

# QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ELECTRIQUE

- I) Rappels utiles pour comprendre les phénomènes qualifiant qualité de l'énergie ..... 3**
  - I.1) Le déphasage du fondamental du courant par rapport à la tension ou  $\cos \varphi$  ..... 3
  - I.2) Taux de distorsion harmonique..... 3
  - I.3) Taux Individuel de l'Harmonique de rang h..... 3
  - I.4) Taux de distorsion harmonique THD ou TDH..... 3
  - I.5) Taux Global de Distorsion harmonique ou facteur de distorsion total DF ..... 3
  - I.6) Puissances en régime périodique ..... 4
  - I.7) Puissances active ..... 4
  - I.8) Puissance apparente ..... 4
  - I.9) Facteur de puissance ..... 4
  - I.10) Puissance réactive ..... 4
  - I.11) Puissance déformante..... 4
  - I.12) Modélisation d'un câble, comportement fréquentiel ..... 5
  - I.13) Effet de peau (ou effet pelliculaire)..... 5
  - I.14) Les décibels..... 5
  - I.15) Taux de déséquilibre de tension triphasée..... 6
    - I.15.1) Taux de déséquilibre défini par NEMA: NEMA (National Equipment Manufacturers Association in USA) ..... 6
    - I.15.2) Vrai Taux de déséquilibre..... 6
- II) Nature des sources de perturbations ..... 7**
  - II.1) Natures des perturbations ..... 7
    - II.1.1) Les harmoniques..... 7
    - II.1.2) Les phénomènes transitoires (amplitude) ..... 8
    - II.1.3) Les phénomènes permanents (amplitude)..... 8
      - a) Les surtensions :  $V_{eff} > 1.1 \cdot V_{effnom}$  ..... 8
      - b) Les sous-tensions ou chutes de tension :  $0.1 \cdot V_{effnom} < V_{eff} < 0.9 \cdot V_{effnom}$  ..... 8
      - c) Les coupures (**Absence de tension**) de tension :  $V_{eff} < 0.1 \cdot V_{effnom}$ ..... 8
      - d) Les fluctuations (flicker (papillotement)) : des augmentations et des diminutions altérées d'amplitude qui restent dans la limite de  $\pm 10\%$ . ..... 8
      - e) Les déséquilibres de tensions de phase ..... 9
    - II.1.4) Les variations de fréquence ..... 9
  - II.2) Origines des perturbations ..... 10
    - II.2.1) Une perturbation externe : généralement naturelle telle que les chocs de foudre (décharges électrostatiques des nuages). ..... 10
    - II.2.2) Une perturbation interne : généralement industrielle ..... 12
- III) Effets des perturbations ..... 17**
  - III.1) Les effets instantanés des harmoniques..... 17
    - III.1.1) Défauts de fonctionnement ..... 17
    - III.1.2) Vibrations, bruits ..... 17
  - III.2) Les effets à termes des harmoniques ..... 17
    - III.2.1) Echauffement des câbles et des équipements ..... 17
    - III.2.2) Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs ..... 18
    - III.2.3) Echauffement, vieillissement des condensateurs ..... 18
  - III.3) Les effets de déséquilibre..... 19
    - III.3.1) Défauts de fonctionnement ..... 19
    - III.3.2) Vibrations, bruits..... 19

III.3.3) Echauffement des câbles et des équipements.....	19
<b>IV) Normes et Réglementation .....</b>	<b>20</b>
IV.1) CEI 61000 Norme sur toute la CEM.....	20
IV.2) Norme EDF pour la Qualité de l'électricité .....	21
IV.2.1) Energie réactive .....	21
IV.2.2) Harmoniques.....	21
IV.2.3) Contrat Emeraude : .....	22
IV.2.4) Déséquilibre de tension.....	23

**I) Rappels utiles pour comprendre les phénomènes qualifiant qualité de l'énergie**

**I.1) Le déphasage du fondamental du courant par rapport à la tension ou cos φ**

Le déphasage entre la tension et le courant si ceux-ci sont sinusoïdaux est noté φ. φ sera pris positif pour les phénomènes inductifs. Ce déphasage donne lieu à l'existence de puissances actives, réactives et apparentes. Comme seule la puissance active est nécessaire, il convient de lutter contre la puissance réactive afin de réduire la puissance apparente.

**I.2) Taux de distorsion harmonique**

Si une tension sinusoïdale est appliquée à un dipôle non linéaire, le courant consommé sera alternatif, déformé et riche en harmoniques. Son expression mathématique du courant est de cette forme :

$$i(t) = I_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_2\sqrt{2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_n\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_n) + \dots$$

La puissance active est alors égale à :

$$P = \langle ui \rangle = \left\langle U\sqrt{2} \sin(\omega t) \times I_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + U\sqrt{2} \sin(\omega t) \times \left( I_2\sqrt{2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_n\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_n) + \dots \right) \right\rangle$$

$$P = \underbrace{\left\langle U\sqrt{2} \sin(\omega t) \times I_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) \right\rangle}_{UI_1 \cos \varphi_1} + \underbrace{\left\langle U\sqrt{2} \sin(\omega t) \times \left( I_2\sqrt{2} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + I_n\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_n) + \dots \right) \right\rangle}_0$$

$$P = UI_1 \cos \varphi_1$$

**I.3) Taux Individuel de l'Harmonique de rang h**

$$S_h = \frac{I_h}{I_1}$$

ou  $I_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$ ,  $I_1$  représente la composante fondamentale,

**I.4) Taux de distorsion harmonique THD ou TDH**

On quantifie la déformation d'un signal par rapport à une sinusoïde par le taux de distorsion harmonique :

Dans le cas d'un courant on notera  $THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I^2 - I_1^2 - I_0^2}}{I_1}$

la puissance réactive mesurée est alors :

$$Q_{EDF} = UI_1 \sin \varphi_1 \text{ donc on connaît aussi la puissance déformante } D \text{ qui est d'ailleurs égale à } D = V_1 \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$$

Et la puissance déformante est liée au Taux de distorsion harmonique : on peut en effet montrer que :

$$THD = \frac{D}{V_1 I_1}$$

**I.5) Taux Global de Distorsion harmonique ou facteur de distorsion total DF**

De même on définit plus rarement le taux global de distorsion

$$TGD = DF = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I^2}} = \sqrt{\frac{I^2 - I_1^2 - I_0^2}{I^2}}$$

**I.6) Puissances en régime périodique**

En régime périodique, il existe encore plusieurs types de puissances. Les éléments réactifs créent des déphasages entre les tensions et les courants (entre les composantes spectrales en fait, voir chapitre sur les harmoniques) ce qui justifie encore les notions de puissances actives et réactives.

