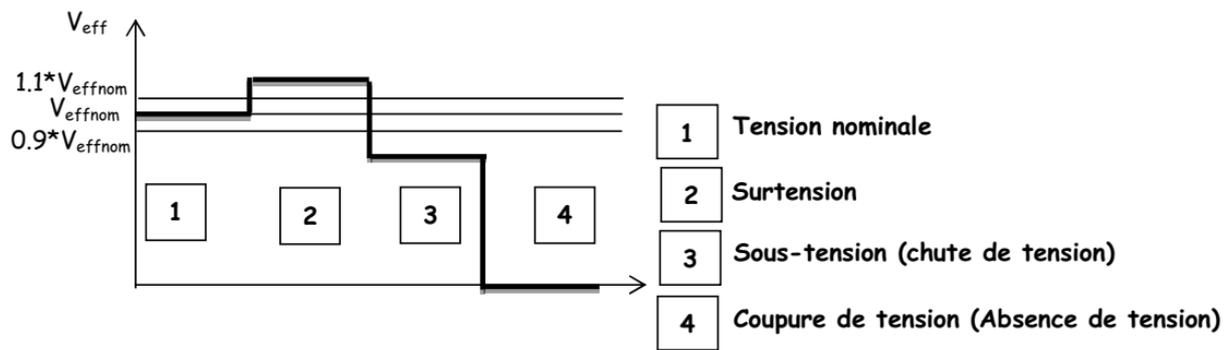


Figure 2.5 Plages de variations d'amplitude de tension

3- Déséquilibre

Un système de tensions (courants) triphasé est dit équilibré si les amplitudes des trois tensions/Courants de phases sont égales et sont séparées entre eux d'un angle électrique de 120° en phase. On dit d'il y a un déséquilibre dans le système de tensions ou de courants triphasés, lorsqu'on enregistre en régime permanent, des asymétries d'amplitudes et/ou de phases.

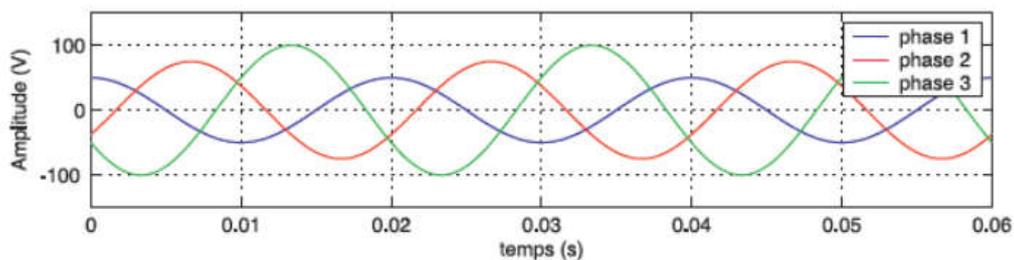


Figure 2.6 Déséquilibre du système électrique triphasé

Origines :

Les déséquilibres sont essentiellement causés par les asymétries d'impédances des lignes du réseau, asymétrie des impédances des charges, et aussi par des courts circuits monophasés ou biphasés.

Exemples :

- ✓ Mauvaise répartition des branchements monophasés BT.
- ✓ Mauvais équilibrage des phases pour les branchements triphasés.
- ✓ Mauvaise répartition de l'éclairage publique.
- ✓ Fusion fusible BT.
- ✓ Mauvais raccordement (mauvais contact).

3.1 Taux de déséquilibre de tension triphasée

Le taux de déséquilibre de tension triphasée mesure la disparité entre les tensions des trois phases d'un système électrique triphasé. Dans un système triphasé idéal et équilibré, les tensions des trois phases sont égales en amplitude et déphasées de manière équivalente l'une par rapport à l'autre. Cependant, dans la réalité, des déséquilibres d'amplitude, de phase, ou les deux à la fois, peuvent se produire, et le taux de déséquilibre quantifie cette disparité.

Taux de déséquilibre défini par NEMA (National Equipment Manufactures Association)

NEMA définit le déséquilibre de système triphasé de tension par :

$$DES_{NEMA} = \frac{\text{Déviation maximale des valeurs efficaces des tensions composées par rapport à la Valeur moyenne des valeurs efficaces des tensions composées}}{\text{Valeur moyenne des valeurs efficaces des tensions composées}} \times 100$$

On peut obtenir ce taux de déséquilibre dans un réseau électrique triphasé, comme suit :

1. Mesurer les trois tensions efficaces composées (phase-phase).
2. Calculer la tension moyenne.
3. Déterminer la tension qui présente le plus grand écart par rapport à la tension moyenne calculée.
4. Calculer le rapport entre cet écart et la tension moyenne.

