

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الإلكترونيات  
Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie      Filière : Électrotechnique      Spécialité : Commande Électrique

Thème

## Les perturbations électriques en BT

Présenté par :

- 1) M. AOUABDI Mohamed Diaa Eddine
- 2) M. TAAMOURT Mohammed El Amine

Soutenu le 25/06/2025. Devant le jury composé de :

M.ZELMAT Samir	Professeur	UAT.B.B	Président
Mme.ADJOUDJ Labiba	Maître de conférences B	UAT.B.B	Examinatrice
M.Berrached Djelloul	Maître de conférences B	UAT.B.B	Encadrant

*Année Universitaire 2024/2025*

## *Dédicace*

*A mes parents avec toute ma gratitude pour toutes ces années de sacrifices  
et d'encouragement*

*A mes amis*

*A tous ceux que j'aime*

*Je dédie ce travail.*

# Sommaire

Résumé .....	i
Liste des figures .....	ii
Liste des tableaux .....	iii
Nomenclature .....	iv
Introduction générale.....	1
Chapitre I : les tensions industrielles BT et les perturbations d'amplitude.....	1
I.1 Introduction : .....	3
I.2 Les tensions industrielles en BT : .....	3
I.2.1 Les tensions nominales : .....	3
I.2.2 La fréquence : .....	4
I.2.3 Le réseau de livraison BT : .....	4
I.3 Les perturbations d'amplitude : .....	4
I.4 Les creux de tension et les coupures brèves : .....	5
I.4.1 Causes amont des creux de tension et coupures brèves en BT : .....	6
I.4.2 Perturbations liées à l'exploitation et aux défauts sur les réseaux BT :.....	9
I.5 Les surtensions : .....	11
I.5.1 Les surtensions dans les réseaux basse tension : .....	11
I.5.2 Les surtensions internes : .....	12
I.5.3 Les surtensions externes atmosphériques : .....	12
I.5.4 Manœuvres de l'appareillage et fonctionnement des protections BT :.....	15
I.5.5 Essais et remèdes relatifs aux surtensions : .....	18
I.6 Conclusion : .....	19
Chapitre II : les perturbations de l'onde sinusoïdale.....	20
II.1 Introduction : .....	20
II.2 Les générateurs : .....	21
II.3 Les transformateurs : .....	22
II.4 Les récepteurs .....	23
II.4.1 Les condensateurs :.....	23
II.4.2 Les tubes fluorescents : .....	23
II.4.3 Les redresseurs à commande de phase : .....	24
II.5 Les alimentations à découpage : .....	25
II.6 Les fours à arcs industriels : .....	26

II.7 Les courants porteurs :.....	26
II.7.1 Définition et fonctionnement générale : .....	26
II.7.2 Applications principales des CPL : .....	26
II.7.3 Une multitude de noms et d'Applications : .....	27
II.7.4 Principe de Fonctionnement des CPL : .....	27
II.8 Les perturbations harmoniques dans les réseaux BT : .....	28
II.8.1 Définition et origine des harmoniques.....	28
II.8.2 Conséquences des harmoniques : .....	29
II.8.3 Caractérisation des perturbations harmoniques .....	29
II.9 Conclusion : .....	31
Chapitre III : les perturbations particulières aux systèmes polyphasés et électromagnétiques	32
III.1 Introduction : .....	32
III.2 Les déséquilibres de courant et tension : .....	32
III.2.1 Origine du déséquilibre : .....	32
III.2.2 Conséquences du déséquilibre : .....	32
III.2.3 Réglementation : .....	33
III.3 Les déséquilibres de phase : .....	33
III.4 Les perturbations électromagnétiques : .....	34
III.4.1 Les sources de perturbations et les moyens de propagation.....	34
III.4.2 Les perturbations électromagnétiques en électronique de puissance : .....	37
III.5 Décharges électrostatiques : .....	38
III.5.1 Définition d'une décharge électrostatique : .....	38
III.5.2 Décharge électrostatique test d'immunité : .....	39
III.5.3 Effets des décharges électrostatiques sur les dispositifs électroniques : .....	39
III.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques : .....	41
III.6.1 Solutions de dépollution traditionnelles : .....	41
III.6.2 Solutions de dépollution modernes : .....	44
III.7 Conclusion : .....	45
Conclusion générale .....	46

## ملخص

تتناول هذه الدراسة الببليوغرافية الاضطرابات الكهربائية في شبكات الجهد المنخفض، مثل التغيرات في السعة (انخفاضات الجهد، الارتفاعات المفاجئة)، التشوهات في الموجة الجيبية (التوافقيات، الحوامل الترددية)، عدم التوازن في الأنظمة متعددة الطور والاضطرابات الكهرومغناطيسية، التي تشكل تحديات كبيرة. تدور دراستهم حول تحديد أصولها وتأثيرها على المعدات والحلول التقنية المناسبة. من خلال التحليلات النظرية، يقترح هذا العمل منهجية صارمة لتشخيص هذه الاضطرابات، والوقاية منها، وتصحيحها، مما يضمن جودة أفضل للطاقة والامتثال للمعايير.

## Abstract

This bibliographic study focuses on electrical disturbances in low-voltage networks, such as amplitude variations (voltage dips, surges), distortions of the sinusoidal wave (harmonics, carrier currents), imbalances in polyphase systems, and electromagnetic disturbances, which pose major challenges. Their study revolves around identifying their origins, their impact on equipment, and appropriate technical solutions. Through theoretical analyses, this work proposes a rigorous methodology to diagnose, prevent, and correct these disturbances, ensuring better energy quality and compliance with standards.

## **Résumé**

Cette étude bibliographique porte sur les perturbations électriques des réseaux basse tension, telles que les variations d'amplitude (creux de tension, surtensions), les distorsions de l'onde sinusoïdale (harmoniques, courants porteurs), les déséquilibres dans les systèmes polyphasés et les perturbations électromagnétiques, qui posent des défis majeurs. Leur étude s'articule autour de l'identification de leurs origines, de leur impact sur les équipements et des solutions techniques adaptées. À travers des analyses théoriques, ce travail propose une méthodologie rigoureuse pour diagnostiquer, prévenir et corriger ces perturbations, garantissant une meilleure qualité d'énergie et une conformité aux normes.

# Liste des figures

## CHAPITRE I

Fig. (I-1) : creux de tension ( $\Delta v$ ) et coupure [1] .....	5
Fig. (I-2) : variations de tension lors des réenclenchements rapides et lents sur un réseau de distribution MT. [1] .....	7
Fig. (I-3) : élimination d'un défaut monophasé par un disjoncteur shunt qui en court-circuitant le défaut permet l'extinction de l'arc [1] .....	8
Fig. (I-4) : alimentation MT en double dérivation. Dans l'encadré, séquence de l'automatisme d'un permutateur Merlin Gerin conforme aux spécifications EDF (France). [1] .....	8
Fig. (I-5) : alimentation MT en boucle ouverte (coupure d'artère). [1] .....	9
Fig. (I-6) : principaux types de coupure et creux de tension. [1] .....	10
Fig. (I-7) : Caractéristiques d'une onde de surtension [8] .....	11
Fig. (I-8) : Exemple de surtensions [8] .....	12
Fig. (I-9) : nombre et valeur des surtensions statistiquement possibles selon le niveau d'exposition à la foudre. [1] .....	13
Fig. (I-10) : schéma TTN des liaisons à la terre d'un poste MT/BT (mises à la terre communes de l'éclateur, de la masse du transformateur et du neutre BT), et transmission de l'onde de foudre vers le réseau BT. [1] .....	14
Fig. (I-11) : poste MT/BT « haut de poteau ». Schéma TTS des liaisons à la terre d'un poste MT/BT (mises à la terre séparées de l'éclateur, de la masse du transformateur et du neutre BT). Ce SLT est ITS si un limiteur de surtension est inséré dans la liaison à la terre du neutre BT. [1] .....	14
Fig. (I-12) : prises de terre d'un poste MT/BT alimenté par des lignes aériennes [1] .....	15
Fig. (I-13) : fréquences et valeurs crête des surtensions dues à la foudre sur des installations BT (source : Landis et Gyr). [1] .....	15
Fig. (I-14) : schéma équivalent d'un relais. [1] .....	15
Fig. (I-15) : schéma équivalent d'un circuit monophasé [1] .....	16
Fig. (I-16) : avec une même puissance de court-circuit amont, les niveaux et les durées des surtensions sur un départ sont fonction du calibre de sa protection, et de la section de ses conducteurs. [1] .....	17
Fig. (I-17) : les principales formes d'ondes d'essai normalisées [1] .....	18

## CHAPITRE II

Fig. (II-1) : Onde sinusoïdale de 60 Hz sans distorsion. [15] .....	20
Fig. (II-2) : Exemples de distorsion typique de la qualité de l'énergie. [15] .....	21
Fig. (II-3) : exemple d'onde de tension délivrée par des générateurs « Bon marché » .....	22
Fig. (II-4) : onde de courant à vide absorbée par un transformateur calculé trop juste. ....	22
Fig. (II-5) : Forme de l'onde de courant absorbé par une lampe fluo-compacte [23] .....	24

Fig. (II-6) : Ondes de tension et de courant déformées par un redresseur à commande de phase. [1] .....	25
Fig. (II-7) : Principe de la transmission par courants porteurs. [30] .....	27
Fig. (II-8) : image d'une onde déformée. [6]. .....	28
Fig. (II.9): Diagramme de Fresnel des puissances [3].....	30

### CHAPITRE III

Fig. (III-1) : Le déséquilibre de la tension et du courant [9] .....	32
Fig. (III -2) : effet d'un déséquilibre de tension sur un redresseur en pont de Graetz semi-contrôlé. [1] .....	34
Fig. (III -3) : tension induite par un courant [1] .....	36
Fig. (III -4) : exemple d'un champ électrique [1].....	36
Fig. (III -5) : exemple d'impédance d'onde pour un bipôle. [1] .....	37
Fig. (III -6) : modélisation du circuit de charge électrostatique d'une personne. [1].....	40
Fig. (III -7) : courant de décharge électrostatique ( $t_m = 5 \text{ ns}$ , $T = 30 \text{ ms}$ ). [1] .....	40
Fig. (III -8) : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage .....	41
Fig. (III -9) : Filtre passif résonnant .....	42
Fig. (III -10) : Schéma équivalent monophasé d'un filtre amorti. ....	43

### Liste des tableaux

Tableau (I-1) : valeur des courants d'enclenchement et constante de temps des transformateurs MT/BT lors d'un enclenchement côté MT (lors d'un enclenchement côté BT, « ne » est 2 fois plus élevé).[1].....	6
Tableau (I-2) : différents types de permutation et leurs durées [1] .....	10
Tableau (I-3) : surtensions relevées avec deux dispositifs de protection testés sur la même installation d'essais. [1].....	17
Tableau (I-4) : caractéristiques de différents types de limiteurs de surtension. [1].....	19

## Nomenclature

**FAP** : Filtre actif parallèle.

**FAS** : Filtre actif série.

**THD** : (En anglais : Total Harmonic distortion).

**P** : la puissance active.

**Q** : la puissance réactive.

**S** : la puissance apparente.

**L** : Inductance.

**C** : Capacité.

**R** : Résistance.

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Les réseaux à basse tension, qui représentent le lien principal entre le réseau électrique et les utilisateurs finaux, font face aujourd'hui à des enjeux techniques et écologiques significatifs. Ces réseaux, qui sont essentiels pour la distribution d'électricité, font face à une pollution de plus en plus importante et à divers chocs extérieurs. C'est principalement dû à la progression fulgurante des technologies et à la croissance ininterrompue du nombre d'appareils électroniques, souvent délicats, reliés au réseau.

Effectivement, les appareils contemporains, qu'ils soient de nature électrotechnique ou électronique, opèrent avec des signaux électriques de plus en plus ténus et exacts. Cela les rend particulièrement sensibles aux brouillages électromagnétiques qui peuvent survenir dans leur environnement. Ironiquement, ces dispositifs peuvent parfois nuire à la qualité de l'alimentation électrique, engendrant un cycle néfaste d'émissions et de vulnérabilité aux perturbations.

La demande grandissante en termes de disponibilité, de fiabilité et de qualité de l'électricité, qu'elle soit destinée à la production, à la gestion ou aux opérations commerciales, renforce encore plus l'exigence d'une fourniture stable et conforme. Toutefois, afin de répondre à ces exigences et pour éviter les dysfonctionnements ou même les destructions d'équipements délicats, il est essentiel de déchiffrer et d'étudier la source des perturbations électriques. Cette connaissance nous permet de repérer les risques, de suggérer des remèdes appropriés et ainsi, d'améliorer ce que l'on pourrait nommer le « produit électricité ».

Cette étude bibliographique se positionne dans l'immense champ d'étude de la compatibilité et de l'immunité électromagnétiques, un domaine qui couvre des enjeux allant de la fréquence de 50 Hz aux fréquences radioélectriques. Cette étude vise à examiner les paramètres cruciaux pour définir une alimentation électrique et leurs défauts majeurs, en particulier :

- *Amplitude : variations, coupures, creux, surtensions.*
- *Fréquence : variations autour de la fréquence nominale.*
- *Forme d'onde : présence d'harmoniques, transitoires, courants porteurs.*
- *Phase : déséquilibres entre les différentes phases.*
- *Puissance : effets des courts-circuits et surcharges sur la tension.*

Ce travail se compose de trois chapitres, chacun abordant une facette spécifique des perturbations électriques en basse tension :

### **Chapitre 1 : Les tensions industrielles BT et les perturbations d'amplitude**

Une analyse des caractéristiques et des contraintes des systèmes basse tension, qui constituent la base des réseaux électriques modernes avec une étude des variations de tension, creux, surtensions et leurs impacts sur les installations.

### **Chapitre 2 : Les perturbations de l'onde sinusoïdale**

Exploration des harmoniques et des transitoires qui altèrent la qualité du signal électrique.

### **Chapitre 3 : Les perturbations dans les systèmes polyphasés et électromagnétiques**

Les déséquilibres de tension et de courant dans les systèmes triphasés, ainsi que les perturbations électromagnétiques, sont analysés pour identifier leurs causes et impacts sur les équipements. Des solutions techniques et réglementaires sont proposées pour limiter leurs effets, améliorer la qualité de l'énergie et protéger les installations.

# **Chapitre I :**

## **Les tensions industrielles BT et les perturbations d'amplitude**

## I.1 Introduction :

Les réseaux électriques en basse tension (BT), conçus en triphasé à 50 ou 60 Hz, constituent la base de l'alimentation énergétique dans les environnements industriels et domestiques. Leur qualité dépend de plusieurs paramètres tels que l'amplitude, la fréquence, la forme d'onde et la symétrie. Cependant, ces réseaux sont soumis à diverses perturbations, notamment celles affectant l'amplitude de la tension, qui peuvent altérer la stabilité et la fiabilité des installations, voire endommager les équipements sensibles. Comprendre ces perturbations et leurs effets est donc essentiel pour garantir une alimentation électrique de qualité.

## I.2 Les tensions industrielles en BT :

Tensions dans un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé avec une fréquence fondamentale de 50 Hz ou 60 Hz. Ce système se caractérise par plusieurs paramètres essentiels

- La fréquence du réseau,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde, qui doit se rapprocher idéalement d'une sinusoïde parfaite,
- La symétrie du système triphasé, déterminée par l'égalité des amplitudes des trois tensions et leur déphasage respectif. [3]

Les réseaux basse tension (BT) sont soumis à de nombreuses perturbations électriques qui peuvent altérer la qualité de l'alimentation électrique et affecter le bon fonctionnement des équipements. L'essor des appareils électroniques sensibles et l'augmentation des exigences de disponibilité rendent ces phénomènes encore plus critiques.

Variations de tension, surtensions, harmoniques ou encore déséquilibres de phase sont autant de facteurs pouvant entraîner des dysfonctionnements, voire des dommages matériels. Comprendre ces anomalies et leurs origines est essentiel pour concevoir des installations robustes et conformes aux normes, garantissant ainsi la fiabilité et la protection des équipements dans un environnement électrique de plus en plus contraignant. [1]

### I.2.1 Les tensions nominales :

Les tensions nominales en basse tension (BT) couvrent différentes valeurs selon les régions et les normes en vigueur. Elles concernent les tensions alternatives jusqu'à 1 000 V (avec une fréquence pouvant atteindre 10 kHz)

Et les tensions continues jusqu'à 1 500 V. Aussi appelées « tensions assignées », elles sont définies par la publication CEI 60038 de 1983. La tension BT la plus courante est le « 230/400 V », qui a été officialisée dans plusieurs pays.