**I.7) Puissances active**

Pour un récepteur quelconque, alimenté par une tension quelconque  $v(t)$  périodique de période  $T$ , et traversé par un courant  $i(t)$ , la puissance active ou moyenne s'écrit uniquement à partir de la formule :

$$P = \langle p \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt \text{ (en W)}$$

Donc la puissance moyenne est due à l'influence de la valeur moyenne et de chaque harmonique :

$$P = \langle v \rangle \cdot \langle i \rangle + \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos \varphi_n$$

Cette puissance est uniquement due aux éléments dits actifs (résistances et éléments mécaniques), c'est à dire aux éléments qui consomment réellement de l'énergie.

**I.8) Puissance apparente**

Les grandeurs  $v(t)$  et  $i(t)$  étant périodiques, on les caractérise toujours par leurs valeurs efficaces  $V_{eff}$  et  $I_{eff}$ . On définit alors, la puissance apparente comme la grandeur nommée  $S$  :  $S = V_{eff} I_{eff}$  (en VA)

**I.9) Facteur de puissance**

Il apparaît ainsi toujours une notion de **facteur de puissance** qui s'écrit :  $k = \frac{P}{S}$

**I.10) Puissance réactive**

La puissance n'étant définie qu'en régime sinusoïdal, il faut considérer la décomposition en sinusoïdes dites "harmoniques" des grandeurs.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin \varphi_n$$

Si l'une des grandeurs (tension ou intensité) est sinusoïdale alors la puissance réactive n'est due qu'à la fréquence fondamentale (à la fréquence  $f$ ) du courant ou de la tension:  $Q = VI_1 \sin \varphi$

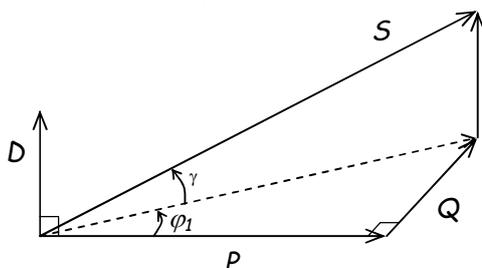
**I.11) Puissance déformante**

On appelle  $D$  la puissance dite "déformante". Cette puissance est liée à la présence d'harmoniques dans le courant ou la tension, c'est à dire au fait que l'un ou l'autre est non sinusoïdal.

Si les courants et les tensions sont sinusoïdaux, alors  $D=0$ .

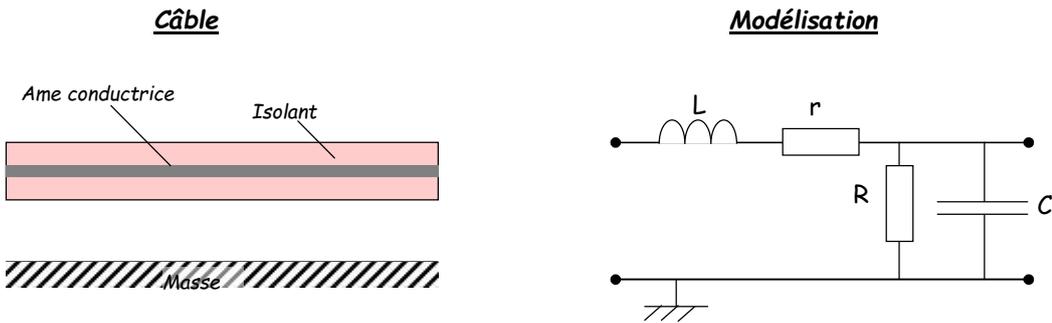
Les diverses puissances sont liées par la relation  $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$

On peut donc donner une représentation à trois dimensions de la participation de la puissance déformante dans la puissance apparente :



Rappel : dans le cas d'une tension sinusoïdale :  $D = V_1 \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = V_1 \times \sqrt{I^2 - I_1^2} = V_1 \times I_1 \times THD$

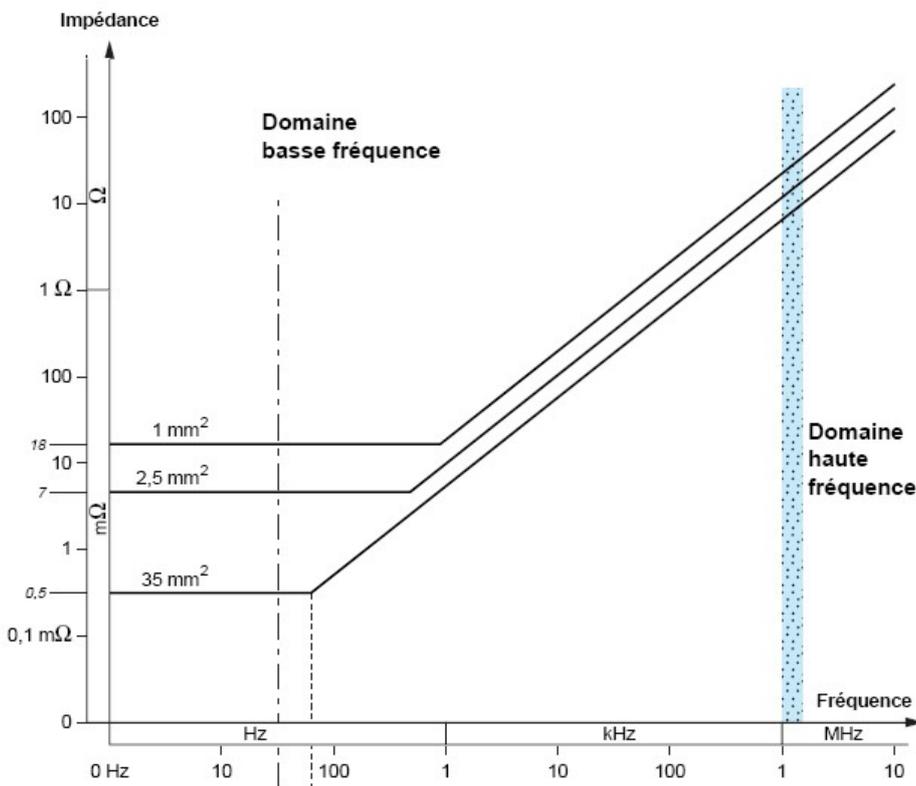
**I.12) Modélisation d'un câble, comportement fréquentiel**



En BF l'effet résistif lié à la section est prépondérant

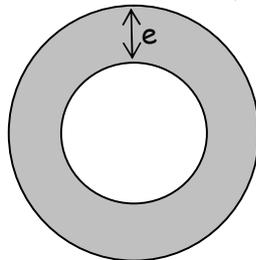
En HF l'inductance devient prépondérante et la réactance capacitive minime donnant lieu à une fuite du courant.