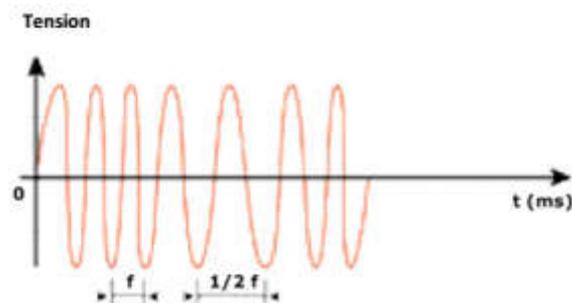
Si le rapport est supérieur à 2 %, un problème de déséquilibre de tension triphasée est considéré existant.

Exemple

1. Tensions mesurées entre phases : $V_{ab} = 600 \text{ V}$; $V_{bc} = 630 \text{ V}$; $V_{ca} = 570 \text{ V}$
2. $V_{moyenne} = (600 + 630 + 570) / 3 = 600 \text{ V}$
3. $\Delta V = 630 \text{ V} - 600 \text{ V} = 30 \text{ V}$
4. $DES_{NEMA} = (30 \text{ V} \div 600 \text{ V}) \times 100 = 5 \%$ (déséquilibre très élevé)

4- Les variations de fréquence

Ce type de perturbation est extrêmement rare, il peut s'observer lorsque la somme des puissances produites dans le réseau électrique est différente de celle consommée.



5- Harmoniques et interharmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale (50Hz ou 60Hz), d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. De la superposition de ces ondes sur l'onde fondamentale, il en résulte une déformation de cette dernière. Cette déformation est dite 'Distorsion harmonique'.

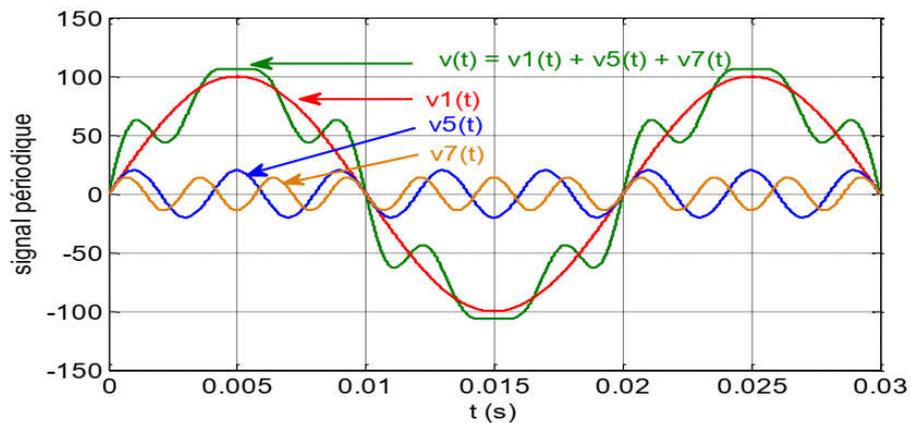


Figure 2.7 Synthèse d'un signal à partir des harmoniques

Origines :

Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires provenant d'équipements intégrant comme les éléments d'électronique de puissance de base (diode, thyristors,...etc.), des résistances non linéaires, des transformateurs saturés...etc. dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente. 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.

Les interharmoniques sont des ondes également sinusoïdales, mais de fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. Ils sont aussi responsables de distorsions harmoniques et leurs sources principales sont les convertisseurs statiques de fréquence, les fours à induction, les fours à arc ...etc.

4.1 Distorsions harmoniques :

On appelle distorsion harmonique toute déviation en régime permanent, de la forme sinusoïdale idéale de l'onde tension ou de courant.

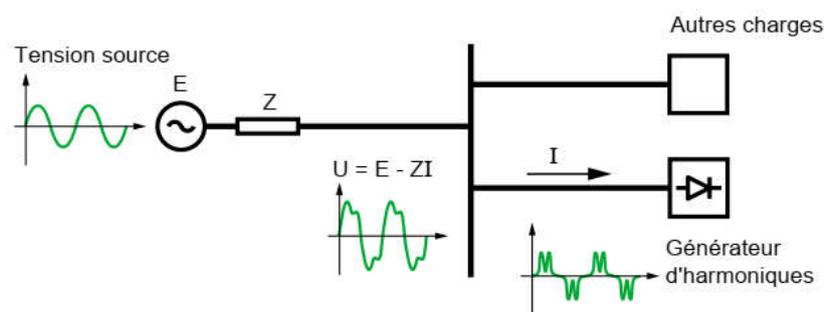


Figure 2.8 dégradation de la tension du réseau par une charge non linéaire

Effets :

Les conséquences des harmoniques peuvent être instantanées ou à long terme.