Comme l'Europe en Algérie : 220/380 50Hz

Ces tensions varient en fonction de plusieurs facteurs tels que la structure du réseau, la longueur des conducteurs, la charge électrique et les systèmes de régulation.

En Europe, la norme applicable spécifie qu'en exploitation normale, sur une période d'une semaine, 95 % des valeurs moyennes mesurées sur 10 minutes doivent rester dans la plage de  $U_n \pm 10\%$ . Toutefois, des écarts temporaires allant au-delà de  $\pm 20\%$  peuvent être observés, notamment en cas d'instabilité du réseau. [1]

### I.2.2 La fréquence :

Concernant la fréquence, les variations autour des valeurs nominales de 50 ou 60 Hz sont généralement faibles pour les réseaux bien interconnectés. En **Europe**, il est courant d'observer une tolérance de  $50\text{ Hz} \pm 1\%$  sur 95 % d'une semaine. En cas de perturbations sévères, des écarts plus importants peuvent survenir, notamment sur des réseaux isolés comme ceux alimentant certaines zones éloignées ou des infrastructures autonomes. [1]

### I.2.3 Le réseau de livraison BT :

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230V (380/220 en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement. Le réseau BT permet de distribuer au consommateur ; le 230 V (1 phase + neutre) - 2 fils, ou le 400 V (3 phases + neutre) - 4 fils. [2]

## I.3 Les perturbations d'amplitude :

Les réseaux basse tension (BT) subissent en permanence des variations de charge dues au fonctionnement normal des équipements. Toutefois, des perturbations plus marquées peuvent survenir, principalement à la suite d'événements aléatoires comme des courts-circuits, des défauts d'isolement ou des surtensions transitoires.

Les perturbations électriques dans un réseau BT peuvent être regroupées en quatre grandes catégories :

#### Fluctuations de la fréquence (50 Hz) :

- Rares et observées seulement dans des circonstances exceptionnelles (défauts graves dans la production ou le transport d'énergie).

#### Variations de l'amplitude de la tension :

- Ne concernent pas les variations lentes corrigées par les transformateurs de réglage en charge.
- Incluent des variations rapides (à-coups brusques) et des creux de tension, qui peuvent être isolés ou répétitifs, réguliers ou irréguliers.

Modification de la forme d'onde :

- La tension devient non sinusoïdale.
- Elle peut être composée de l'onde fondamentale à 50 Hz associée à
  - Des harmoniques (fréquences multiples de 50 Hz).
  - Des ondes de fréquence arbitraire.

Dissymétrie dans un système triphasé :

- Appelée aussi déséquilibre, elle se traduit par une répartition inégale des tensions ou des courants entre les phases.[3]

Certaines de ces perturbations, notamment celles qui affectent l'amplitude de la tension, sont particulièrement critiques pour les équipements sensibles. Les deux principales perturbations d'amplitude en BT sont les creux de tension et coupures brèves, ainsi que les surtensions. Ces phénomènes peuvent entraîner des dysfonctionnements, voire des dommages graves aux appareils connectés.[1]

**I.4 Les creux de tension et les coupures brèves :**

Un creux de tension correspond à une diminution soudaine de la tension d'alimentation  $U_f$ , comprise entre **90 % et 10 %** de la tension nominale  $U_n$ , suivie d'un retour rapide à la normale. Sa durée peut varier entre **10 ms et 3 minutes**. En général, la plupart des équipements électriques tolèrent une coupure totale de moins de **10 ms** sans impact significatif. [4]

Les coupures brèves correspondent à la perte momentanée de la tension d'alimentation sur toutes les phases pour des durées inférieures à 1 minute. [5]

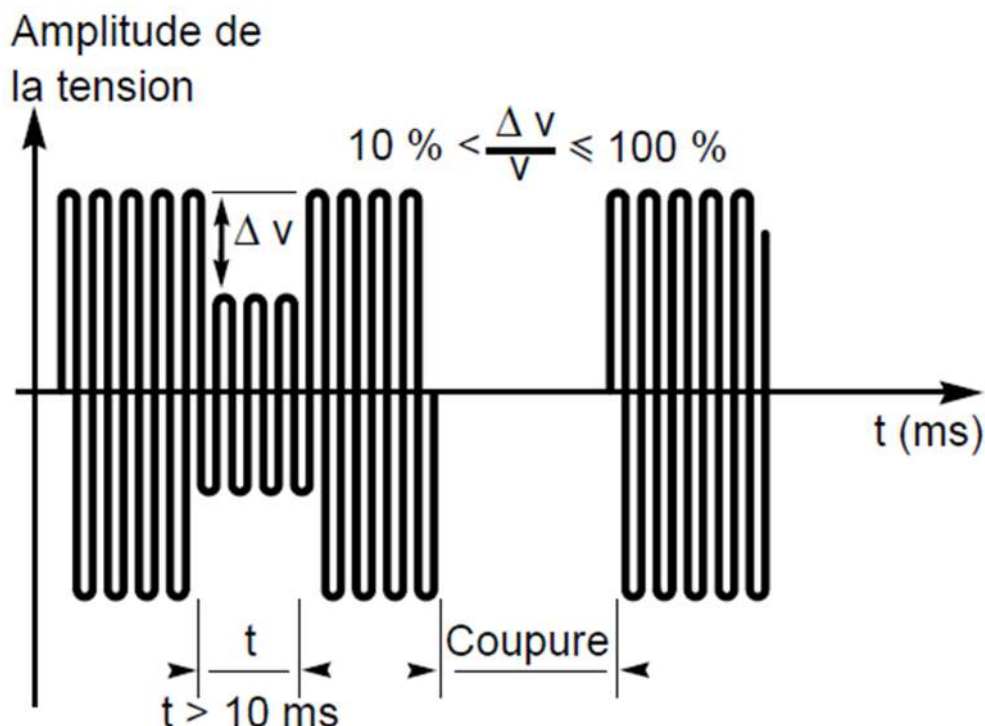


Fig. (I-1) : creux de tension ( $\Delta v$ ) et coupure [1]

### I.4.1 Causes amont des creux de tension et coupures brèves en BT :

Bien que les perturbations se manifestent en BT, leur origine est souvent liée à l'exploitation ou aux défauts sur les réseaux HT et MT. Par exemple, les modifications de la topologie des réseaux HT/MT, la mise sous tension de transformateurs, de condensateurs ou de gros moteurs peuvent provoquer des creux de tension. De même, les courts-circuits ou défauts d'isolement en HT/MT dus à des événements comme la foudre ou la rupture de câbles génèrent des chutes de tension étendues qui se répercutent jusqu'en basse tension, selon la sélectivité et la rapidité des protections.

La mise sous tension d'un transformateur MT/BT constitue un exemple typique : le courant d'enclenchement instantané peut atteindre jusqu'à 15 fois le courant nominal du transformateur, selon sa puissance. Ce phénomène, de nature transitoire mais très énergétique, peut générer un creux de tension sensible, surtout si plusieurs équipements sont mis en service simultanément ou sur un réseau déjà chargé. Tableau (I-1) ci-dessous illustre la valeur de ces courants d'appel ainsi que la constante de temps associée, en fonction de la puissance du transformateur. [1]

*Tableau (I-1) : valeur des courants d'enclenchement et constante de temps des transformateurs MT/BT lors d'un enclenchement côté MT (lors d'un enclenchement côté BT, « ne » est 2 fois plus élevé).[1]*

P (KVA)	ne = $\frac{I_{\text{encl. crête}}}{I_n \text{ transformateur}}$	Constante de temps (s)
50	15	0,1
100	14	0,15
160	12	0,2
250	12	0,22
400	12	0,25
630	11	0,3
800	10	0,3
1000	10	0,35
1250	9	0,35
1600	9	0,4
2000	8	0,45

#### En France :

Les défauts sur les réseaux HT et MT, qu'ils soient aériens ou souterrains, sont souvent gérés par des réenclencheurs automatiques ou des disjoncteurs. Ces dispositifs permettent de traiter les défauts fugitifs sans provoquer de coupures prolongées perceptibles par les utilisateurs BT, bien que des creux de tension brefs puissent survenir.

Sur les réseaux MT aériens (5 à 20 kV) où le neutre est mis à la terre via une impédance limitant le courant homopolaire à 300 A, les disjoncteurs shunt sont utilisés pour éliminer rapidement les défauts monophasés fugitifs, tels que les contacts avec la végétation. Ces disjoncteurs court-circuitent brièvement le défaut pour éteindre l'arc sans gêner les usagers BT.

Pour les défauts polyphasés, le réseau est généralement équipé de réenclencheurs automatiques à deux étapes : un réenclenchement rapide (0,3 s), qui élimine environ 75 % des défauts, suivi, si nécessaire, d'un réenclenchement lent après environ 15 secondes. Ce processus est illustré à la Figure 2, qui montre les variations de tension typiques sur le départ en défaut ainsi que sur les autres départs.

En complément de la protection contre les défauts, les réseaux MT sont également conçus pour assurer une continuité de service maximale grâce à des schémas d'alimentation redondants. Le schéma en double dérivation, par exemple, permet de basculer automatiquement l'alimentation d'un circuit à un autre en cas de défaut sur l'arrivée principale. Ce principe est automatisé via des permutateurs conformes aux spécifications EDF.

Une autre architecture courante est celle de l'alimentation en boucle ouverte (ou coupure d'arrière), dans laquelle un point d'ouverture est maintenu pour isoler les segments. En cas de défaut, il est possible de réalimenter la zone affectée par l'autre extrémité de la boucle, garantissant ainsi une remise en service rapide pour la majorité des postes. [1]

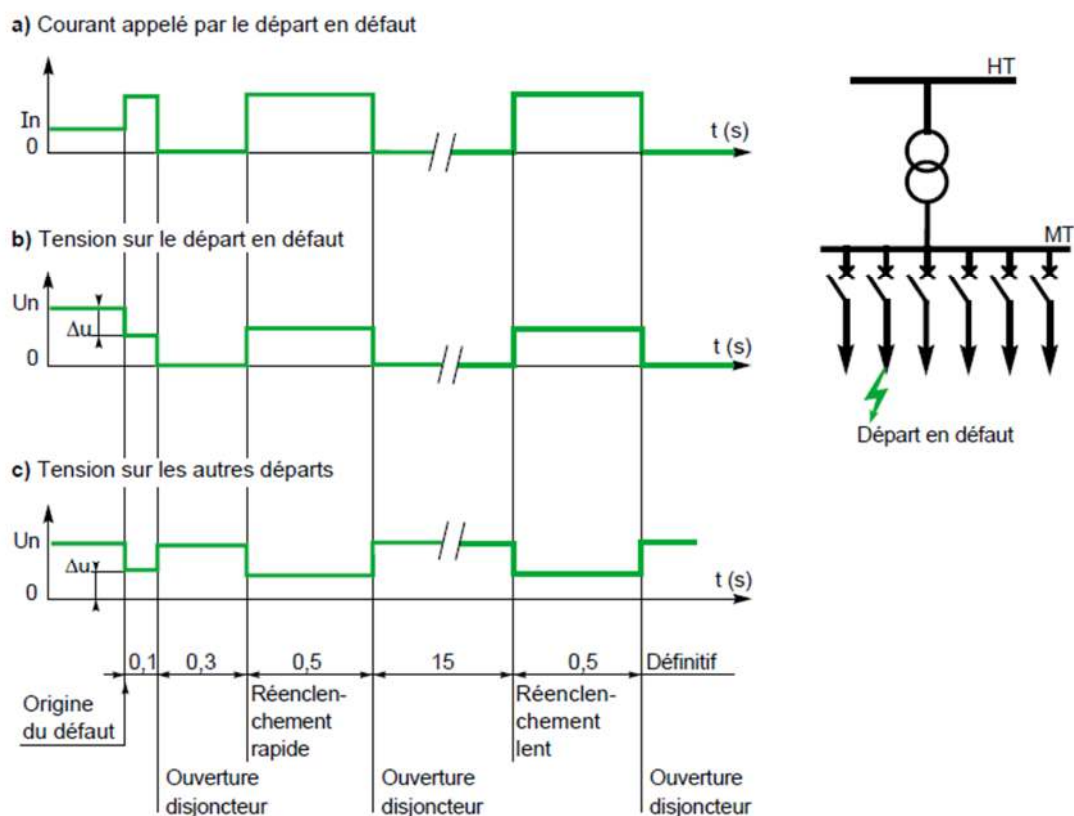


Fig. (I-2) : variations de tension lors des réenclenchements rapides et lents sur un réseau de distribution MT. [1]

Principe : Sur un réseau MT en aérien, la plupart des défauts sont fugitifs, aussi le disjoncteur en tête de chaque départ est équipé d'un automatisme qui tente deux réenclenchements (parfois trois) :

- Le premier instantanément (durée d'ouverture + fermeture : 0,3 s),
- Le second après environ 15 s

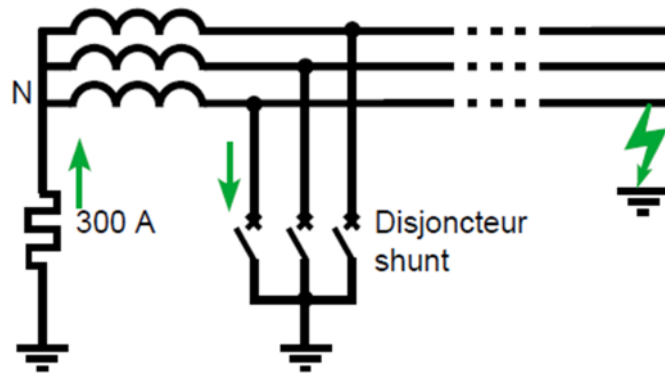


Fig. (I-3) : élimination d'un défaut monophasé par un disjoncteur shunt qui en court-circuitant le défaut permet l'extinction de l'arc [1]

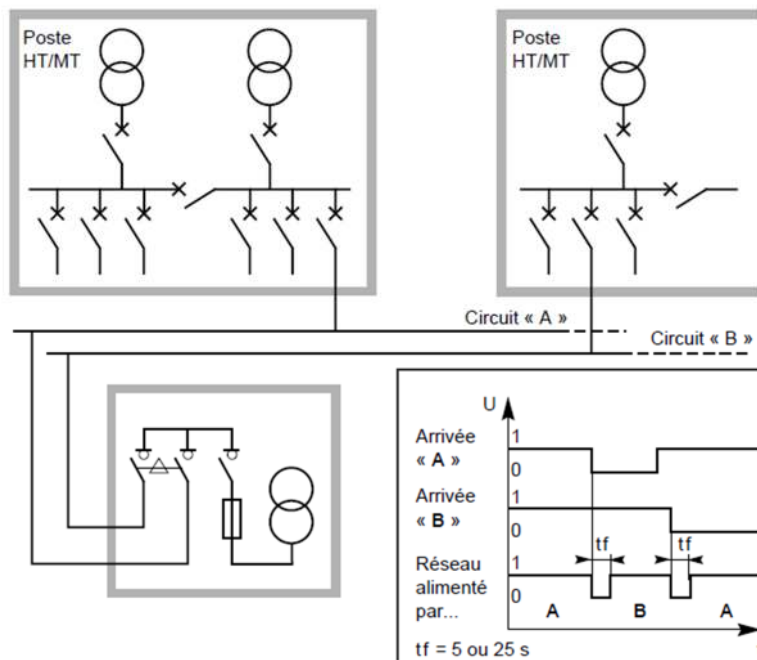


Fig. (I-4) : alimentation MT en double dérivation. Dans l'encadré, séquence de l'automatisme d'un permutateur Merlin Gerin conforme aux spécifications EDF (France). [1]