NB : un câble rond quel que soit sa section présente une inductance de 1μH/m



**I.13) Effet de peau (ou effet pelliculaire)**

En courant alternatif, le courant ne circule qu'en périphérie de l'âme d'un conducteur (effet de peau).



$$e = \frac{66}{\sqrt{f}}$$

- 50 Hz : e = 9,3 mm      importance de la section
- 400 Hz : e = 3,3 mm
- 1 Mhz : e = 66 μm      importance du périmètre

**I.14) Les décibels**

Le **bel** est un nombre sans dimension. Il permet d'exprimer des accroissements et des diminutions d'une grandeur à l'aide d'une fonction dont la variable de sortie varie peu quand la variable d'entrée varie beaucoup. Cette fonction est la fonction logarithme décimal, elle correspond à la sensibilité de l'oreille humaine.

Nous notons que tout accroissement de la puissance correspond à un nombre de **bels** positifs, toute diminution correspond à un nombre de **bels** négatifs.

Le **Bel** s'étant avéré une unité trop grande, on lui a substitué un sous multiple le **décibel** : 1 bel = 10 décibels

Par exemple le gain en puissance est tel que

$$G = 10 \log \left( \frac{p_s}{p_e} \right) = 10 \log \left( \frac{u_s^2 / R}{u_e^2 / R} \right) = 20 \log \left( \frac{u_s}{u_e} \right)$$

Cette définition est celle utilisée pour définir le coefficient de couplage entre une source de perturbation et la victime

$$\left. \begin{array}{l} P_t : \text{puissance transmise} \\ P_r : \text{puissance reçue} \end{array} \right\} K_{dB} = 10 \log \frac{P_t}{P_r}$$

**I.15) Taux de déséquilibre de tension triphasée**

Un déséquilibre d'un système de triphasé de tension ou de courant est se produit lorsque les tensions ou les courants triphasés s'éloignent différemment de la condition équilibrée nominale. Cette condition est définie par l'égalité des amplitudes de tensions ou des courants triphasés qui sont espacé vectoriellement de 120° l'un par rapport à l'autre. Le déséquilibre peut être un déséquilibre d'amplitude, un déséquilibre de d'angle de phase ou les deux à la fois.

Le taux de déséquilibre d'un système de triphasé de tension ou de courant peut être calculé selon deux méthodes, comme suit :

**I.15.1) Taux de déséquilibre défini par NEMA: NEMA (National Equipment Manufacturers Association in USA)**

NEMA définit le déséquilibre de système triphasé de tension par :

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

Cette définition est une définition approximative du vrai taux de déséquilibré. On peut obtenir ce taux de déséquilibre dans un réseau électrique triphasé, comme suit :

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

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

Exemple

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

**I.15.2) Vrai Taux de déséquilibre**

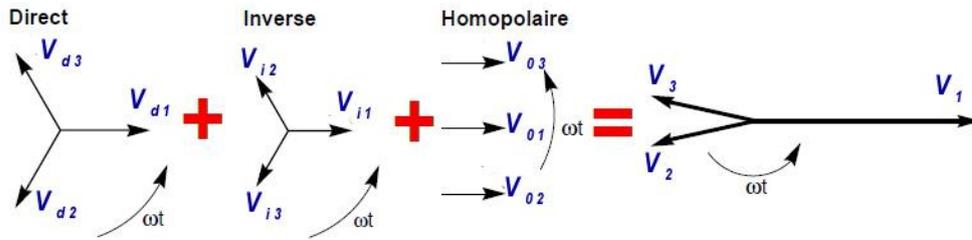
Cette définition éditée par IET (Institution of Engineering and Technology, UK) est dite définition vraie ou définition IET du taux de déséquilibre. Selon cette définition, le taux de déséquilibre est exprimé comme suit

Composante directe de tension

$$DES_{IET} = \frac{\quad}{\quad} \cdot 100$$

Composante inverse de tension

Un système triphasé de tension (ou courant) peut être constitué vectoriellement de la somme de trois sous-systèmes triphasés symétriques : système direct (séquence positive), système inverse (séquence négative) et système homopolaire (séquence nulle). Le calcul de ces composantes se fait par la transformation de Fortescue.



## II) Nature des sources de perturbations

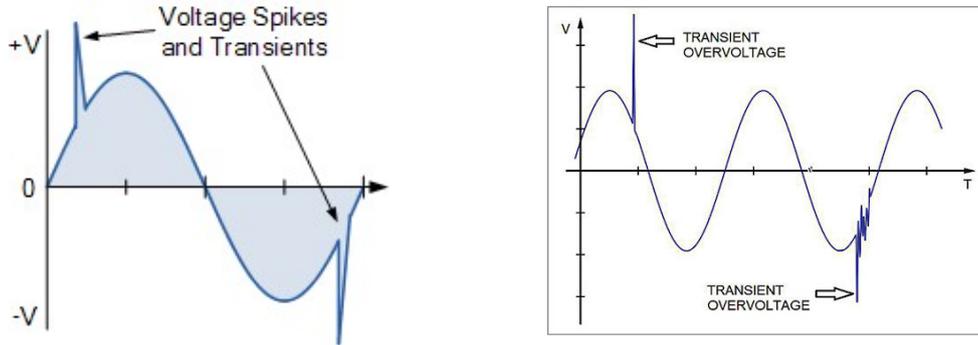
### II.1) Natures des perturbations

#### II.1.1) Les harmoniques

<p>Les harmoniques :</p> <p>Sont des multiples entiers du fondamental. Elles sont dues à l'existence de charges non linéaires.</p>	
<p>Les inter-harmoniques :</p> <p>Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental.</p> <p>Elles sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certaines machines (commande par train d'ondes, cyclo-convertisseurs, ...).</p>	
<p>Infra-harmoniques :</p> <p>Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.</p> <p>Elles sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certaines machines (commande par train d'ondes, ...).</p>	