Les effets instantanés :

- Troubles fonctionnels de synchronisation ou de commutation,
- Des disjonctions intempestives.
- Erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie,
- voir même la destruction d'équipements (condensateurs, disjoncteur).
- Vibrations et bruits des appareils électromagnétiques.

- bruit dans les réseaux de télécommunication et nuisance à la qualité de l'image (téléviseur) et du son

Les effets à long terme :

L'effet à terme le plus important est de nature thermique, qui se traduit par l'échauffement conduisant à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- Echauffement des câbles et des équipements (transformateurs, moteurs,...etc :
- Echauffement des condensateurs causé par les pertes par hystérésis, dans le diélectrique.
- Echauffements des machines tournantes (causés par les pertes statorique et rotorique) , et des transformateurs.

6-Résumé des perturbations et leurs origines

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

■ : Phénomène occasionnel ■ : Phénomène fréquent

Partie 2 : Effets des Perturbations

Introduction

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

- ✚ Effets instantanés : manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, mauvais fonctionnement ou arrêt d'une machine.
- ✚ Effets différés : pertes énergétiques, vieillissement accéléré du matériel dû aux échauffements et Aux efforts électrodynamiques supplémentaires engendrés par les perturbations.

1 Effets des creux de tension et coupures

Les principales conséquences des creux de tension et coupures sur les principaux équipements utilisés dans les secteurs industriels, tertiaires et domestiques :

1.1 Moteur asynchrone

- ❖ Lors d'un creux de tension, le couple d'un moteur asynchrone (proportionnel au carré de la tension) diminue brutalement et provoque un ralentissement, le moteur peut s'arrêter (décrocher) si le couple moteur devient inférieur au couple résistant.
- ❖ Après une coupure, le retour de la tension engendre un appel de courant de réaccélération proche du courant de démarrage et dont la durée dépend de la durée de la coupure.
- ❖ Lorsque l'installation comporte de nombreux moteurs, leurs réaccélérations simultanées peuvent provoquer une chute de tension dans les impédances amont du réseau qui allonge la durée du creux et peut rendre la réaccélération difficile (redémarrages longs avec suréchauffement) voire impossible (couple moteur inférieur au couple résistant).
- ❖ Ces surintensités et les chutes de tension qui en découlent ont des conséquences pour le moteur (échauffements supplémentaires et efforts électrodynamiques dans les bobines pouvant engendrer des ruptures d'isolation et des à-coups sur le couple avec des contraintes mécaniques anormales sur les accouplements et les réducteurs d'où une usure prématurée voire une rupture) mais aussi sur les autres équipements tels que les contacteurs (usure voire soudure des contacts).
- ❖ Les surintensités peuvent conduire au déclenchement des protections générales de l'installation provoquant ainsi l'arrêt du procédé.

1.2 Moteur synchrone

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

1.3 Actionneurs

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

1.4 Equipements de type informatique

- ❖ Les équipements informatiques (ordinateurs, appareils de mesure) occupent aujourd'hui une place prépondérante dans la surveillance et le contrôle-commande des installations, la gestion, la production. Ces équipements sont tous sensibles aux creux de tension dont la profondeur est supérieure à 10 % de U_n . La courbe ITI (Information Technology Industry Council) indique, dans un plan durée-amplitude, la tolérance typique des équipements informatiques aux creux de tension, coupures et surtensions. Le fonctionnement en dehors de ces limites conduit à des pertes de données, commandes erronées, arrêt ou panne des appareils.