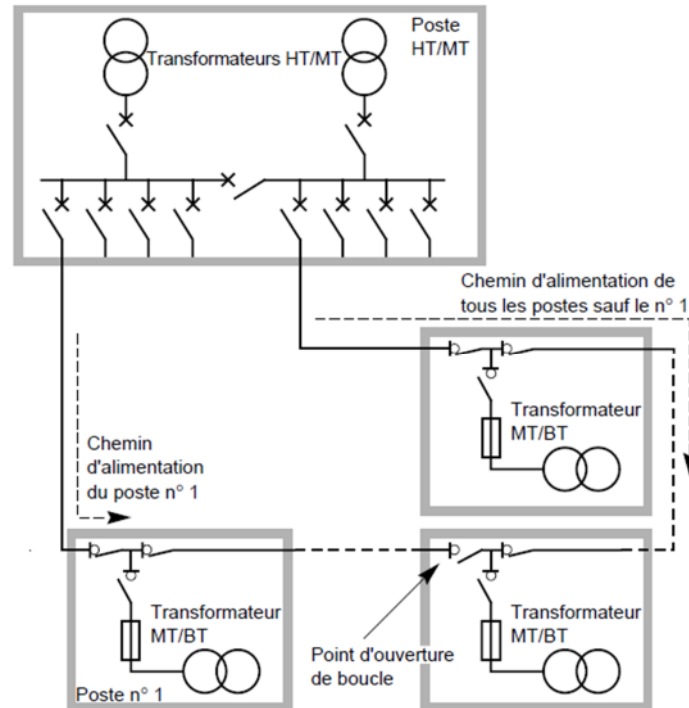


Fig. (I-5) : alimentation MT en boucle ouverte (coupure d'artère). [1]

#### I.4.2 Perturbations liées à l'exploitation et aux défauts sur les réseaux BT :

En basse tension, les perturbations ne proviennent pas uniquement des réseaux amont. Elles peuvent aussi résulter directement de l'exploitation locale du réseau. L'enclenchement brutal de condensateurs en tête de réseau ou le démarrage direct de moteurs de forte puissance — en particulier leur « reprise au vol » après une coupure — génèrent des appels de courant intenses, pouvant atteindre deux fois les 8 à 10 In d'un démarrage classique. Ces situations provoquent des creux de tension, parfois accompagnés de transitoires oscillatoires.[1]

Les coupures brèves sont également fréquentes en cas de défauts sur les réseaux BT. Un court-circuit entre conducteurs actifs ou entre phase et masse (en schéma TN) déclenche l'action des disjoncteurs. Selon la sélectivité et la puissance du départ concerné, ces coupures s'accompagnent de creux plus ou moins profonds, durant généralement de 50 à 500 ms. [1]

Dans les installations BT équipées de groupes électrogènes avec dispositif d'inversion normal/secours, la durée de la coupure peut dépasser plusieurs secondes. Ce délai inclut la temporisation au démarrage ( $T_1$ ), le temps de mise en route du groupe ( $T_d$ ) et celui de l'inversion de source ( $T$ ), pour un total pouvant atteindre 10 secondes [6][7].

Statistiquement, on observe de 1 coupure par mois à 10 creux de tension par jour en tête de réseau BT. Ces perturbations sont dans 80 % des cas d'origine HT/MT, avec une durée typique de 20 à 350 ms. Si la plupart des équipements électrotechniques y résistent, ce n'est pas toujours le cas des contacteurs, relais ou dispositifs électroniques intelligents, susceptibles de provoquer des arrêts de process ou des ordres intempestifs.[1]

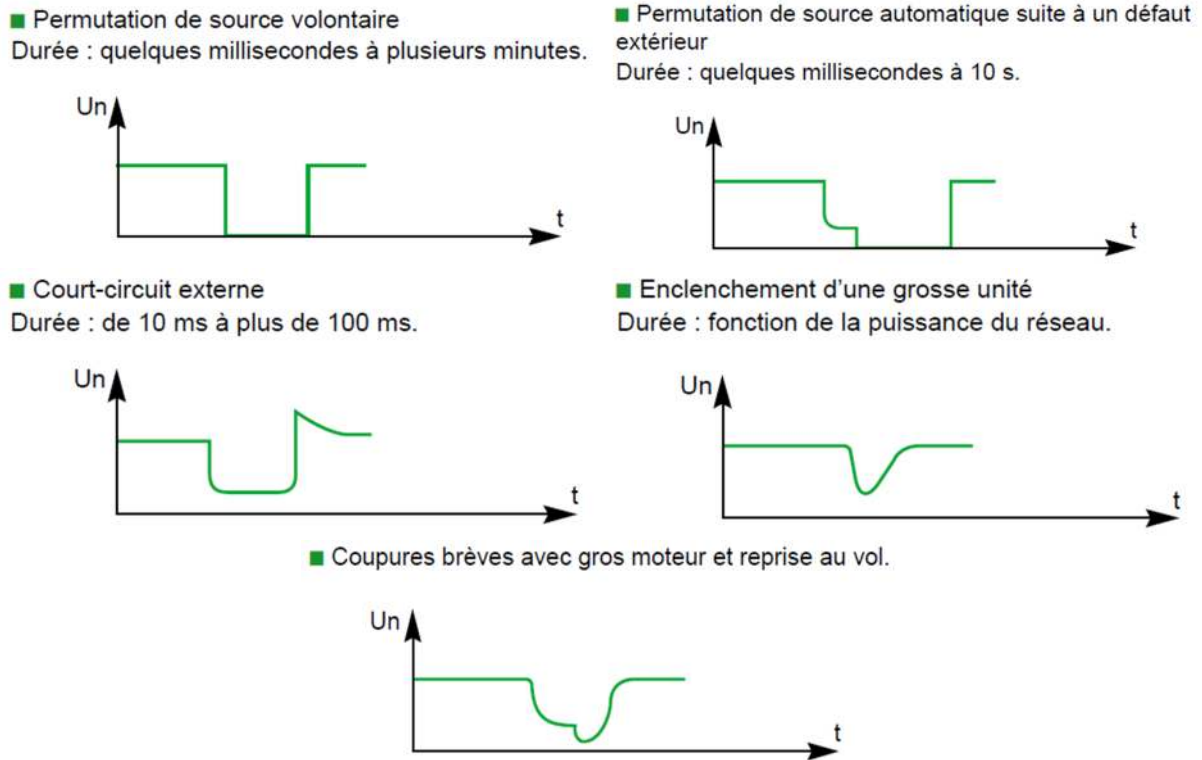


Fig. (I-6) : principaux types de coupure et creux de tension. [1]

Tableau (I-2) : différents types de permutation et leurs durées [1]

	Type de permutation			
	Synchrone	Temps mort		Pseudosynchrone
		BT	MT	
<b>Exemples d'application</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ permutation de jeux de barres,</li> <li>■ substitution d'un générateur par un autre,</li> <li>■ permutation entre une ASI et le secteur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ alimentation de pompes,</li> <li>■ alimentation des circuits auxiliaires d'un poste de transformation,</li> <li>■ alimentation des magasins à grande surface,</li> <li>■ etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ alimentation par deux arrivées MT permutables,</li> <li>■ alimentation par une source normale et une source de remplacement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ reprise au vol des moteurs asynchrones.</li> </ul>
<b>Durée de permutation</b>	nulle	0,5 à 10 s	1 à 30 s	0,06 à 0,3 s
<b>Dispositifs employés</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ coupleur,</li> <li>■ synchrocoupleur,</li> <li>■ ensemble ASI avec contacteur statique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ inverseur de source automatique à disjoncteurs.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ ensemble de cellules MT avec permutateur.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ disjoncteurs HT rapides associés à un permutateur ultra-rapide et un contrôleur de phases.</li> </ul>
<b>Observations</b>	La permutation doit être réalisée avant l'absence totale de tension de la source principale.	Les dispositifs inverseurs mentionnés ci-dessus sont généralement des ensembles montés, câblés et réglés en usine (voir par exemple le catalogue Schneider Electric).		Difficultés d'élaboration de l'ordre de permutation (présence de tension résiduelle).

## I.5 Les surtensions :

### I.5.1 Les surtensions dans les réseaux basse tension :

Les surtensions sont des phénomènes transitoires qui se superposent à la tension nominale d'un circuit électrique. Elles peuvent apparaître soit entre conducteurs actifs (mode différentiel), soit entre ces conducteurs et la masse ou la terre (mode commun).

Une surtension peut résulter d'un déséquilibre temporaire du réseau, d'une manœuvre d'appareillage, d'une décharge électrostatique, ou encore d'un phénomène atmosphérique comme la foudre. [8]

Sur le plan électrique, une surtension est caractérisée par :

- Son **amplitude** (souvent mesurée en kV),
- Son **temps de montée** (en  $\mu\text{s}$ ),
- Sa **pente de variation** (en  $\text{kV}/\mu\text{s}$ ), responsable de l'agressivité du phénomène sur les isolants et les composants sensibles (voir Fig.7). [8]

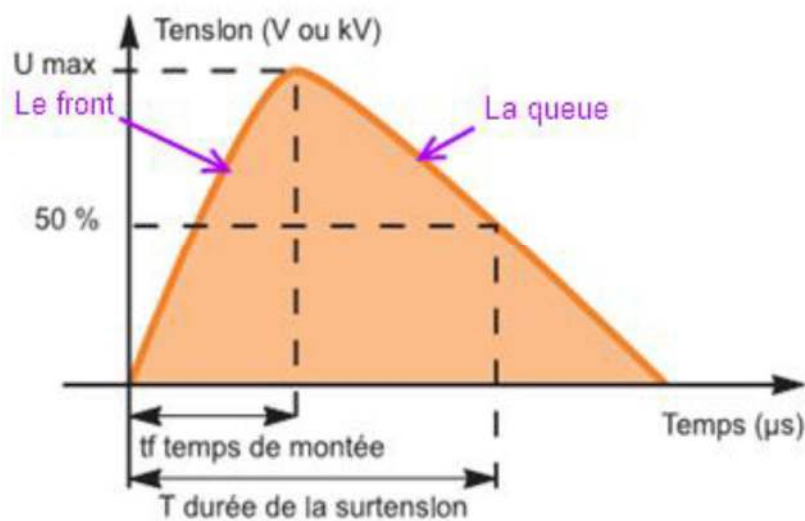


Fig. (I-7) : Caractéristiques d'une onde de surtension [8]

Elle produit également un **rayonnement électromagnétique** et un **pic d'énergie**, potentiellement destructeur pour les équipements non protégés. [8]

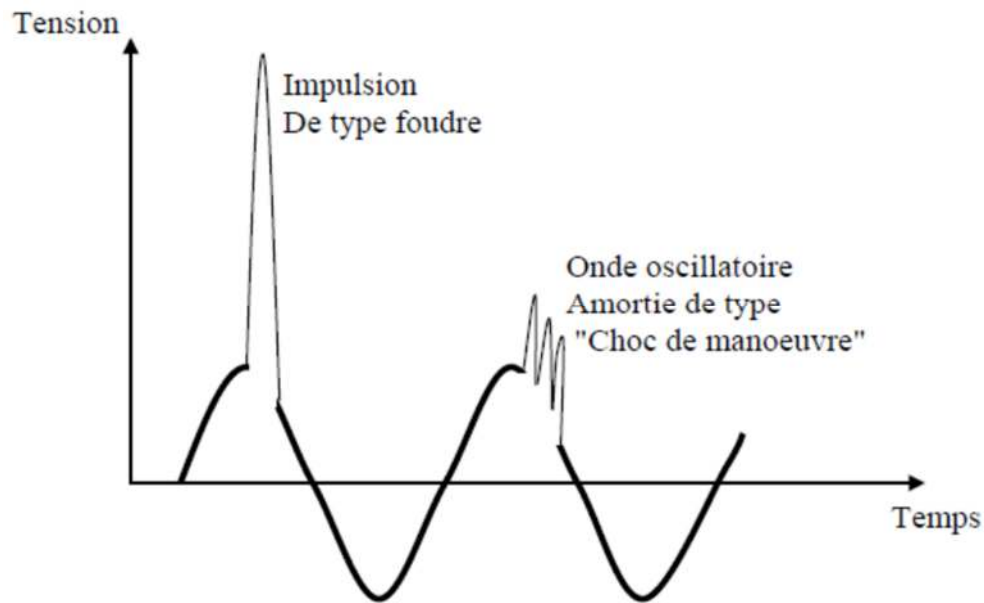


Fig. (I-8) : Exemple de surtensions [8]

### I.5.2 Les surtensions internes :

Ces perturbations peuvent avoir des formes alternatives ou oscillatoires dont la durée est limitée au temps de fonctionnement des dispositifs de contrôle et de protection du réseau, elles se présentent soit à la fréquence industrielle, soit à d'autres fréquences plus élevées. Elles apparaissent lors de la modification brusque de la configuration du réseau ou lors d'un défaut à la terre.

Parmi les causes on peut citer

- Défauts entre phase et terre (déplacement du point du neutre)
- Déclenchement brusque d'une charge
- Effet Ferrant provoqué par le fonctionnement à vide d'une ligne de grande longueur
- Alimentation d'une charge capacitive au travers d'une impédance élevée
- Phénomène de Ferro résonance [8]

### I.5.3 Les surtensions externes atmosphériques :

#### **Foudre :**

La foudre touche directement les réseaux aériens. Son impact varie selon les régions (niveau céramique) et les installations, notamment les lignes longues en zones orageuses. La **Figure 9** montre le nombre et le niveau statistique des surtensions annuelles, bien qu'un coup direct puisse dépasser ces valeurs. Les normes d'isolement et de CEM intègrent ce phénomène, en raison de l'énergie impulsionnelle transmise aux réseaux BT via les transformateurs MT/BT.

Les normes exigent que l'appareillage résiste aux ondes de foudre. En plus des ondes à front raide, la foudre provoque des effets indésirables via les éclateurs et parafoudres situés en amont des postes MT/BT. Le risque dépend du **Schéma des Liaisons à la Terre (SLT)** (cf. norme NF C 13-100). Dans un SLT TTN (**Figure 10**), un impact sur la ligne MT amorce un éclateur ou parafoudre, laissant passer une onde de choc, amplifiée par réflexion d'onde. L'amorçage crée un courant 50 Hz, de la phase en défaut à la terre  $R_{pn}$ , limité à 300 A en France, qui dure jusqu'à déclenchement des protections. Ce courant élève le potentiel du réseau BT par rapport à la terre profonde reliée par  $R_a$ . Si **courant  $\times R_{pn} >$  tension d'isolement**, il y a risque de **claquage en retour**. Exemple :  $300 \text{ A} \times R_{pn} \leq 2500 \text{ V} \rightarrow R_{pn} \leq 8 \Omega$ , valeur souvent dépassée selon le sol. Même problème si un élément MT est à la masse : les réseaux **souterrains MT** sont plus à risque (courant jusqu'à 1000 A en France ou non limité ailleurs).

Un **essai 2U + 1000 V à 50 Hz pendant 1 minute** valide la tenue en tension des matériels BT. Le SLT du poste influence aussi la transmission de l'onde de choc à la BT : la surtension capacitive traverse le transformateur, et l'onde de courant génère une tension  $U_f$  dans l'impédance de prise de terre, amplifiée si la prise est selfique . [1]

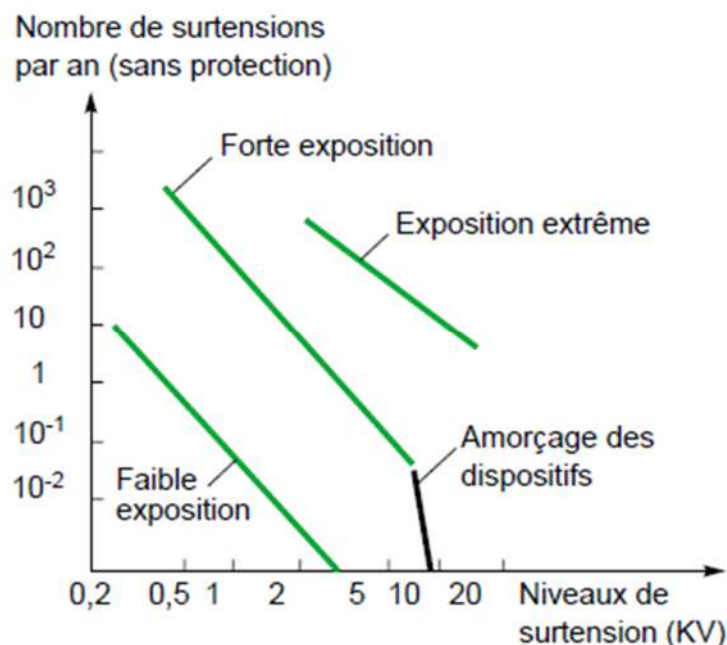


Fig. (I-9) : nombre et valeur des surtensions statistiquement possibles selon le niveau d'exposition à la foudre. [1]

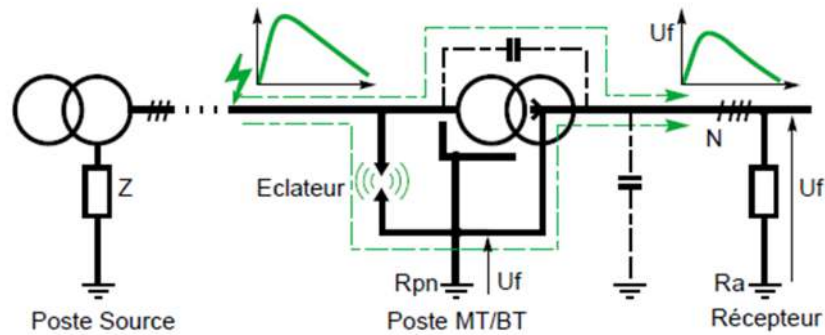


Fig. (I-10) : schéma TTN des liaisons à la terre d'un poste MT/BT (mises à la terre communes de l'éclateur, de la masse du transformateur et du neutre BT), et transmission de l'onde de foudre vers le réseau BT. [1]

En France, les **postes haut de poteau** utilisent des **prises de terre séparées** (TTS selon NF C 13-103) pour le poste, le neutre et les récepteurs BT, afin d'éviter la montée en potentiel et les claquages en retour.