**II.1.2) Les phénomènes transitoires (amplitude)**

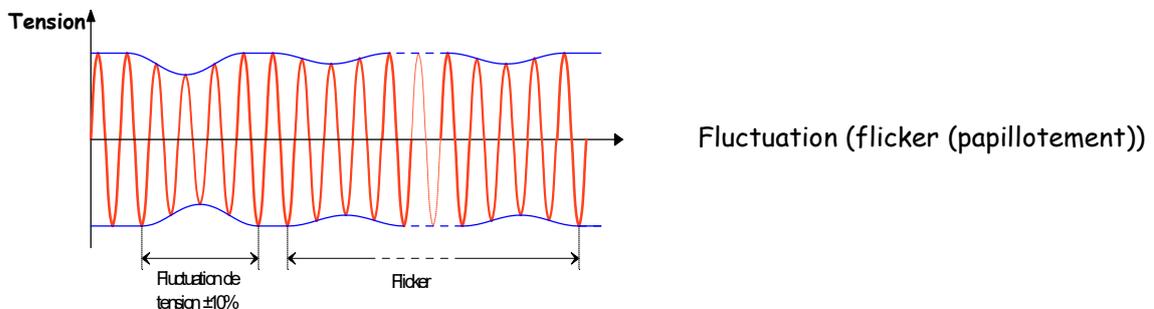
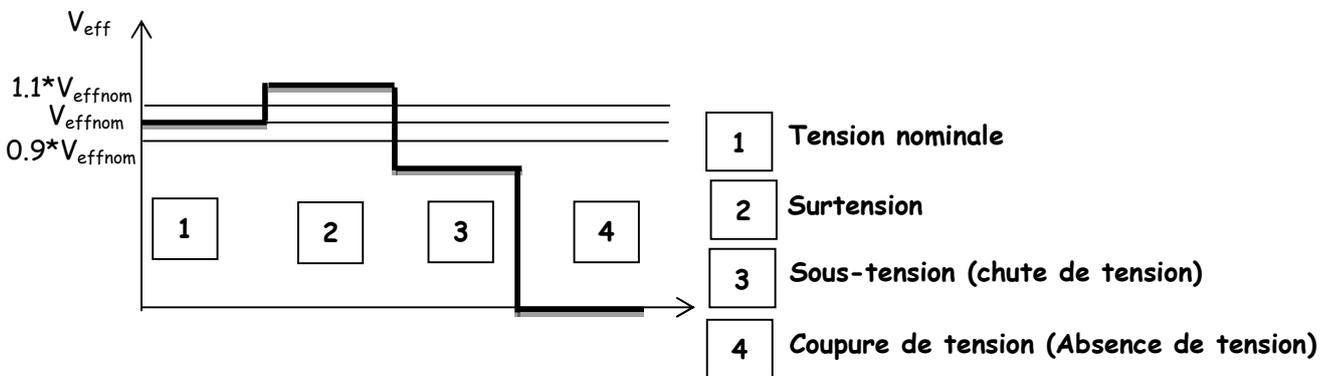
Ce sont des variations instantanées (amplitude) très courtes (quelques centièmes ou millièmes d'un cyclique ou d'une période du fondamental). Elles sont dues à des forts appels de courants lors de commutations des composants d'électronique de puissance, des contacteurs, disjoncteurs, ou aux phénomènes météo (foudre).



**II.1.3) Les phénomènes permanents (amplitude)**

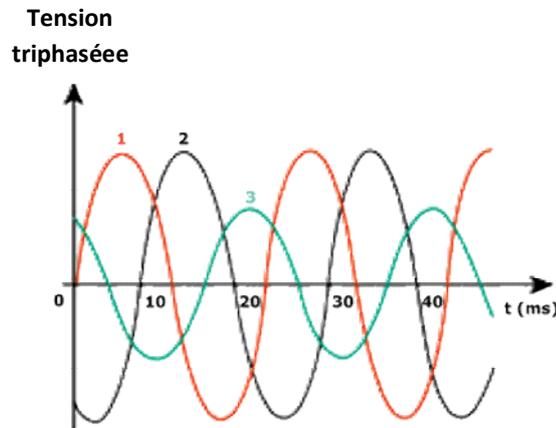
Ce sont des variations d'amplitude qui durent plusieurs cycles (périodes du fondamental). On peut citer :

- a) Les surtensions :  $V_{eff} > 1.1 * V_{effnom}$
- b) Les sous-tensions ou chutes de tension :  $0.1 * V_{effnom} < V_{eff} < 0.9 * V_{effnom}$
- c) Les coupures (**Absence de tension**) de tension :  $V_{eff} < 0.1 * V_{effnom}$
- d) Les fluctuations (flicker (papillotement)) : des augmentations et des diminutions altérées d'amplitude qui restent dans la limite de  $\pm 10\%$ .



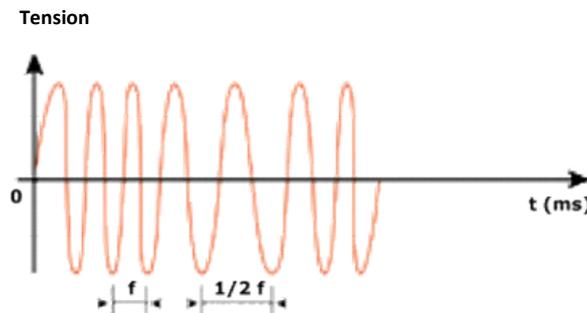
e) Les déséquilibres de tensions de phase

Si la puissance des charges monophasées est mal-répartie, il y a un risque de déséquilibre de tension entre les phases suite au déséquilibre des courants de lignes alimentant les charges monophasées déséquilibrées. Ces déséquilibres engendrent des composantes inverses de courant qui provoquent des couples de freinage et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif.