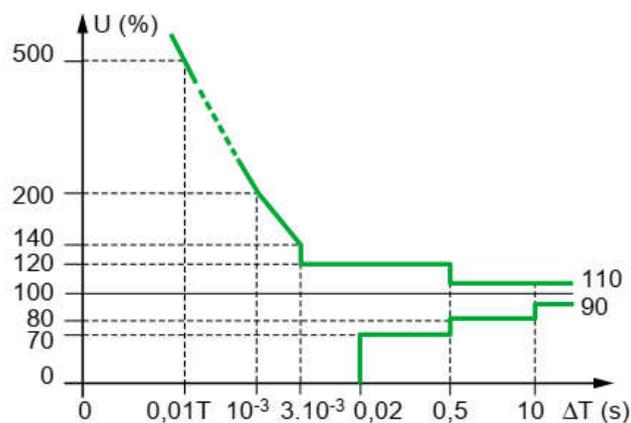


Fig. 4 : tolérance typique définie par la courbe ITI

1.5 Machines à vitesse variable

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

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

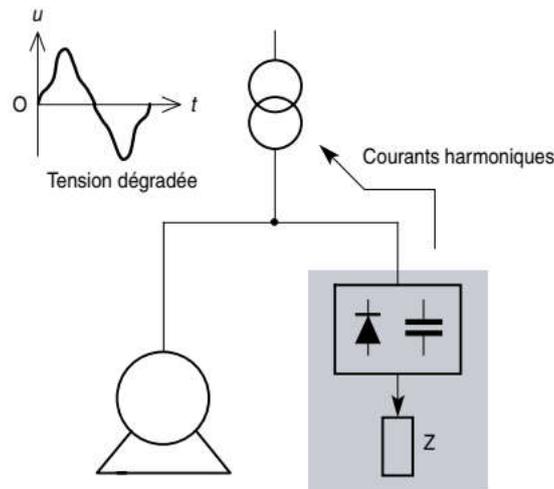
Les variateurs de vitesse se mettent généralement en défaut pour une chute de tension supérieure à 15 %.

1.6 Eclairage

- ❖ Les creux de tension provoquent un vieillissement prématuré des lampes à incandescence et des tubes fluorescents.
- ❖ Les creux de tension de profondeur supérieure ou égale à 50 % et dont la durée est de l'ordre de 50 ms provoquent l'extinction des lampes à décharge.

2- Effets des Harmoniques

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance, suivant la loi d'Ohm, à des tensions harmoniques, qui vont s'ajouter, ou se déduire, de la tension fondamentale générée par le réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale et de plus cette tension est commune à tous les autres récepteurs du réseau. La pollution alors présente sur le réseau de distribution est néfaste pour le bon fonctionnement de tous les récepteurs raccordés sur ce même réseau.



La norme fixe les valeurs de tensions harmoniques à ne pas dépasser pour assurer le fonctionnement correct des récepteurs. Dans le cadre de la fourniture d'électricité, les taux de tensions harmoniques ne doivent pas dépasser les valeurs précisées dans le tableau suivant. Ces valeurs représentent des taux individuels calculés par rapport au fondamental à 50 Hz, sachant que le taux global d'harmonique en tension ne doit pas dépasser **8 %** dans une installation de distribution basse tension. Les valeurs de taux d'harmonique individuel sont données dans le tableau suivant.

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
Rang	$V_k(\%)$	Rang	$V_k(\%)$	Rang	$V_k(\%)$
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5*25/k$				

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

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

- ❖ Une dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie),
- ❖ Un surdimensionnement des équipements,
- ❖ Une perte de productivité (vieillesse accélérée des équipements, déclenchements intempestifs).
Au-delà d'un taux de distorsion harmonique de tension de 8 % les dysfonctionnements sont probables. Entre 5 et 8 %, les dysfonctionnements sont possibles.

2.1 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. Si la fréquence propre de l'ensemble condensateur-réseau amont est proche d'un rang harmonique, il y a résonance et amplification de l'harmonique correspondant.
- ✓ Perte de précision des appareils de mesure.

2.2 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.
- ✓ Les condensateurs sont particulièrement sensibles aux harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang des harmoniques.
- ✓ Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...).
- ✓ Une surcharge et un échauffement supplémentaire du conducteur de neutre peuvent être la conséquence de la présence de courants d'harmoniques 3 et multiples de 3 présents dans les conducteurs de phases qui s'ajoutent dans le neutre.

Le tableau ci-dessous résume les principaux effets des harmoniques :

Matériels Effets	Matériels Effets
Condensateurs de puissance	Echauffement, Vieillesse 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'harmoniques 3).
Ordinateurs	Troubles fonctionnels.
Electronique de puissance	Troubles liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).

3 Effets des Surtensions

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, ... :

- ❖ 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 réseaux aériens sont les plus affectés par la foudre, mais les installations alimentées par des réseaux souterrains peuvent subir des contraintes de tension élevées en cas de Foudroiement à proximité du site.
 - ✓ Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. Elles peuvent conduire à des dégradations aussi importantes que la foudre.

4 Effets des Variations et fluctuations de tension :

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est :

- ❖ La fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker) : 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.
- ❖ Les variations de la valeur efficace de tension peuvent avoir des effets indésirables sur le couple et la vitesse des machines tournantes,

5 Effets du Déséquilibre :

- ❖ Défauts de fonctionnement
- ❖ Vibrations, bruits
- ❖ Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible.
- ❖ Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée.
- ❖ Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition des harmoniques de rang multiple de 3.
- ❖ 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 des câbles et de la machine.