Les équipements MT sont conçus pour résister (ex. : tenue à l'onde de choc de 125 kV pour un matériel 24 kV). En cas de claquage HT/BT, la valeur de  $R_n$  ou  $R_{pn}$  limite les retours de surtension vers le BT. Des relevés (notamment en Suisse par **Landis et Gyr**) publiés par l'**IEEE** montrent que des surtensions  $> 1$  kV surviennent plusieurs fois par an sur les réseaux BT.

Les surtensions  $> 6-7$  kV sont rares, car un amorçage dans l'air ou les câbles (agissant comme éclateurs) les limite. Cette limitation peut endommager l'installation (perçement, contournement, charbonnage des isolants). La solution recommandée pour les sites exposés est l'installation de **parafoudres entre conducteurs actifs et terre**. [1]

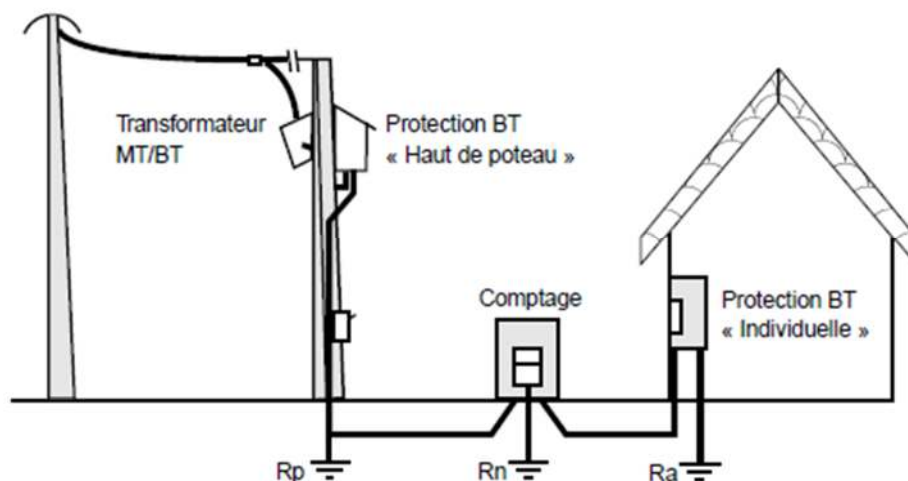


Fig. (I-11) : poste MT/BT « haut de poteau ». Schéma TTS des liaisons à la terre d'un poste MT/BT (mises à la terre séparées de l'éclateur, de la masse du transformateur et du neutre BT). Ce SLT est ITS si un limiteur de surtension est inséré dans la liaison à la terre du neutre BT. [1]

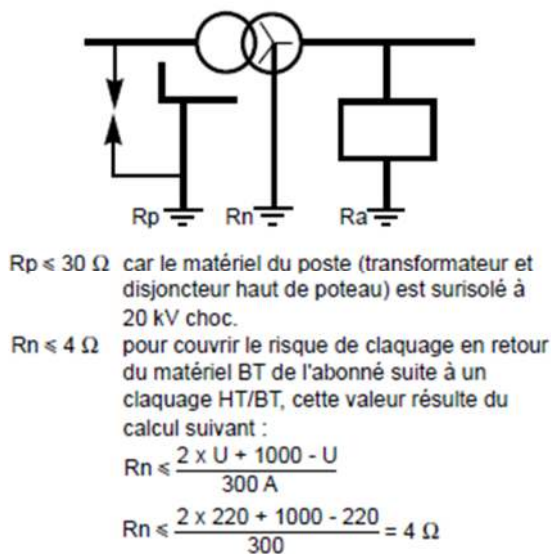


Fig. (I-12) : prises de terre d'un poste MT/BT alimenté par des lignes aériennes [1]

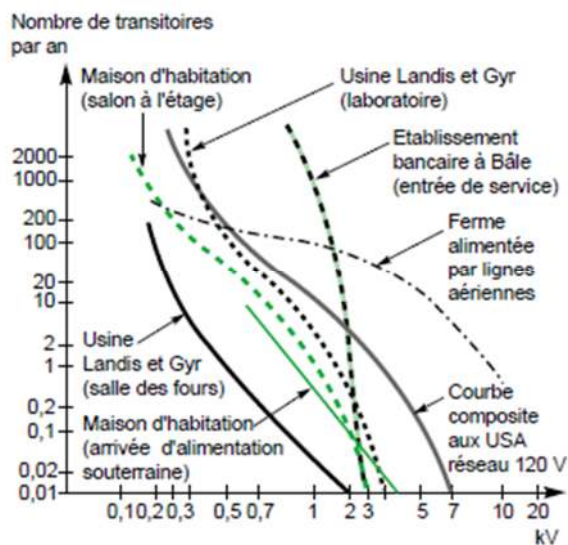


Fig. (I-13) : fréquences et valeurs crête des surtensions dues à la foudre sur des installations BT (source : Landis et Gyr). [1]

**I.5.4 Manœuvres de l'appareillage et fonctionnement des protections BT :**

- Les bobines des relais et les contacteurs ont une impédance de caractère selfique, et interrompre un « courant selfique » provoque presque toujours des surtensions importantes. Dans le cas d'un relais (cf. fig. 14), lorsque le courant est coupé brutalement par l'interrupteur K, l'énergie  $\frac{1}{2} Li^2$  se transforme en énergie  $\frac{1}{2} CV^2$  d'où une surtension :

$$V = i \sqrt{\frac{L}{C}} = 0.15 \sqrt{\frac{10^{-1}}{0.25 \times 10^{-9}}} = 3000 \text{ V} \tag{1.1}$$

Les surtensions observées peuvent atteindre près de 10 kV sur un circuit 230V. Ces auxiliaires de commande devraient être antiparasités par leurs constructeurs, sinon un circuit RC, ou une varistance, placé en parallèle sur leur bobine permet d'absorber la surtension. [1]

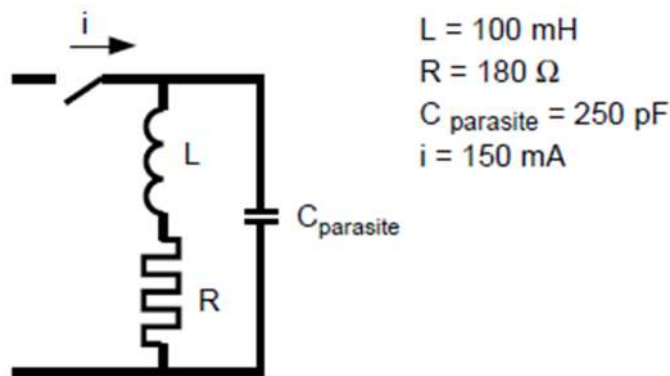


Fig. (I-14) : schéma équivalent d'un relais. [1]

- Sur les réseaux BT et HT, à vide ou faiblement chargés, interrompre un faible courant inductif n'est pas facile et entraîne la création de surtensions souvent multiples (trains d'ondes). Sur le circuit monophasé de la **figure 15**, pris pour exemple, lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, le courant continue à circuler dans  $L_2$  avec, aux bornes de  $C_2$ , la tension  $V_{BN}$  :

$$V_{BN} = i \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \sin \omega_2 t \quad (1.2)$$

Il en va de même en ce qui concerne le réseau amont avec aux bornes de  $C_1$  la tension :

$$V_{AN} = i \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \sin \omega_1 t \quad (1.3)$$

A l'instant de l'ouverture, les tensions  $V_{BN}$  et  $V_{AN}$  évoluent en opposition et la tension  $V_{AB}$  devient vite suffisamment importante pour qu'il y ait un réallumage de l'arc (réamorçage entre les contacts de l'appareil de coupure K). Le courant à couper est faible, les contacts s'écartant, et le battement entre les deux tensions  $V_{BN}$  et  $V_{AN}$ , sont des éléments qui font que l'arc s'éteint, puis les tensions remontent et le phénomène redémarre...

Plusieurs cycles appelés réamorçages peuvent ainsi se produire, ceci jusqu'à ce que l'énergie dissipée par l'arc, et l'écartement des contacts qui augmente, arrêtent le phénomène. Le résultat est l'apparition de trains d'ondes, de tension et de fréquence élevées

$$\left(\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}\right) \quad (1.4)$$

Véritables générateurs de parasites.

L'existence de différents circuits à vide avec self ou transformateur, et d'appareils de coupure à ouverture lente, fait que ce phénomène est assez fréquent ; il est même observé lors de la coupure de courant de court-circuit, lorsqu'en fin de coupure le courant devient suffisamment faible pour être « arraché ». [1]

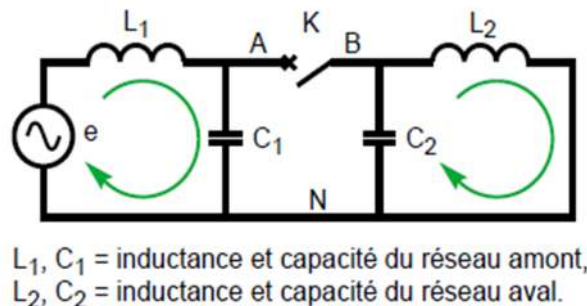


Fig. (I-15) : schéma équivalent d'un circuit monophasé [1]

. Et « insérer » dans le circuit une tension d'arc qui n'est pas toujours facile à maîtriser selon les conditions de coupure, car cette tension d'arc constitue une surtension de plusieurs centaines de volts pour les disjoncteurs et parfois de plusieurs kV pour les fusibles (Tableau (I-3)). [1]

- Couper un courant de court-circuit peut aussi présenter des risques de surtensions puisque :  
 . Il faut agir très vite, avant que le courant n'atteigne l'intensité de court-circuit présumée,

Tableau (I-3) : surtensions relevées avec deux dispositifs de protection testés sur la même installation d'essais. [1]

	Disjoncteur C32L	Fusible GL 20 A
Icc présumé (kA)	11	4
Cos $\varphi$	0,25	0,3
U (V)	380 + 10 %	380 + 10 %
Surtension (V) U + $\Delta U$	400 à 650	2100 à 2650

- Généralement plus le calibre de la protection d'un départ est élevé (et donc la section de ses conducteurs importante) par rapport à la puissance de court-circuit du « jeu de barres » plus la surtension est faible et longue. **La figure 16** présente une synthèse graphique de plusieurs essais. [1]

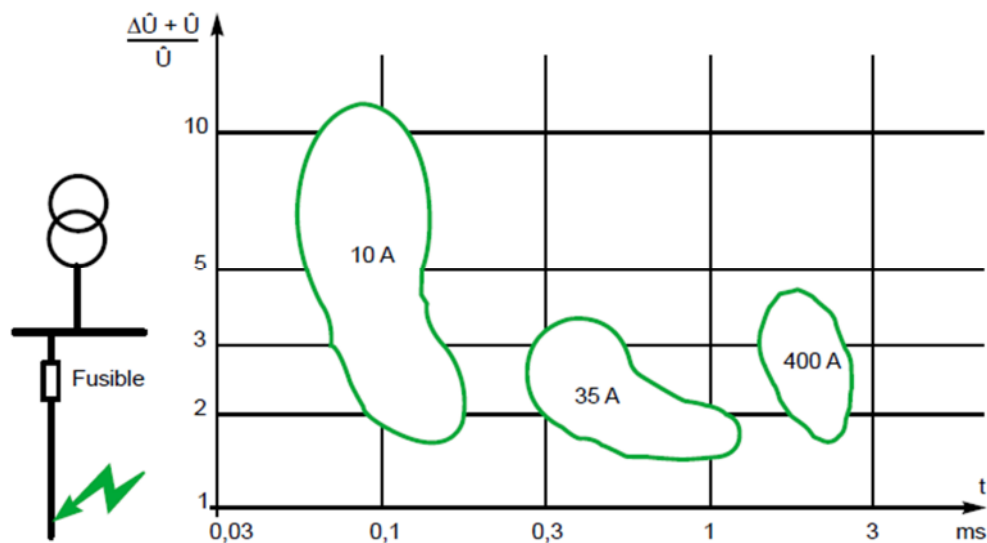


Fig. (I-16) : avec une même puissance de court-circuit amont, les niveaux et les durées des surtensions sur un départ sont fonction du calibre de sa protection, et de la section de ses conducteurs. [1]

**I.5.5 Essais et remèdes relatifs aux surtensions :**

Les surtensions impulsionnelles transmises par conduction, effet inductif ou capacitif, sont très dangereuses notamment pour les appareils électroniques. Dans ce domaine, l'expérience a permis de définir des essais.

- Les ondes normalisées pour tester les matériels. **Figure 17**

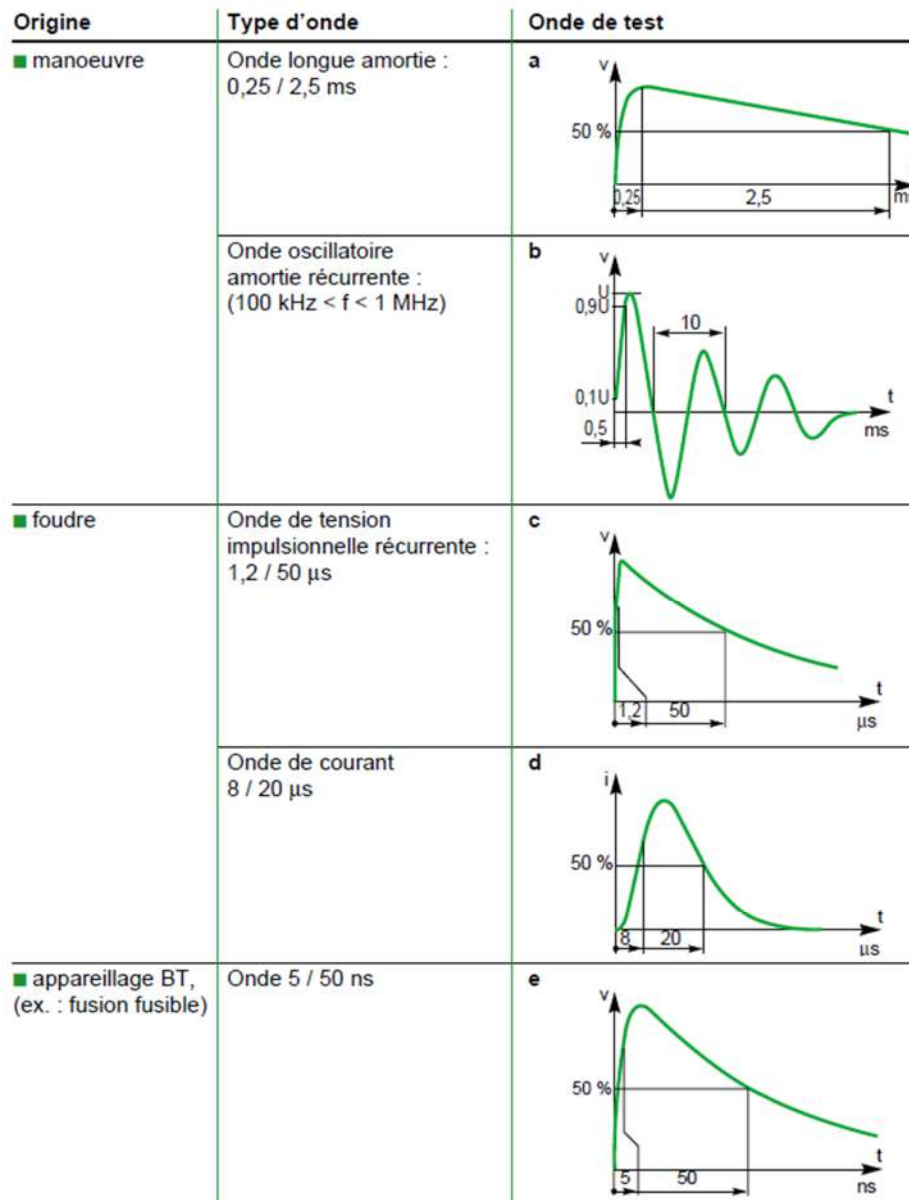


Fig. (I-17) : les principales formes d'ondes d'essai normalisées [1]

Les remèdes contre les surtensions Ils s'appliquent autant lors de la mise en œuvre que lors du choix des appareils :

- . Lors de l'installation, il est conseillé de veiller à éloigner les sources de surtensions des matériels les plus sensibles, ainsi qu'à l'équipotentialité des équipements,
- . Lors du choix il peut être utile de prévoir des :
  - blindages électrostatiques ou des condensateurs
  - transformateurs à écrans,
  - filtres,
  - limiteurs de surtension (Tableau (I-4)). [1]

Tableau (I-4) : caractéristiques de différents types de limiteurs de surtension. [1]

	U limitée (kV)	I max (kA) (onde 8/20)
Varistances	14 à 1200	10 à 5000
Diode de redressement	5 à 400	10 à 1000

## I.6 Conclusion :

Ces perturbations, bien que parfois brèves, peuvent provoquer des arrêts d'équipements, des pertes de données ou des dommages matériels.