II.1.4) Les variations de fréquence

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

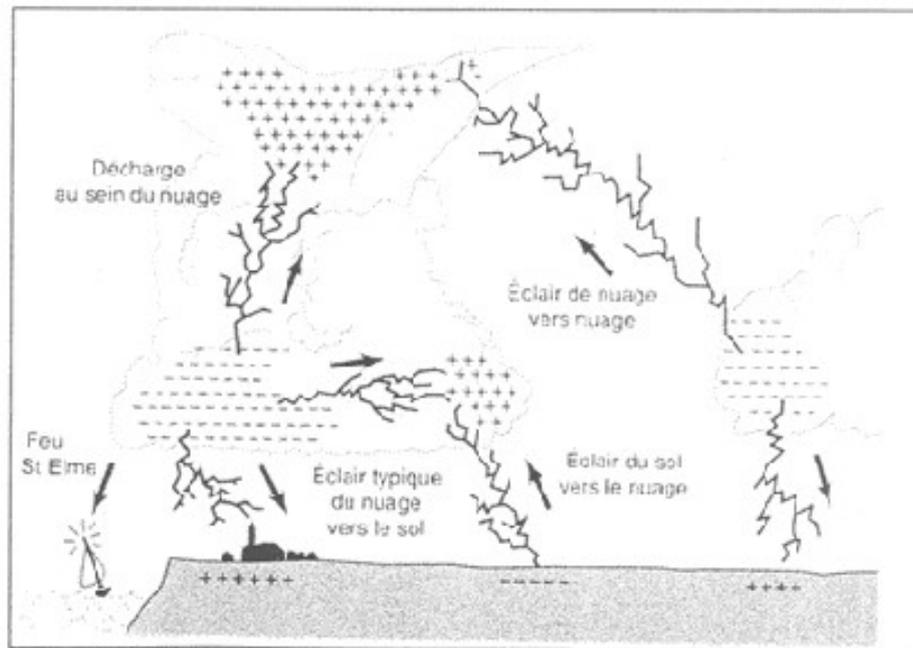


**II.2) Origines des perturbations**

Toutes les perturbations de tension du réseau électrique sont dues essentiellement à :

**II.2.1) Une perturbation externe : généralement naturelle telle que les chocs de foudre (décharges électrostatiques des nuages).**

Le foudre (éclaire) se produit quand l'accumulation des charges opposées entre deux zones est suffisante pour le déclencher.



Représentation de toutes les formations d'éclair

- ↯ Il peut se dérouler à l'intérieur d'un même nuage. Et si de plus, on ne peut entendre le tonnerre car le nuage est à trop grande distance, on parle plus précisément d'**éclair de chaleur**.
- ↯ Il peut se présenter dans le nuage jusque dans l'air.
- ↯ Il peut se manifester entre deux nuages.

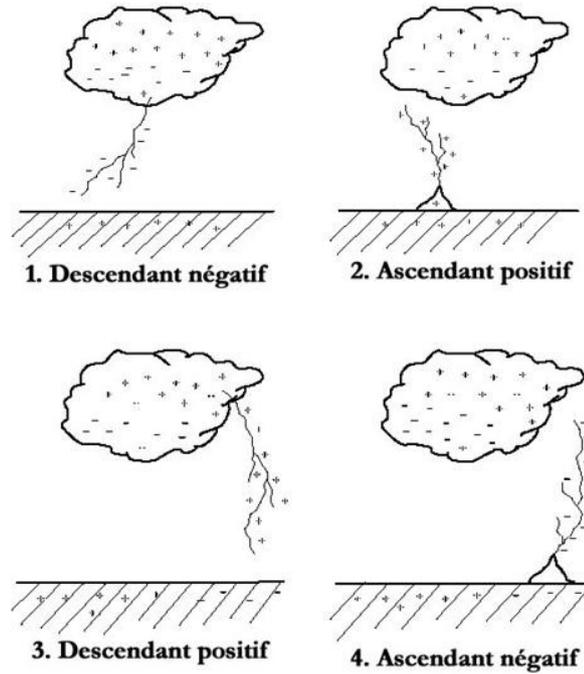
Il faut savoir que les décharges inter et intra nuages représentent plus de la moitié des décharges de foudre. Cependant, ce sont essentiellement les décharges nuage-sol qui ont été l'objet d'études les plus poussées d'une part à cause de leur influence négative sur l'homme et l'environnement, et d'autre part, car ils sont plus faciles étudiés d'un point de vue strictement matériel.

- ↯ Il peut enfin se produire entre le nuage et le sol : c'est le coup de foudre (c'est la version la mieux expliquée et la plus étudiée).

Souvent, les premiers coups de foudre surviennent après les premières décharges intra nuageuses.

**↯ Le feu de St ELME**

Parfois, quand l'accumulation des charges opposées est insuffisante pour déclencher un coup de foudre, une quantité d'étincelles bleues apparaissent en hauteur au sommet d'objets pointus à l'extrémité du nuage d'orage. Ce phénomène, remarqué très tôt au bout des vergues et en haut des mâts des navires, fut appelé feu Saint-Elme, du nom du saint patron des marins.



Formations foudre nuage-sol

Dans les régions tempérées, Le descendant négatif (1) représente plus 90% des coups de foudre nuage-sol (c'est la forme la plus commune). Le descendant positif (3) quant à lui fait moins de 10% des apparitions (nuage-sol). Enfin les autres, relativement rares, apparaissent plutôt aux sommets des montagnes et des longues structures.

Les foudres (éclairs) produisent une énergie électrique impulsionnelle extrêmement importante :

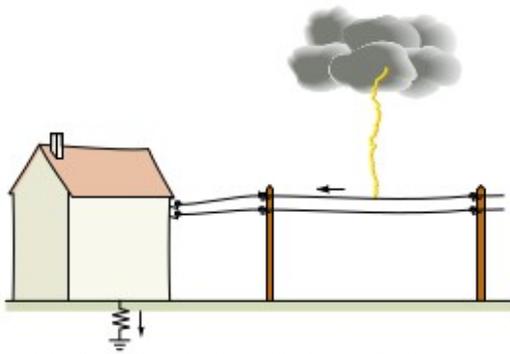
- > De plusieurs milliers d'ampères (et de plusieurs milliers de volts).
- > De haute fréquence (de l'ordre du mégahertz).
- > De courte durée (de la microseconde à la milliseconde).

Les coups de foudre peuvent toucher les installations électriques de trois manières différentes :

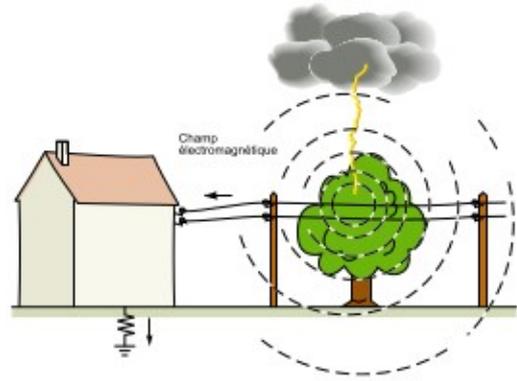
- > Par coup de foudre direct sur une ligne électrique aérienne. La surintensité et la surtension peuvent alors se propager à plusieurs kilomètres du point d'impact
- > Par coup de foudre à proximité d'une ligne électrique. C'est le rayonnement électromagnétique qui induit un fort courant et une surtension dans la ligne.