Il est donc crucial de prévenir les dysfonctionnements et de protéger les équipements sensibles en appliquant une conception rigoureuse, en installant des dispositifs de protection efficaces (parafoudres, relais, filtres) et en assurant une maintenance régulière. C'est cet ensemble cohérent qui garantit la fiabilité, la sécurité et la durabilité des réseaux basse tension.

## **Chapitre II :**

# **Les perturbations de l'onde sinusoïdale**

## II.1 Introduction :

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité. Idéalement, l'électricité serait distribuée sous une forme de tension sinusoïdale parfaite d'amplitude et de fréquence constante. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier [14].

Les origines de ces altérations sont nombreuses. Outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers [14].

Les équipements électroniques sensibles nécessitent une alimentation constante de 60 Hz (ou 50 Hz dans certains pays), comme celle illustrée à la figure 1, pour fonctionner correctement.[15]

Une onde sinusoïdale lisse est caractéristique d'une tension non déformée et présentera les caractéristiques suivantes [15] :

- Magnitude constante.
- Longueur d'onde ou fréquence constante.
- Angle de phase égal à  $120^\circ$
- Magnitudes de phaseur égales.
- Potentiel neutre nul ( $V_n=0$ ).

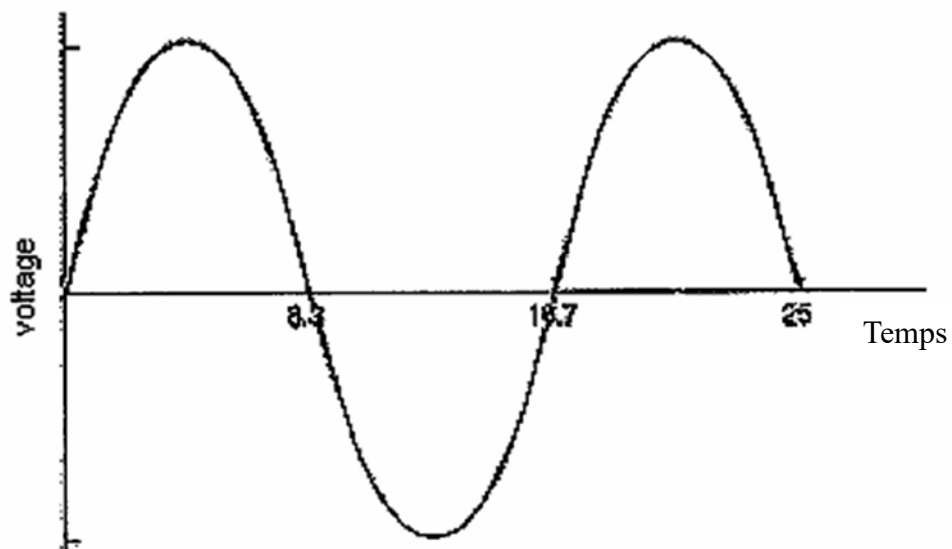


Fig. (II-1) : Onde sinusoïdale de 60 Hz sans distorsion. [15]

Cependant, les tensions (ondes) observées, de manière permanente ou temporaire, sur les réseaux ne sont jamais totalement idéales, car :

- Les générateurs (générateurs alternatifs) ne sont jamais totalement idéaux.
- Les transformateurs ne sont pas non plus parfaits.
- Les récepteurs de résonance génèrent ou absorbent.
- Le réseau sert de véhicule à différents signaux (courants porteurs). [1]

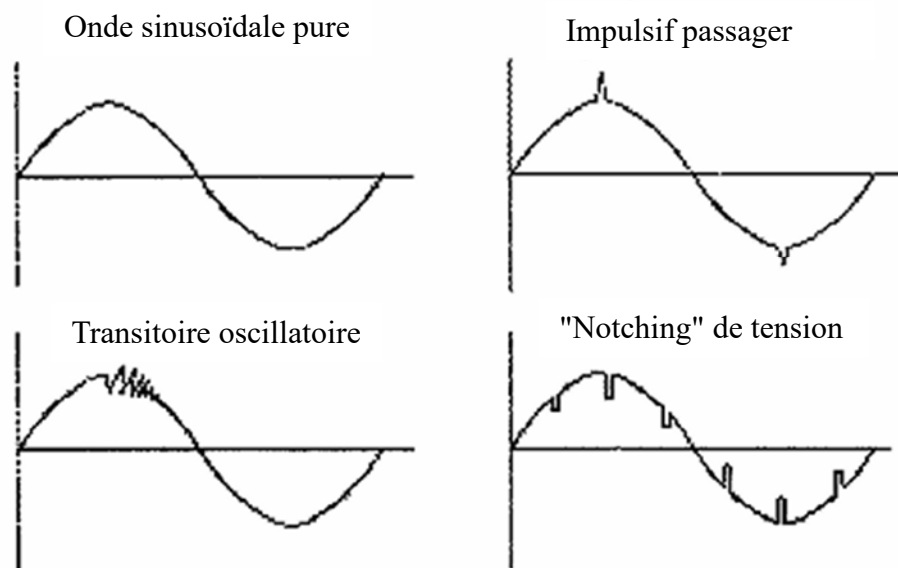


Fig. (II-2) : Exemples de distorsion typique de la qualité de l'énergie. [15]

**Figure 2** indique une onde sinusoïdale pure ainsi que divers types de perturbations qui causent une distorsion des ondes sinusoïdales et des problèmes potentiels de qualité de l'alimentation [15].

## II.2 Les générateurs :

Les générateurs électriques sont conçus pour fournir une tension sinusoïdale stable. Cependant, divers facteurs peuvent perturber cette onde sinusoïdale idéale. Parmi ces perturbations figurent les harmoniques.

Une distorsion harmonique élevée peut entraîner une consommation d'énergie et une dissipation thermique accrues, ce qui peut diminuer l'efficacité du générateur. Cela peut entraîner des coûts d'exploitation plus élevés et une durée de vie réduite du générateur [3].

Les appareils bon marché, généralement de faible puissance, génèrent souvent des harmoniques (fig.3) [1].

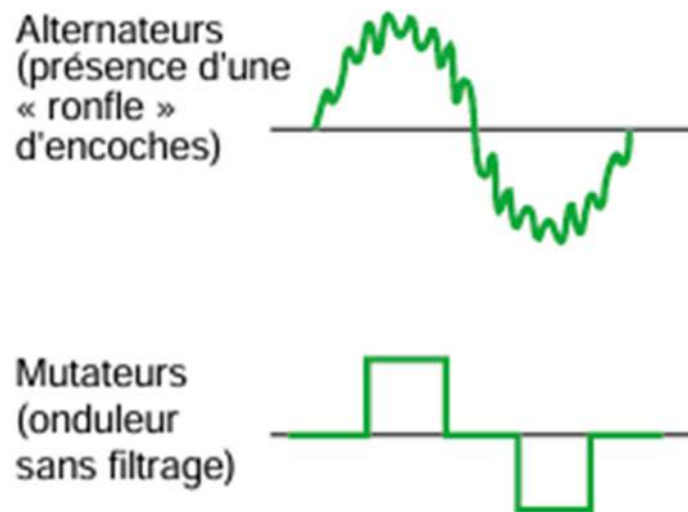


Fig. (II-3) : exemple d'onde de tension délivrée par des générateurs « Bon marché ».

### II.3 Les transformateurs :

Les transformateurs, notamment lorsqu'ils sont dimensionnés au plus juste, peuvent entrer en saturation dès que la tension appliquée dépasse leur valeur nominale. Cette saturation du noyau magnétique engendre alors un appel de courant non sinusoïdal, comme illustré à la figure 4.

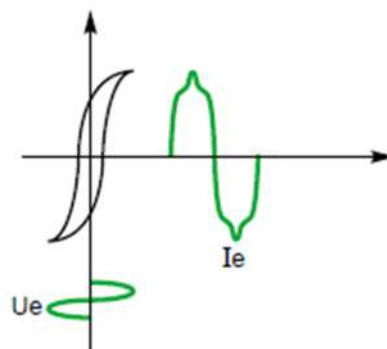


Fig. (II-4) : onde de courant à vide absorbée par un transformateur calculé trop juste.

Cela entraîne des distorsions harmoniques et accroît les pertes par courant de Foucault, l'effet de peau, ainsi que les pertes par hystérésis dans les circuits magnétiques.

Ces phénomènes peuvent réduire l'efficacité du transformateur et engendrer une surchauffe. Ainsi, la présence de charges non linéaires sur les réseaux électriques accentue ces effets, rendant indispensable l'analyse du spectre harmonique des courants de charge avant d'évaluer les performances ou la durée de vie d'un transformateur [17][18].

## II.4 Les récepteurs

### II.4.1 Les condensateurs :

Les perturbations harmoniques restent généralement acceptables tant que l'équipement perturbateur ne dépasse pas un certain niveau de puissance. Cependant, cela doit être considéré avec prudence, car une résonance peut être présente, causée par un réseau voisin possédant des condensateurs et couplé par un transformateur [19].

Les condensateurs sont des éléments pouvant présenter une résonance en parallèle du comportement inductif du transformateur et du câblage d'alimentation de l'installation. Cette résonance augmente considérablement l'impédance de l'ensemble à une certaine fréquence qui variera en fonction de la puissance de la batterie de condensateurs ou des conditions d'impédance du système d'alimentation.

Du fait de ces caractéristiques des éléments capacitifs et en combinaison avec la présence d'harmoniques dans le réseau, deux phénomènes néfastes pour l'installation peuvent se produire :

- D'une part, il y a une augmentation du **taux de distorsion de tension** pour toute l'installation où la résonance se produit, ce qui peut affecter le reste des charges.
- D'autre part, les mêmes condensateurs et autres éléments de la batterie de condensateurs tels que les éléments de commande peuvent être endommagés du fait de leur **impédance inférieure** par rapport aux courants harmoniques et du degré élevé de distorsion de tension, ce qui entraînera une augmentation de la consommation de courant des condensateurs pouvant aller jusqu'à les fondre [20].

Les courants harmoniques sont d'autant mieux absorbés par un condensateur que leur fréquence est élevée. Le courant absorbé par les condensateurs est donc une caricature de la tension du réseau sur lequel ils sont placés. Associés à des inductances, ils composent des filtres nettoyeurs de réseaux et absorbent alors un courant non sinusoïdal [1].

L'inclusion de condensateurs shunt sans tenir compte de la présence de sources harmoniques dans le système peut entraîner une augmentation des niveaux de distorsion harmonique en raison de la résonance entre les condensateurs et les divers éléments inductifs du système [21].

### II.4.2 Les tubes fluorescents :

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique de rang 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes de type fluo-compactes modernes. D'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre. Elles véhiculent la somme des courants d'harmoniques de rang 3 des trois phases, risquant un échauffement important [22].

Le courant absorbé par l'ensemble tube et ballast étant essentiellement inductif, le facteur de puissance est très faible (en moyenne entre 0,4 et 0,5). Dans les installations comportant un grand nombre de tubes, il est nécessaire de mettre en œuvre un dispositif de compensation pour améliorer le facteur de puissance [23].

Comme le courant dans la lampe est découpé par l'électronique de commande, le taux de distorsion en courant est élevé et donc des courants harmoniques circulent sur le réseau [23].

Par contre, les dispositifs associés aux lampes de faible puissance, en particulier les lampes fluo-compactes, absorbent un courant très déformé (**Fig. 5**).

Le taux de distorsion harmonique peut atteindre 150%. Dans ces conditions, le courant efficace absorbé au réseau vaut 1,8 fois le courant correspondant à la puissance active de la lampe, ce qui correspond à un facteur de puissance de 0,55 [23].

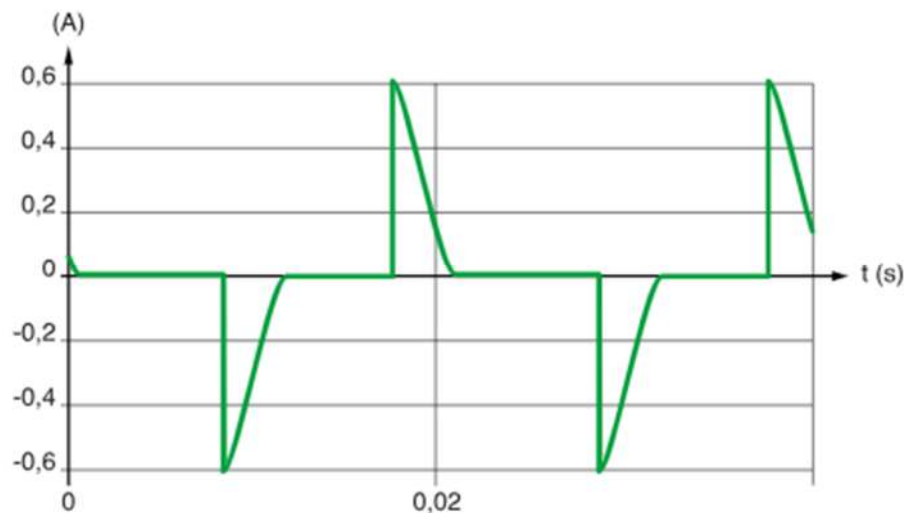


Fig. (II-5) : Forme de l'onde de courant absorbé par une lampe fluo-compacte [23].

#### II.4.3 Les redresseurs à commande de phase :

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique des réseaux électriques est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques.

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 électrique [24].

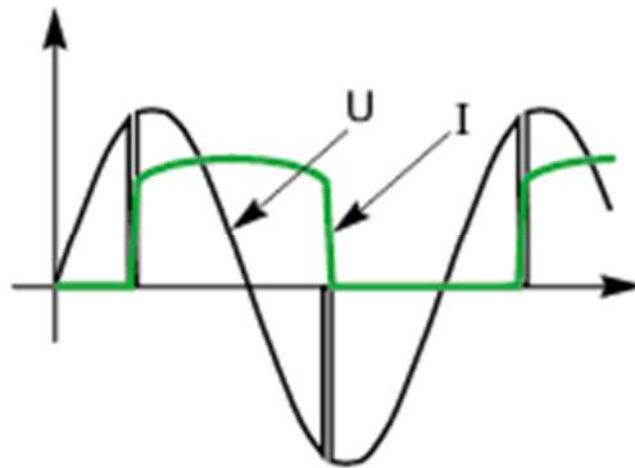


Fig. (II-6) : Ondes de tension et de courant déformées par un redresseur à commande de phase. [1]

## II.5 Les alimentations à découpage :

L'alimentation à découpage se trouve dans la plupart des appareils électroniques de puissance aujourd'hui. Sa taille et son poids réduits, sa meilleure efficacité énergétique et son coût inférieur en font une technologie de source d'alimentation bien supérieure à celle qu'elle a remplacée [25].

Les appareils électroniques ont besoin d'alimentations pour convertir la tension du réceptacle 120 VAC en niveaux de courant continu basse tension qu'ils nécessitent. Les alimentations de génération précédente utilisaient de grands et lourds transformateurs abaisseurs de 60 Hz pour convertir la tension d'entrée AC en valeurs plus basses avant le redressement. L'alimentation à découpage évite le lourd transformateur abaisseur de 60 Hz en redressant directement le 120 VAC à l'aide d'un pont de diodes d'entrée. La tension redressée est ensuite convertie en tensions plus basses par des convertisseurs DC-DC à découpage beaucoup plus petits et légers, utilisant de minuscules transformateurs fonctionnant à très haute fréquence. Par conséquent, l'alimentation à découpage est très petite et légère [25].

Cependant, l'alimentation à découpage n'est pas sans inconvénients. Le fonctionnement du pont de diodes et du condensateur de lissage qui l'accompagne est très non linéaire par nature. C'est-à-dire qu'il tire du courant en impulsions non sinusoïdales au pic de la forme d'onde de tension. Cette forme d'onde de courant non sinusoïdale est très riche en courants harmoniques [25].

Parce que l'alimentation à découpage est devenue la norme pour les ordinateurs, on en trouve en grande quantité dans les bâtiments commerciaux. Agissant ensemble, la multitude d'unités SMPS (**les alimentations à découpage**) peut gravement déformer ce qui a commencé comme une forme d'onde de tension en onde sinusoïdale [25].

## II.6 Les fours à arcs industriels :

Les fours à arc électrique sont connus pour produire des fluctuations de tension, ou "Flicker", dans la plage de 0,5 à 30 Hz pendant le comportement aléatoire de l'arc lors de la fusion de la charge [26].

Des études approfondies ont montré que des variations de tension aussi faibles que 0,5 % dans la plage de fréquence de 6 à 10 Hz peuvent provoquer un scintillement lumineux inacceptable des lampes à incandescence ordinaires. Les deux fours à arc électrique à courant alternatif, étant des charges non linéaires, produisent des harmoniques et des scintillements de tension. Les formes d'onde de tension et de courant non sinusoïdales peuvent entraîner une surchauffe des conducteurs ou des transformateurs, des pannes de condensateurs, des déclenchements involontaires des disjoncteurs, ou des dysfonctionnements des équipements électroniques [26].

## II.7 Les courants porteurs :

Les Courants Porteurs en Ligne (CPL), ou Powerline Communication (PLC) en anglais, désignent une technologie de transmission de données numériques par le biais des réseaux électriques existants.

En utilisant les lignes d'alimentation basse tension comme support de communication, cette technologie permet de transformer une installation électrique classique en un réseau de communication, sans infrastructure supplémentaire dédiée. [15].

### II.7.1 Définition et fonctionnement générale :

Le principe repose sur la superposition de signaux haute fréquence (généralement entre 3 kHz et 30 MHz pour les applications domestiques) sur le courant alternatif 50/60 Hz. Ces signaux sont injectés à l'aide de modems CPL connectés aux prises électriques, et permettent de transmettre des données numériques entre différents équipements.

Cette modulation du signal permet notamment de partager une connexion Internet, de créer un réseau local ou encore d'assurer la communication entre des équipements dans le cadre de la gestion technique des bâtiments (GTB). Les fréquences exactes et protocoles varient selon l'usage (bas débit, haut débit, télégestion) et les normes locales. [15].

### II.7.2 Applications principales des CPL :

- Internet haut débit domestique.
- VoIP (téléphonie sur IP)
- Réseaux multimédias (TV/IPTV)
- Télérelève des compteurs intelligents
- Télécommande des installations (tarifs différenciés, GTB)

### II.7.3 Une multitude de noms et d'Applications :

Selon les régions et les acteurs industriels, les courants porteurs en ligne se retrouvent sous différents noms, notamment [15] :

- CPL (Courants Porteurs en Ligne).
- PLC (Powerline Communications).
- PLT (Powerline Telecommunication).
- BPL (Broadband over Powerline).

### II.7.4 Principe de Fonctionnement des CPL :

Le principe fondamental des CPL repose sur la superposition de signaux haute fréquence (HF) sur le signal d'alimentation électrique. Ces signaux sont volontairement injectés dans le réseau électrique par des distributeurs d'énergie ou d'autres appareils communicants. Les fréquences utilisées varient selon les applications et les pays [15].

Par exemple, en France, le système **Pulsadix** utilise des signaux à 175 Hz pour télécommander des changements de tarif jour/nuit. Ces signaux sont audibles lorsqu'une voiture passe sous une ligne haute tension (HT) à l'aide d'un autoradio. Dans d'autres contextes, des signaux numériques à des fréquences de 3 kHz à 30 MHz sont utilisés pour des services comme l'Internet ou la téléphonie [1].

Les signaux sont constitués par des trains d'impulsions de la fréquence choisie, injectés selon un certain code. Leur tension est de l'ordre de 10 V. D'autres signaux véhiculés par le réseau peuvent aussi perturber le secteur chez un abonné BT.

- Les communications numériques, telles celles utilisées pour la gestion technique des bâtiments (GTB)
- Les émissions d'interphones (quelques dizaines de kilohertz)
- Les ordres de télécommande (50 à 150 kHz) [1].

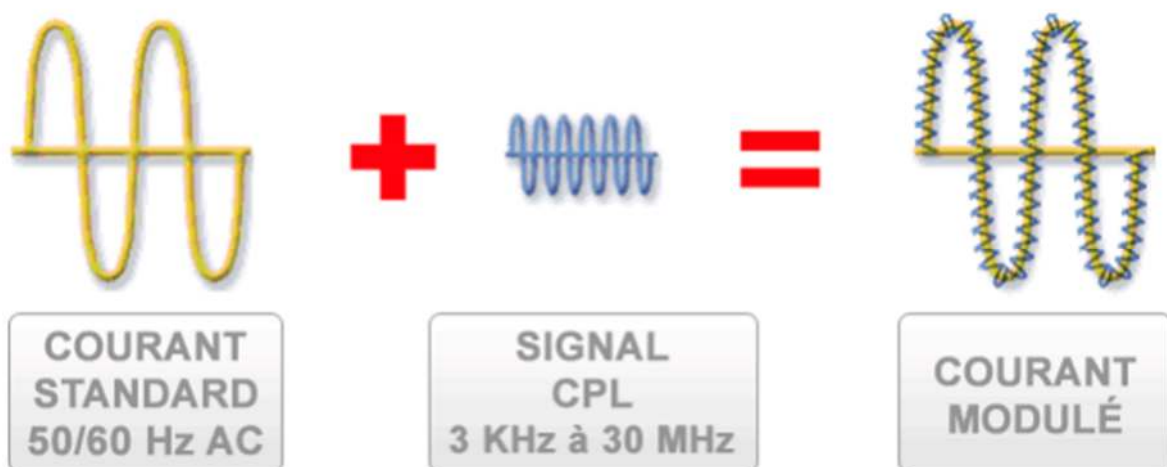


Fig. (II-7) : Principe de la transmission par courants porteurs. [30]

## II.8 Les perturbations harmoniques dans les réseaux BT :

### II.8.1 Définition et origine des harmoniques

« Grandeur harmonique » ou simplement « Harmonique » C'est une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental.

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension. Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental. [18].

#### Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :  $n = \frac{f_n}{f_1}$  Par principe, le fondamental  $f_1$  a le rang 1 [6].

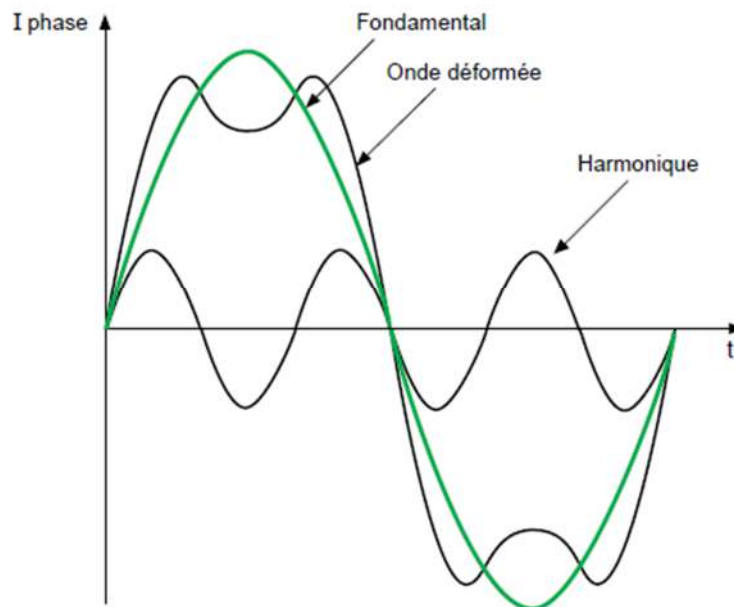


Fig. (II-8) : image d'une onde déformée. [6].

### II.8.2 Conséquences des harmoniques :

On distingue deux types d'effets d'harmoniques, à définir : les effets instantanés et les effets à terme :

#### a) Effets instantanés

Phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation : Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement.

Interférence avec les réseaux de télécommunication : le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits considérables.

Troubles fonctionnels liés à la déformation de l'onde de tension tels que : couples pulsatiles sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesures, perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.

Vibrations et bruits : les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

#### b) Effets à terme

Les effets à terme se traduisent par une fatigue mécanique prématurée (due aux vibrations) des matériaux et des lignes. Principalement, l'effet à terme, c'est l'échauffement.

Échauffement des câbles et des équipements : ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du surchauffement, comme le neutre, et les matériels bobinés (transformateurs ou moteurs).

Échauffement des condensateurs : L'échauffement est causé par les pertes dans le diélectrique. Les condensateurs sont sensibles à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage [28].

### II.8.3 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :[3]

- Le taux harmonique de rang  $h$  :

$$S_h = C_h / C_1 \quad (2.1)$$

Ou  $C_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$ ,  $C_1$  représente la composante fondamentale,

- Le taux global de distorsion harmonique :

$$THD = \sqrt{\sum_2^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}} \quad (2.2)$$

En général, les harmoniques considérées dans un système électrique sont en dessous de 2500 Hz, ce qui se rapporte à la plage des perturbations de basse fréquence selon la normalisation. L'effet de peau et la présence d'inductances dans les lignes contribuent à une atténuation significative des harmoniques de fréquence supérieure. En outre, la plupart des dispositifs produisant des harmoniques ont un spectre d'émission qui ne dépasse pas 2500 Hz. C'est pourquoi l'analyse des harmoniques se concentre généralement sur la plage de 100 à 2500 Hz, soit les ordres de 2 à 50.

- Le facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est déterminé par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport ainsi que les instruments de contrôle et de mesure sont conçues en fonction de la tension et du courant nominaux. Un faible facteur de puissance indique une utilisation inefficace de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante ( $D$ ), donnée par la relation

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (2.3)$$

Apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la Fig. III-9

Le facteur de puissance (F.P.) devient :

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi_1 \cdot \cos\gamma \quad (2.4)$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

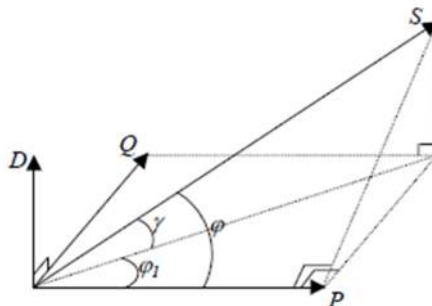


Fig. II.9 : Diagramme de Fresnel des puissances [3]

## **II.9 Conclusion :**

Les réseaux électriques basse tension ne présentent jamais une onde sinusoïdale parfaitement pure en raison des imperfections des générateurs, des transformateurs et des récepteurs qui génèrent ou absorbent des harmoniques. Ces perturbations proviennent notamment des charges non linéaires telles que les condensateurs, les tubes fluorescents, les redresseurs commandés et les alimentations à découpage, ainsi que des équipements industriels comme les fours à arc ou à induction. De plus, des signaux additionnels, comme les courants porteurs utilisés pour la télécommande ou la gestion technique, viennent s'ajouter à ces déformations. Ces perturbations ont des effets néfastes importants, notamment l'augmentation des pertes dans les transformateurs et moteurs, la surchauffe des conducteurs, en particulier du neutre, et la réduction de la durée de vie des condensateurs et des équipements électroniques. Pour limiter ces impacts, il est indispensable d'adopter des dispositifs de filtrage passif ou actif, de concevoir des protections électroniques capables de mesurer la vraie valeur efficace du courant et de respecter les normes de qualité de l'énergie qui fixent des limites aux niveaux d'harmoniques tolérables. Ainsi, la surveillance et la maîtrise des perturbations de l'onde sinusoïdale sont essentielles pour garantir la fiabilité, la sécurité et la durabilité des installations électriques.

# **Chapitre III :**

## **Les perturbations particulières aux systèmes polyphasés et électromagnétiques**

### III.1 Introduction :

Dans les réseaux électriques basse tension, les perturbations de type déséquilibres de tension et de courant ainsi que les perturbations électromagnétiques (PEM) représentent des défis majeurs pour la stabilité, la sécurité et la qualité de l'alimentation. Ces phénomènes, souvent causés par une répartition inégale des charges, des défauts de phase ou encore la présence de sources de bruit électromagnétique, peuvent gravement affecter les équipements sensibles, générer des harmoniques, ou engendrer une surchauffe des conducteurs. Ce chapitre vise à analyser en détail l'origine, les effets et les contraintes réglementaires associées aux déséquilibres électriques, ainsi qu'à présenter les sources, modes de propagation et conséquences des perturbations électromagnétiques dans les réseaux BT. Une compréhension approfondie de ces phénomènes est essentielle pour assurer la compatibilité électromagnétique (CEM) et la fiabilité du système électrique

### III.2 Les déséquilibres de courant et tension :

#### III.2.1 Origine du déséquilibre :

Lorsque les trois tensions ou les trois courants ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera du déséquilibre du système triphasé. La **figure 1** représente respectivement, un exemple de déséquilibre de tensions d'un système triphasé. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions [9]

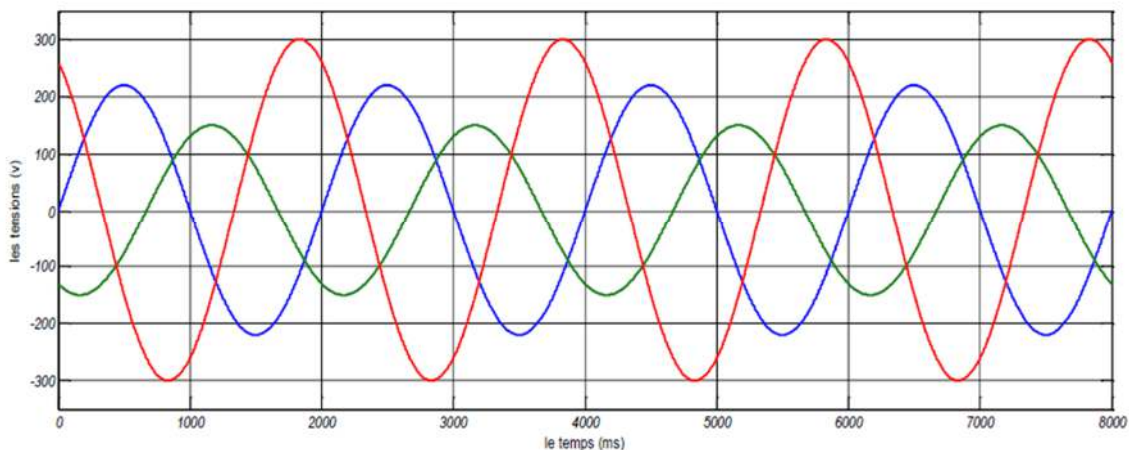


Fig. (III-1) : Le déséquilibre de la tension et du courant [9]

#### III.2.2 Conséquences du déséquilibre :

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés

- 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 déséquilibre 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 antirésonance 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.