Dans ces deux cas, le danger pour l'installation électrique arrive par l'alimentation réseau.

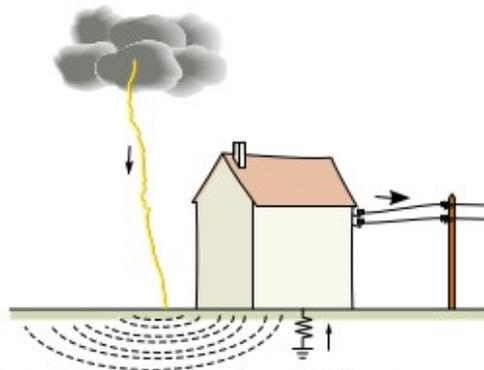
- > Par coup de foudre à proximité des bâtiments. La terre est alors chargée et monte en potentiel. Le réseau étant à potentiel plus bas, il se crée un courant qui va traverser l'installation électrique en entrant par la terre.



Coup de foudre sur une ligne aérienne (électrique ou téléphonique)



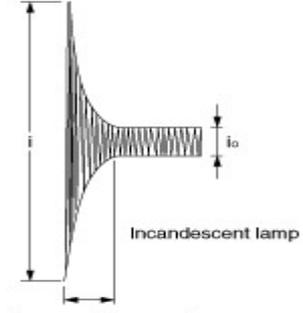
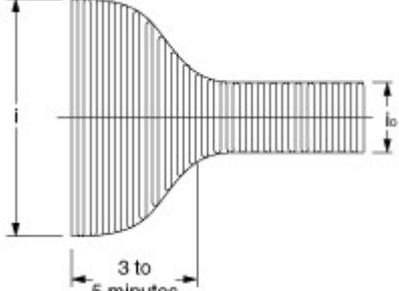
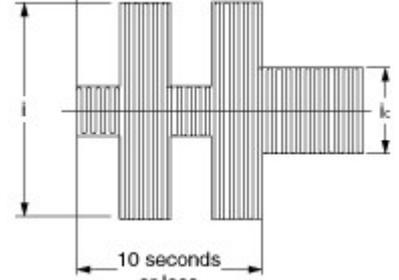
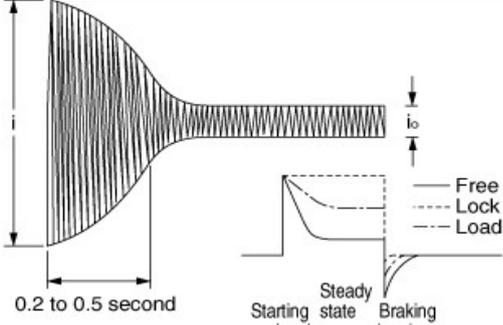
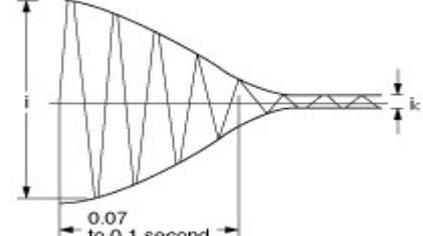
Coup de foudre proche de bâtiments (surtension dûe au rayonnement électromagnétique).



Coup de foudre proche de bâtiments (remontée de potentiel de terre)

**II.2.2) Une perturbation interne : généralement industrielle**

Telle que le raccordement de fortes charges équilibrées ou déséquilibrées, la coupure de circuits inductifs, la manœuvre d'appareillage de connexion en HT et la commutation de convertisseurs d'électronique de puissance. Cela engendre la circulation de courants triphasés transportés qui peuvent être faibles ou forts (surcharge, court-circuit), équilibrés (charges équilibrées) ou déséquilibrés (charges déséquilibrées), sinusoïdaux (charges linéaires) ou pollués (charges non linéaires), dans les lignes électriques d'impédances données. Cette circulation de courants triphasés produit, par voix de la loi d'Ohm, des chutes de tension dans les lignes qui peuvent être eux aussi, faibles ou fortes, équilibrées ou déséquilibrées, sinusoïdales ou polluées. Par conséquence, les tensions finales des lignes peuvent être, sinusoïdales ou déformées, équilibrées ou déséquilibrées. Les tableaux suivants montrent les différentes charges électriques (AC) du réseau et les formes d'onde des courants qu'elles absorbent, ainsi que quelques formes d'ondes des tensions de charges finales ?

Type de la charge AC	Forme du courant	Courant de démarrage / Courant nominal ( $i_{dem}/i_{nom}$ )
Charge Résistive		1 fois
Lampe à Incandescence	 <p style="text-align: center;">Incandescent lamp Approx. 1/3 second</p>	10 à 15 fois
Lampe à Mercure	 <p style="text-align: center;">3 to 5 minutes</p>	Approximativement 3 fois
Lampe Fluorescente	 <p style="text-align: center;">10 seconds or less</p>	5 à 10 fois
Moteur électrique	 <p style="text-align: center;">0.2 to 0.5 second</p> <p style="text-align: center;">Free Lock Load</p> <p style="text-align: center;">Starting state    Braking</p>	5 à 10 fois
Charge électrique à Solenoid	 <p style="text-align: center;">0.07 to 0.1 second</p>	10 à 20 fois