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.[9]

### III.2.3 Réglementation :

Le déséquilibre en tension est défini par le taux de déséquilibre  $\tau_v$ , correspondant au rapport entre les amplitudes des tensions inverse et directe

Les clients raccordés aux réseaux **HTA** (1 à 50 kV) et **HTB** (50 à 130 kV) doivent recevoir une tension dont le taux de déséquilibre moyen  $\tau_m$  ne dépasse pas **2 %**

L'alimentation sans restriction au réseau électrique est autorisée pour des charges perturbatrices inférieures ou égales à :

- **500 kVA** pour une puissance de court-circuit de **40 MVA** (réseau de 1 à 50 kV)
- **4 MVA** pour une puissance de court-circuit de **400 MVA** (réseau de 63 à 90 kV)
- **15 MVA** pour une puissance de court-circuit de **1500 MVA** (réseau de 225 kV)

Toutefois, les clients dont les charges dépassent ces seuils doivent veiller à ne pas engendrer un taux de déséquilibre supérieur à **1 %**, afin de préserver la qualité de l'alimentation électrique. [9]

### III.3 Les déséquilibres de phase :

Outre les effets des composantes inverses sur les moteurs, le déséquilibre des tensions triphasées perturbe le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase (*Fig.2*).

De plus les harmoniques, qui modifient le passage à zéro des tensions, peuvent perturber la synchronisation de l'allumage des thyristors. Dans le domaine des protections contre les risques électriques, ce type de perturbation est également gênant car les déséquilibres de courant limitent l'utilisation du montage de Nicholson (mise en commun de quatre transformateurs de courant) pour détecter des courants résiduels dus à un défaut d'isolement [1]

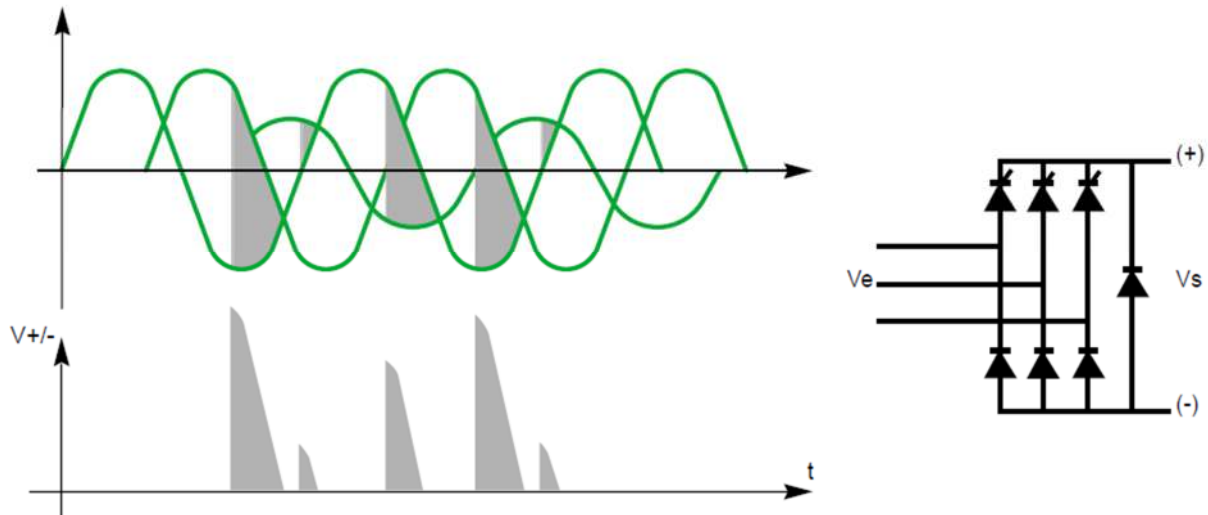


Fig. (III -2) : effet d'un déséquilibre de tension sur un redresseur en pont de Graetz semi-contrôlé. [1]

### III.4 Les perturbations électromagnétiques :

Les perturbations électromagnétiques (PEM) désignent toute forme d'énergie électromagnétique non désirée, susceptible de perturber ou de dégrader le fonctionnement des dispositifs ou systèmes électriques et électroniques dans leur environnement, qui peuvent être générées soit par une partie du système comme par exemple une alimentation électrique utilisant des hacheurs créant des parasites dans une très grande gamme de fréquence, soit par des perturbations extérieures ou internes. [11]

Les systèmes électriques et/ou électroniques ne sont pas isolés de leur environnement. De l'énergie électromagnétique peut donc franchir non intentionnellement leurs frontières soit pour y pénétrer, soit pour s'en échapper. Cette énergie parasite est appelée perturbation électromagnétique.[10]

- Trois éléments sont nécessaires à l'apparition d'une perturbation :
- Une source d'émission (naturelle ou artificielle),
  - Un moyen de propagation (conduction ou rayonnement),
  - Un récepteur sensible ou victime. [11]

#### III.4.1 Les sources de perturbations et les moyens de propagation

Les sources de bruits sont divisées en deux catégories :

-Le bruit naturel provenant par exemple d'orages qui constituent la source majeure du bruit atmosphérique comme l'éclair par exemple (car lorsque celui-ci se produit près d'un système, il risque de le perturber considérablement, car il va véhiculer en moins d'une seconde une quantité de charges de quelques 20 coulombs au sol)

-Le bruit dû aux activités humaines, plus précisément l'activité industrielle, qui a engendré de nombreuses naissances en pollution dont l'une d'elle est la pollution électromagnétique.[11]

Les sources parasites, sont soit intentionnelles ; c'est à dire qui doit rayonner pour accomplir leurs tâches comme les moyens de communication (les émetteurs radiodiffusion en AM, LW, FM, TV, POLICE, etc....) ou bien non intentionnelles qui évoluent au rythme d'apparition des nouveaux produits comme les convertisseurs statiques, lignes de transport, etc....

Les récepteurs plus communément appelés "victimes" sont les systèmes électriques, électroniques sans oublier les êtres vivants. Les effets des perturbations sur des récepteurs dépendant de la puissance de la source, du mécanisme de couplage, du degré de sa susceptibilité et du moyen de propagation caractérisé en deux types :

- La propagation par conduction.
- La propagation par rayonnement.

#### A- Par conduction :

Elle est caractérisée par les courants dans les câbles, par les tensions perturbatrices aux bornes de certains circuits, équipements aux réseaux ou encore par des puissances perturbatrices transportées par les câbles d'alimentations. [11]

#### B- Par rayonnement :

Les émissions par rayonnement de parasites, produisent des champs électromagnétiques ( $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ ) dans l'espace. Leurs intensités dépendent de la distance par rapport à la source, de sa nature et de la fréquence. [11]

##### - Champs magnétique :

L'émission en champ magnétique (exprimée en A/m) est engendrée par un circuit électrique à basse impédance parcouru par un courant I. [11]

Lorsqu'un courant circule dans un conducteur, il génère un champ magnétique dans son environnement. Ce champ peut induire une tension dans un circuit voisin, comme le décrit la loi de Faraday. La **figure 3** illustre ce phénomène de couplage inductif.

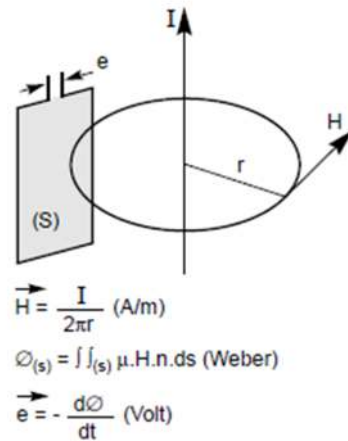


Fig. (III -3) : tension induite par un courant [1]

- Champ électrique :

L'émission en champ électrique (exprimée en V/m) est produite par un circuit électrique à haute impédance soumis à une différence de potentiel élevée.[11]

Une perturbation électromagnétique peut également se manifester sous forme de champ électrique. Elle peut être modélisée par un système de type capacitif,

Comme représenté dans **la figure 4**, où une différence de potentiel génère un champ dans la zone située entre deux plans conducteurs.

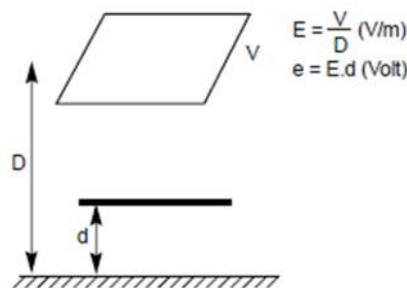


Fig. (III -4) : exemple d'un champ électrique [1]

Exemple en Basse Tension (BT) : [1]

Les perturbations en BT sont généralement transmises par conduction via les câbles, transformateurs ou capacités parasites. Cependant, des champs électromagnétiques peuvent aussi rayonner autour des conducteurs.

On dit qu'un courant important « rayonne » un champ magnétique à basse impédance, et qu'une tension importante « rayonne » un champ électrique à haute impédance. En effet, l'impédance d'un champ est égale à :  $Z_c = \frac{E}{H}$

En fait, tout champ électromagnétique est caractérisé par la présence simultanée des champs électrique et magnétique liés dans ce que l'on appelle le vecteur de Poynting :

$$\vec{P} \left( \frac{W}{m^2} \right) = \vec{E} \left( \frac{V}{m} \right) \wedge \vec{H} \left( \frac{A}{m} \right) \quad (3.1)$$

L'impédance  $Z_c$  est fonction de la distance et de la fréquence (Fig.5)

Si pour le 50 Hz on peut parler de champ E ou H, haute ou basse impédance, c'est parce que :

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} = 1000 \text{ km} \quad (3.2)$$

Autour d'un conducteur parcouru par un courant important le champ magnétique H décroît selon  $\frac{1}{r}$  (r = rayon) jusqu'à  $\frac{\lambda}{2\pi}$

A proximité d'une antenne (haute impédance) c'est le champ E qui décroît en fonction de la distance en  $\frac{1}{r^3}$

Lorsque la distance dépasse  $\frac{\lambda}{2\pi}$  les deux champs E et H décroissent selon  $\frac{1}{r}$  et l'impédance est une constante qui, dans l'air, est égale à  $377 \Omega$ . Lorsque l'émission d'un parasite est par exemple due à la fusion d'un fusible, le front de montée de l'onde étant de 5 ns, la fréquence équivalente est de  $10^8 \text{ Hz}$

La distance de transition est de  $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} = 5 \text{ cm}$ , au-delà les champs E et H décroissent en  $\frac{1}{r}$  ; on dit que l'on est en « onde plane ».

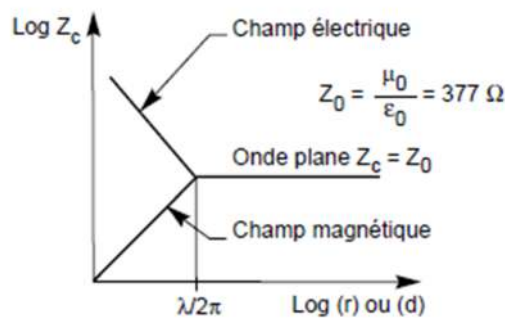


Fig. (III -5) : exemple d'impédance d'onde pour un bipôle. [1]

### III.4.2 Les perturbations électromagnétiques en électronique de puissance :

L'utilisation des convertisseurs statiques est de plus en plus répandue. Travaillant à des fréquences de commutation relativement élevées, ils imposent à leur environnement des contraintes électromagnétiques de plus en plus sévères. Les perturbations générées sont conduites et rayonnées, elles proviennent principalement de l'ouverture et/ou de la fermeture des interrupteurs à semi-conducteurs (diodes, thyristors, transistors, etc....) qui composent les convertisseurs. [11]

Les circuits électroniques sont les principales victimes des perturbations électromagnétiques, car ils traitent des signaux de tension très faibles et ont de grandes impédances (ils consomment de moins en moins). Les parasites arrivent sur la « victime » essentiellement par le câblage qui entre et qui sort du boîtier (ceci par couplage en mode commun - mode différentiel – impédance commune - diaphonie). Par ailleurs, le tracé des circuits imprimés et les composants peuvent et doivent être déterminés pour obtenir une susceptibilité électromagnétique minimale. Les fonctions les plus sensibles sont : [1]

- Les amplificateurs BF (*passé bas*)
- Les circuits d'entrée (*intégrateurs*)
- Les circuits logiques (*numériques*).

### III.5 Décharges électrostatiques :

Une perturbation électromagnétique correspond à toute onde électromagnétique (conduite ou rayonnée) capable d'influencer le comportement d'un système électrique et électronique ou d'engendrer son dysfonctionnement. Ces perturbations peuvent être classées de différentes manières, nous nous basons ici sur une perturbation de type décharge électrostatique (*DES*), ou en Anglais Electrostatic Discharge (*ESD*).

Bien que l'électricité statique fait largement partie de notre vie quotidienne : photocopie, peinture, pulvérisation, dépoussiérage, etc.& Directement liée à la structure atomique des matières utilisées ou traitées dans l'industrie, elle se crée spontanément,

Dans certaines conditions, au cours d'opérations de fabrication ou de manutention. Toutes les entreprises sont visées : invisible, discrète, l'électricité statique se manifeste partout, souvent d'une façon anodine mais toujours insidieuse.

Dans cette partie nous allons présenter un état de la décharge électrostatique [10]

#### III.5.1 Définition d'une décharge électrostatique :

Une décharge électrostatique, est un phénomène physique dû au transfert de charges électriques entre deux objets ou deux corps portés à des niveaux de potentiels électrostatiques différents par suite de l'accumulation de charges d'électricité statiques. Ce phénomène est généralement accompagné par un arc électrique avec un courant de forte intensité.[10]

### III.5.2 Décharge électrostatique test d'immunité :

Cette partie concerne les exigences d'immunité et les méthodes d'essai applicables aux équipements électriques et électroniques soumis à des décharges électrostatiques, qu'elles proviennent directement des opérateurs ou de personnes interagissant avec des objets proches. Elle définit également des plages de niveaux d'essai correspondant à différents environnements et conditions d'installation, et établit des procédures d'essai normalisées. L'objectif de cette norme est d'établir une base commune, reproductible, permettant d'évaluer les performances des équipements soumis à des décharges électrostatiques. Elle couvre aussi les cas de décharges électrostatiques provenant d'un opérateur vers un objet situé à proximité d'un équipement sensible.[12]

Les résultats des essais doivent être classés en fonction de la perte de fonction ou de la dégradation des performances de l'équipement testé, par rapport à un niveau de performance défini par son fabricant, le commanditaire de l'essai, ou un accord entre fabricant et acheteur. La classification recommandée est la suivante :[12]

- a) fonctionnement normal dans les limites spécifiées ;
- b) perte temporaire de fonction ou dégradation de performance cessant avec la perturbation, sans intervention de l'opérateur ;
- c) perte temporaire ou dégradation nécessitant une intervention de l'opérateur ;
- d) perte de fonction ou dégradation irréversible due à des dommages matériels ou logiciels, ou à une perte de données.

Le fabricant peut aussi définir certains effets comme négligeables et donc acceptables. Cette classification peut servir de base pour définir des critères de performance, notamment par les comités en charge des normes génériques, de produit ou de famille de produits, ou pour établir un cadre d'accord entre fabricant et acheteur lorsqu'aucune norme existante ne s'applique.

### III.5.3 Effets des décharges électrostatiques sur les dispositifs électroniques :

Ce type de perturbation gêne et/ou détruit les appareillages électroniques mais « n'agresse pas » les réseaux électriques. En effet, l'électronique est particulièrement sensible à ces décharges électrostatiques car elle utilise de plus en plus de composants « bas niveaux », à faible consommation et haute impédance. Et ces appareillages ont toujours une partie accessible au toucher tels que voyants, potentiomètres, etc. Or, une personne, selon le type de chaussures qu'elle porte, le sol sur lequel elle se déplace, et l'humidité de l'air, peut se charger à un potentiel atteignant 15 kV (phénomène modélisé et représenté sur la figure 6). [1]

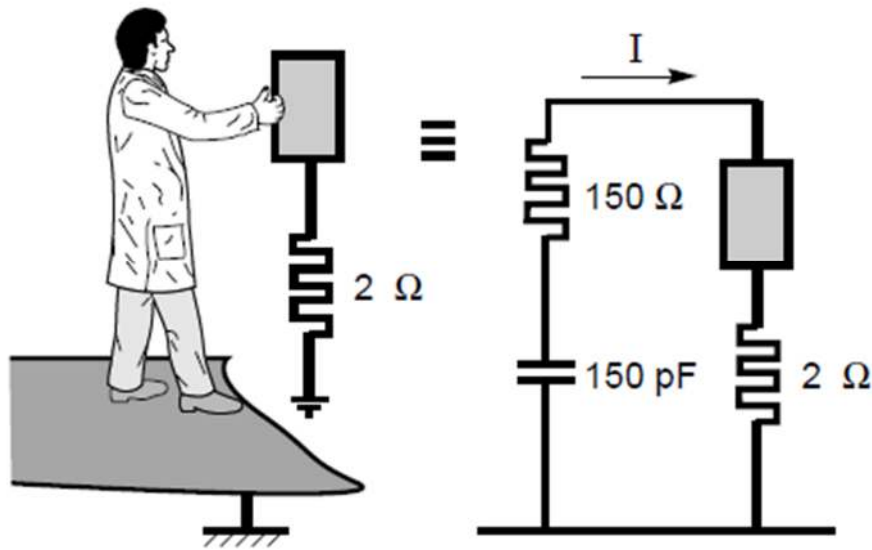


Fig. (III -6) : modélisation du circuit de charge électrostatique d'une personne. [1]

Dans ce cas, le courant de décharge peut atteindre plusieurs dizaines d'ampères (Fig. (III -7)).

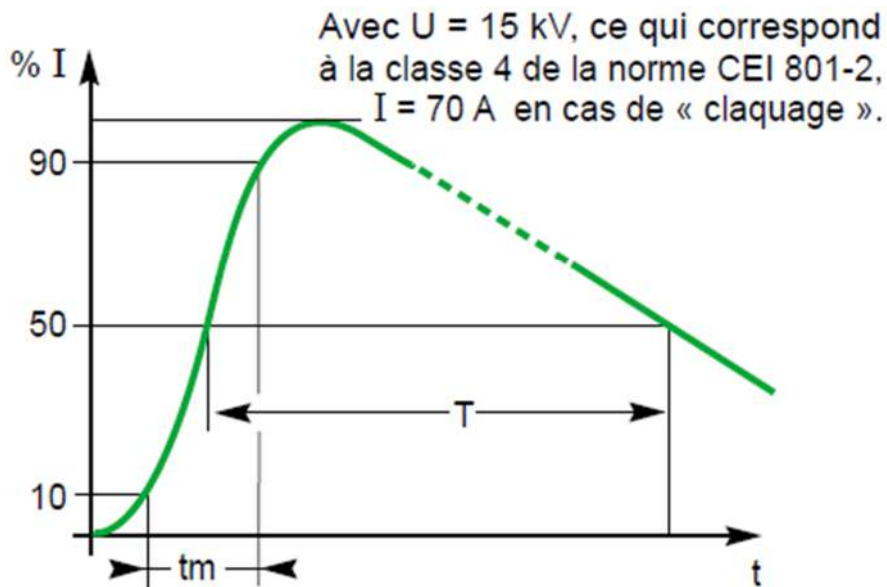


Fig. (III -7) : courant de décharge électrostatique ( $t_m = 5 \text{ ns}$ ,  $T = 30 \text{ ms}$ ). [1]

Immuniser et tester l'appareillage électronique face à cette contrainte est donc devenu une nécessité.

### III.6 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques [29]

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et moderne [3].

#### III.6.1 Solutions de dépollution traditionnelles :

Deux méthodes classiques de dépollution sont examinées, en fonction des types de perturbation comme le courant et la tension.

##### III.6.1.1 Dépollution des courants perturbateurs :

Plusieurs remèdes ont été proposés dans les publications pour assainir les réseaux électriques de cette sorte de perturbation.

##### - Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. *Fig.8* Montre ce compensateur, appelé montage de Steinmetz [ME-96]. 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.

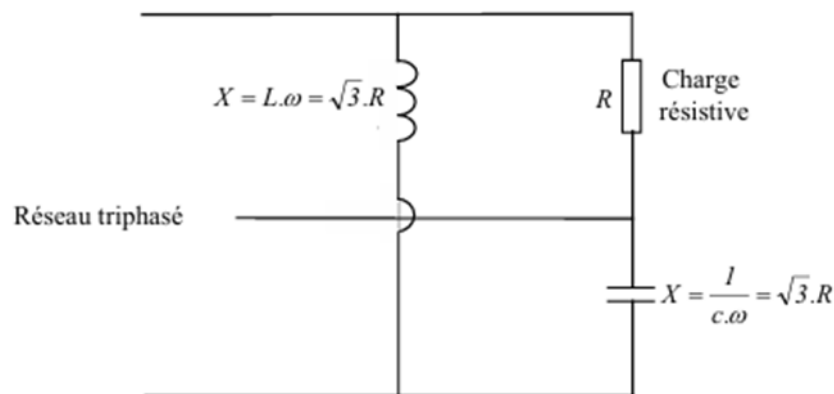


Fig. (III -8) : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

- **Compensation de la puissance réactive :**

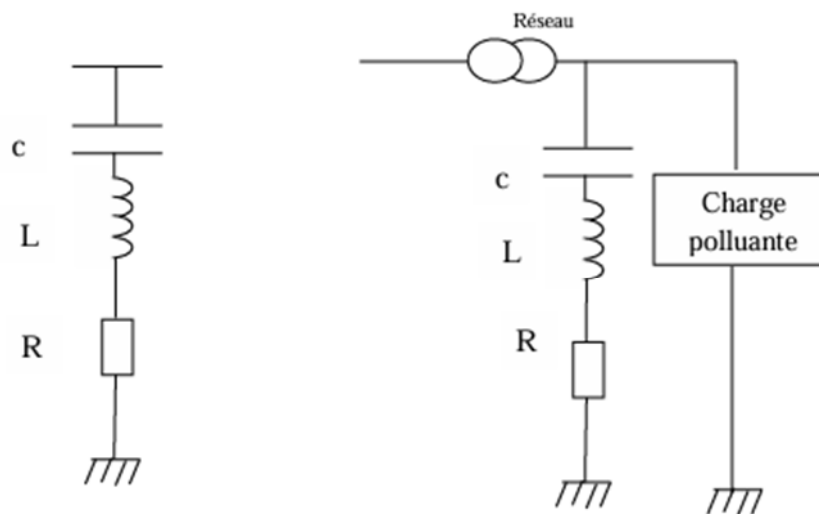
La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

- **Compensation des courants harmoniques :**

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant *Fig.9* et le filtre passif amorti ou passe-haut *Fig.10*



*Fig. (III -9) : Filtre passif résonnant*

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieur et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieur. C'est-à-dire que, pour un pont triphasé, nous avons besoin d'un filtre passe-bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique, et d'un filtre passe-haut pour tous les harmoniques au-delà de 11ème [27].

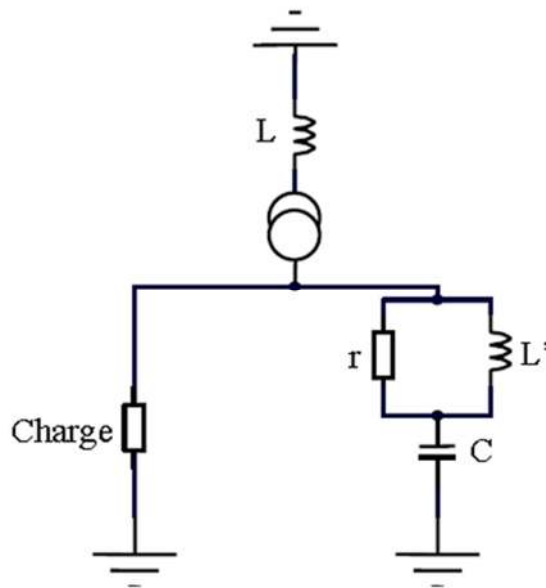


Fig. (III -10) : Schéma équivalent monophasé d'un filtre amorti.

La figure 10 montre le montage de ce type de filtre. En plus de la difficulté de dimensionnement des filtres et du coût global donné, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de  $h = 13$ ) [27].

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants [3].

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients [3] :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Équipements volumineux,
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

### III.6.1.2 Dépollution des tensions perturbatrices :

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

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

Quant aux creux de tension, 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 [3].

### **III.6.2 Solutions de dépollution modernes :**

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

#### **III.6.2.1 Dépollution des courants perturbateurs :**

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive.

Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant.[3]

#### **III.6.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices :**

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASIs (alimentations sans interruption). 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.

Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, une famille de filtres actifs séries a été proposée [3].

#### **III.6.2.3 Solution de dépollution adoptée :**

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent

s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique, et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [3].

### **III.7 Conclusion :**

Les déséquilibres dans les systèmes polyphasés et les perturbations électromagnétiques constituent deux formes critiques de perturbations électriques aux effets complémentaires mais distincts. D'une part, les déséquilibres de courant, de tension ou de phase affectent directement la stabilité des réseaux triphasés, dégradant les performances des machines tournantes, provoquant des échauffements excessifs et accélérant l'usure des équipements. D'autre part, les perturbations électromagnétiques qu'elles soient d'origine interne ou externe compromettent la compatibilité électromagnétique (CEM) des dispositifs sensibles, générant des interférences, des arrêts intempestifs ou même des dommages matériels.

Ces deux types de perturbations mettent en évidence la vulnérabilité croissante des systèmes électriques modernes face à des environnements de plus en plus contraints. Leur analyse conjointe permet une compréhension globale des interactions réseau-équipement et souligne l'urgence de solutions adaptées : équilibrage des charges, filtrage harmonique, blindages, mise à la terre efficace. Ce chapitre met donc en lumière la nécessité d'une approche systémique pour garantir à la fois la qualité de l'alimentation électrique et la fiabilité des installations.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale :**

Ce mémoire a permis d'examiner en profondeur les principales perturbations affectant les réseaux basse tension, à travers trois axes majeurs : les variations d'amplitude (creux de tension, surtensions, coupures brèves), les distorsions de l'onde sinusoïdale (harmoniques, transitoires, CPL), les déséquilibres dans les systèmes polyphasés (tension, courant, phase) et les perturbations électromagnétiques (PEM).

Pour chaque type de perturbation, nous avons identifié les causes, les mécanismes de propagation, les effets sur les équipements électriques et électroniques, ainsi que les solutions de détection, de filtrage et de compensation. Il en ressort que la qualité de l'alimentation électrique repose sur une gestion rigoureuse de ces phénomènes, particulièrement dans un contexte où la densité de charges sensibles et non linéaires ne cesse de croître.

La combinaison de méthodes classiques (filtres passifs, équilibrage des charges, compensation de puissance réactive) et de technologies avancées (filtres actifs, systèmes ASI, dispositifs de protection CEM) constitue aujourd'hui une réponse adaptée aux exigences de fiabilité, de sécurité et de performance des installations modernes.

En somme, la maîtrise des perturbations électriques en BT nécessite une approche intégrée, fondée sur une compréhension théorique solide, une analyse précise des risques et une application cohérente des solutions techniques. C'est cette synergie qui permettra d'assurer une alimentation stable, conforme aux normes, et durablement efficace.

# Références bibliographiques

- [1] Calvas, R. O. L. A. N. D. (2001). Cahier technique n° 141 : Les perturbations électriques en BT ». Schneider Electric.
- [2] Abderrahmane TOUATI/Yacine SLIMANI « ETUDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES PERTURBES DESEQUILIBRES ET COURTS-CIRCUITS » Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou ,2014
- [3] M.A.E. Alali , « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, France, 2002.
- [4] Remidi rabah/Messaoudi youcef «Modélisation et commande d'un D-statcom» Mémoire De Fin D'étude Université YAHIA FARES DE MEDIA,2013
- [5] : <https://www.yumpu.com/fr/document/read/16845053/caracteristiques-et-cibles-de-qualite-de-la-tension-hydro-quebec>
- [6] thomasset, G.E.O.R.G.E.S. (1992). Cahier Technique n° 161 : Permutation Automatique Des Alimentations Dans Les Réseaux HT Et BT». Schneider Electric.
- [7] Lacroix, B., & Calvas, R. Cahier technique n 172.
- [8] KAROUT WASSILA /BELHADJ SOUMIA « ANALYSE DES SURTENSIONS ELECTRIQUES ET LEURS PROTECTIONS » MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER Intitulé, BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY ,2019
- [9] ZELLOUMA Mohammed" Étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par DSPACE1104", Mémoire De Fin D'étude Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2019.
- [10] DAHAK Abdelkader « Contribution à l'étude de la modélisation de la décharge électrostatique en vue de l'optimisation de la protection. » Doctorat 3ème cycle en Electrotechnique, UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES, 2017
- [11] MEKREBI A, YANTER M « COMPATIBILITE ELECTROMAGNETIQUE CAS D'UN PD2 TOUT – THYRISTORS CAS D'UN HACHEUR DE JONES » projet de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique El-Harrach Alger 1995
- [12] [https://www.itu.int/en/ITU-D/Technology/Documents/Events2016/CI\\_Training\\_ARB\\_Tunis\\_April16/Session8/IEC\\_61000-4-2\\_2008.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Technology/Documents/Events2016/CI_Training_ARB_Tunis_April16/Session8/IEC_61000-4-2_2008.pdf)
- [13] M. MADJDOUB Abdallah / M. YAHIA CHERIF kahina «Etude de la Stabilité de tension dans les réseaux Électriques » Mémoire de Fin de Cycle en vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique ,Universite abderrahmane mira-bejaia ,2022
- [14] GUENDOUD Djedjiga et BELACEL Billal « filtrage actif de puissance » Mémoire fin d'Etudes de Master Académique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.
- [15] BOUNAR Boutheyna « Les Courants Porteurs en Lignes pour L'organisation d'une Ville Intelligente » Mémoire de Master, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, 2017.
- [16] [https://fr.china-bison.com/what-is-generator-thd/#elementor-toc\\_\\_heading-anchor-2](https://fr.china-bison.com/what-is-generator-thd/#elementor-toc__heading-anchor-2).

- [17] <https://powerquality.blog/2023/09/08/effect-of-harmonics-on-power-transformers-a-practical-demonstration-and-analysis/>.
- [18] BELHADJ KHEIRA et BOUZIR NESSRINE « HARMONIQUES ET DEPOLLUTION DU RESEAU ELECTRIQUE » Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2022.
- [19] Cahier Technique, N. (2010). 152 : Les perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement, septembre 1999.
- [20] <https://circuitor.com/fr/articles-fr/harmoniques-origine-effets-et-solutions>.
- [21] Eajal, A. A., & El-Hawary, M. E. « Optimal capacitor placement and sizing in distorted radial distribution systems Part I : System modeling and harmonic power flow studies », Dans Actes de la 14e Conférence Internationale sur les Harmoniques et la Qualité de l'Énergie (ICHQP 2010), Bergame, Italie, 26–29 septembre 2010.
- [22] <https://blog.materielectrique.com/harmoniques-reseau-electrique>.
- [23] [https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Caract%C3%A9ristiques\\_%C3%A9lectriques\\_des\\_lampes](https://fr.electrical-installation.org/frwiki/Caract%C3%A9ristiques_%C3%A9lectriques_des_lampes).
- [24] BOUKADOUM AZIZ « CONTRIBUTION À L'ANALYSE ET LA REDUCTION DE LA POLLUTION HARMONIQUE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE » Mémoire de Magister, Université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007.
- [25] <https://americas.hammondpowersolutions.com/en/resources/faq/general/what-is-a-sm-ps-and-how-does-it-generate-harmonics?>
- [26] Gandhare, W. Z., & Lulekar, D. D. « Analyse de la qualité de l'énergie électrique dans les fours à arc électrique" Dans Actes de la Conférence Internationale sur les Énergies Renouvelables et la Qualité de l'Énergie (ICREPQ'07), Séville, Espagne, 28-30 mars 2007 (p. 272).
- [27] Naima LARDJANI « ETUDE DE LA COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE LORS D'UNE CHARGE NON LINEAIRE » Mémoire fin d'Etudes de Master Académique, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [28] M. Bouabibsa et A. Hafirassou « Amélioration de la qualité d'énergie dans le réseau électrique par la technique UPQC et identification des courants harmoniques » Mémoire fin d'Etudes de Master, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila, 2020.
- [29] T. GOURAUD, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse de doctorat, Nantes, France, (1997).
- [30] <https://www.habitatbiocompatible.com/actualites/informations/73-compteur-linky-protection-ondes-electromagnetiques.ht>