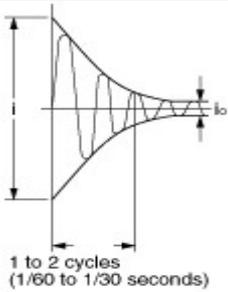
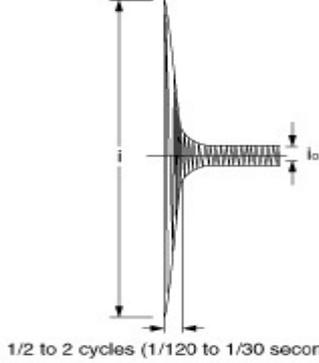
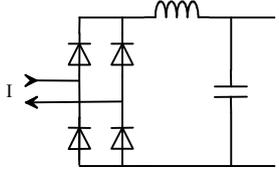
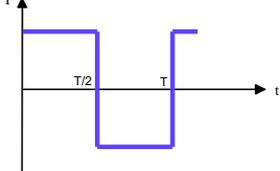
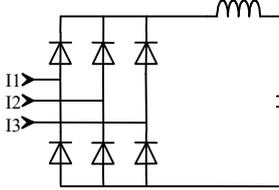
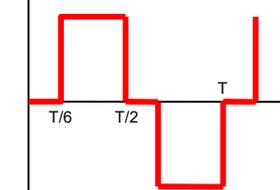
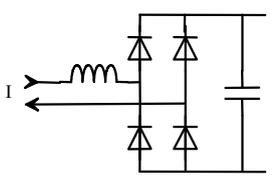
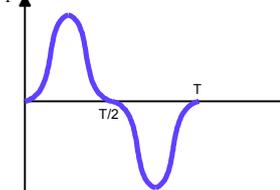
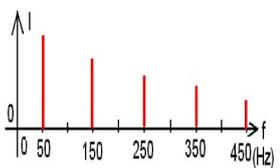
<p><b>Charge à contact Electromagnetic</b></p>		<p>3 à 20 fois</p>
<p><b>Charge Capacitive</b></p>		<p>20 à 40 fois</p>
<p>Lampe à vapeur du Sodium</p>		<p>1 à 3 fois</p>
<p>Charge avec Transformateur</p>		<p>5 à 15 fois</p>

Tableau 1 Ratio du courant d'appel de démarrage par rapport au courant nominal des différentes charges AC dans un réseau électrique

Schéma	Forme du courant	Harmoniques	Remarque
		<p>3,5,7,9,11,13...</p>	<p>Ce type de charge génère des courants harmoniques de rangs impairs sur une large bande. Le redresseur triphasé diffère du redresseur monophasé uniquement par l'absence d'harmoniques de rang 3 et multiples de 3</p>
		<p>5,7,11,13....</p>	
		<p>3,5,7,9,11,13...</p> 	

		<p>5,7,11,13...</p>	<p>de courant et par conséquent de réduire l'amplitude des harmoniques de rang élevé. Le spectre harmonique de ce type de redressement dépend de la valeur des inductances.</p>
		<p>3,5,7,9,11,13...</p>	<p>Ce type de redresseur est relativement répandu dans de nombreux appareils industriels</p>
			<p>(Variation de vitesse des moteurs asynchrones) et domestiques car il est très économique, mais très pollueur pour le réseau d'énergie.</p>
		<p>5,7,11,13...</p>	
<p><small>Fig. 5 : pont redresseur triphasé avec filtrage capacitif</small></p>			

Tableau 2 Courants absorbés par les différents redresseurs non-commandés et leur contenu harmonique

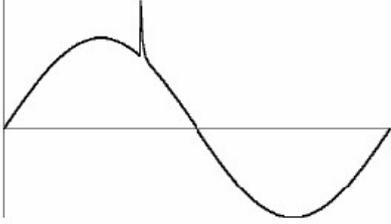
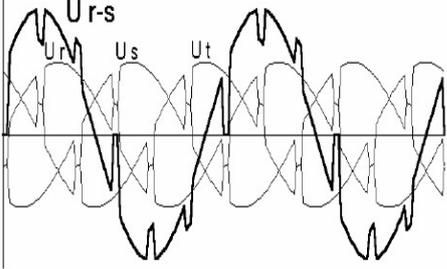
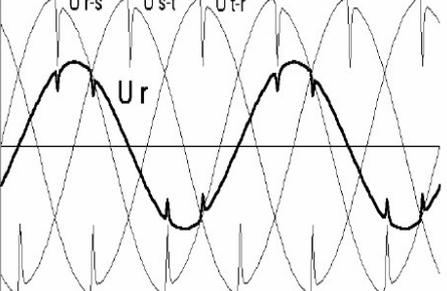
	<p>Surtension transitoire due au déclenchement d'un appareil BT</p>
	<p>Encoches de commutation dues à un redresseur triphasé</p>
	<p>Encoches de commutation dues à un gradateur triphasé</p>
	<p>Oscillation transitoire amortie due à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs</p>

Tableau 3 Quelques formes d'ondes des tensions de charges déformées suites aux perturbations dues aux courants des charges électriques

**III) Effets des perturbations**

**III.1) Les effets instantanés des harmoniques**

**III.1.1) Défauts de fonctionnement**

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Dérangement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension

Elles peuvent influencer les liaisons et les équipements "courants faibles", par diaphonie inductive, entraînant des pertes d'exploitation.

Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques (par exemple un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3 % avec un taux de 5 % d'harmonique 5 sur le courant et la tension).

Les récepteurs de télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système.

La circulation de courants harmoniques dans le neutre entraîne une chute de tension dans ce conducteur. Dans le cas du **SLT TN-C**, les masses des différents équipements ne sont plus au même potentiel, ce qui peut être dangereux et est de nature à perturber les échanges d'informations entre deux équipements "intelligents".

**III.1.2) Vibrations, bruits**

Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances).

Des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes.

Les harmoniques de rang  $3k+1$  forment des systèmes triphasés directs (couple moteur pulsatoire)

Les harmoniques de rang  $3k-1$  forment des systèmes triphasés inverses (couple de freinage)

Les harmoniques de rang  $3k$  forment des systèmes homopolaires (couple de freinage)

Ils peuvent entraîner une destruction du matériel.

**III.2) Les effets à termes des harmoniques**

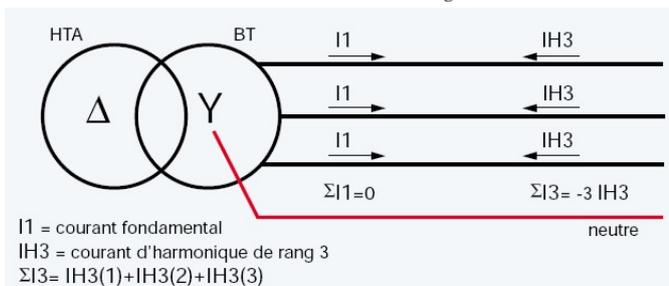
**III.2.1) Echauffement des câbles et des équipements**

Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, on peut citer :

l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau ;

l'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable. D'une façon générale, tous les équipements (tableaux électriques) soumis à des tensions ou traversés par des courants harmoniques ont des pertes accentuées et devront faire l'objet de déclassements éventuels.

Les harmoniques de rang multiples de 3 étant en phase, ils s'ajoutent algébriquement dans le neutre. Ce courant peut atteindre jusqu'à  $\sqrt{3} \times I_{\text{ligne}}$  ; il y a donc surcharge importante sur le neutre



**III.2.2) Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs**

Pertes supplémentaires dans les machines, dans leur stator (cuivre et fer) et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) par suite des différences importantes de vitesse, entre les champs tournants harmoniques et le rotor.

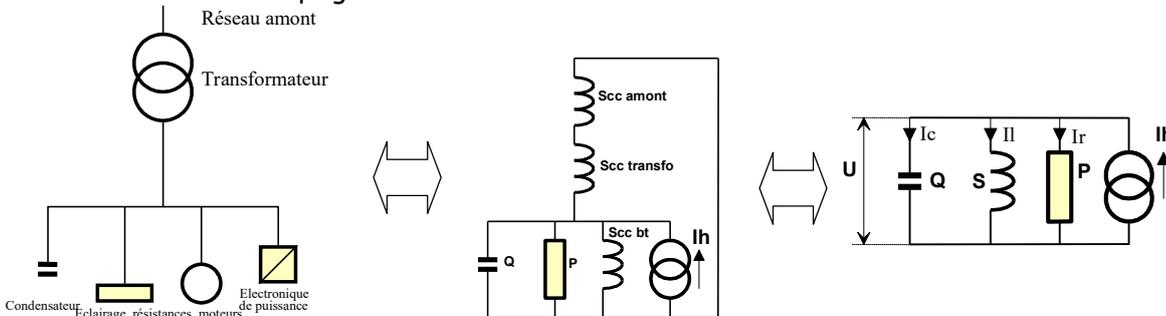
Pertes supplémentaires dans les transformateurs dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis aux courants de Foucault (dans le circuit magnétique).

circulation de l'harmonique de rang 3 dans le triangle d'un transformateur Δ-Y ce qui crée donc un échauffement supplémentaire du transformateur et une distorsion de la tension primaire  
Couple pulsatoire.

**III.2.3) Echauffement, vieillissement des condensateurs**

Les condensateurs branchés en parallèle (pour le relèvement du facteur de puissance par exemple) ont une impédance (décroissant avec la fréquence) faible pour les harmoniques et sont donc parcourus par ceux-ci provoquant ainsi des échauffements

Ce risque de résonance avec le circuit amont (inductance réseau), suite à la circulation de certains rangs harmoniques peut entraîner une amplification du courant dans le condensateur provoquant sa surcharge et pouvant conduire à son claquage.



Ce schéma peut être représenté sous forme d'un circuit parallèle (bouchon) avec une seule inductance équivalente à toutes les inductances du circuit.

L'impédance de ce réseau vue du TGBT est la suivante : 
$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(C\omega - \frac{1}{L\omega}\right)^2}}$$

A la fréquence de résonance  $f_0 (\omega_0)$ , l'impédance est :  $Z = R$

A la résonance toute l'intensité  $I_0$ , de rang  $n$  de résonance générée par le circuit perturbateur, passe dans la résistance  $R$ . Ce qui signifie pratiquement que cette intensité est absorbée par les charges consommant de la puissance active.

Il existe alors une tension harmonique  $U_0$  de rang  $n$  :  $U_0 = RI_0$

Les courants  $f_0$  dans les inductances et dans la batterie de condensateurs sont :

$$I_L = I_C = \frac{U_0}{L\omega_0} = U_0 C \omega_0 \Rightarrow \frac{RI_0}{L\omega_0} = RI_0 C \omega_0 \quad \text{et si l'on pose}$$

$$k = \frac{R}{L\omega_0} = RC\omega_0$$

On constate que les inductances et la batterie de condensateurs sont parcourues par un courant du rang résonnant qui est multiplié par le coefficient  $k$ . Chaque fois que ce coefficient sera supérieur à 1 (ce qui est fréquent), la présence des condensateurs amplifient les courants harmoniques injectés par les pollueurs de l'installation.

Ce risque sera augmenté si le réseau est peu chargé en récepteurs actifs. Dans ces conditions la résistance équivalente  $R$  augmente entraînant une augmentation du coefficient  $k$ . Les courants harmoniques du rang de résonance sont alors intenses dans le réseau, et présentent un risque certain pour les condensateurs.

D'une manière générale, en connaissant la puissance de court-circuit  $S_{cc}$  aux bornes d'une batterie de condensateurs de puissance  $Q$ , le rang de résonance  $n_0$  sera : 
$$n_0 = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

### **III.3) Les effets de déséquilibre**

#### **III.3.1) Défauts de fonctionnement**

Sur les systèmes électroniques, les tensions déséquilibrées du réseau électrique peuvent perturber les dispositifs de régulation. En effet la forme de la tension redressée qui va être de mauvaise qualité et non pas la commande de commutations des thyristors, car lorsque les grandeurs déséquilibrées déplacent, le passage par zéro de la tension reste le même que dans le cas équilibré des tensions du réseau électrique.

La circulation de courant dans le neutre entraîne une chute de tension dans ce conducteur. Dans le cas du **SLT TN-C**, les masses des différents équipements ne sont plus au même potentiel, ce qui peut être dangereux et est de nature à perturber les échanges d'informations entre deux équipements "intelligents".

#### **III.3.2) Vibrations, bruits**

Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants triphasés déséquilibrés généreront des vibrations, surtout dans les appareils électromagnétiques e(transformateurs).

Des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants déséquilibrés, donneront des vibrations dans les machines tournantes.

#### **III.3.3) Echauffement des câbles et des équipements**

Les pertes des câbles traversés par des courants triphasés déséquilibrés sont majorées, notamment pour le conducteur neutre, entraînant une élévation de température. En effet, Les courants triphasés déséquilibrés, s'ajoutent dans le neutre. Ce courant peut atteindre jusqu'à  $\sqrt{3} \times I_{\text{ligne}}$  ; il y a donc surcharge importante sur le neutre

**IV) Normes et Réglementation**

Les normes sont des directives, mise en place par des organisations d'expertises techniques, qui définissent les limites de stabilité et de fiabilité du réseau électrique. Ces directives concernent le producteur, le distributeur et le consommateur d'énergie électrique. Il existe plusieurs normes couvrant les différents aspects techniques électriques du réseau, tels que :

**IV.1) CEI 61000 Norme sur toute la CEM**

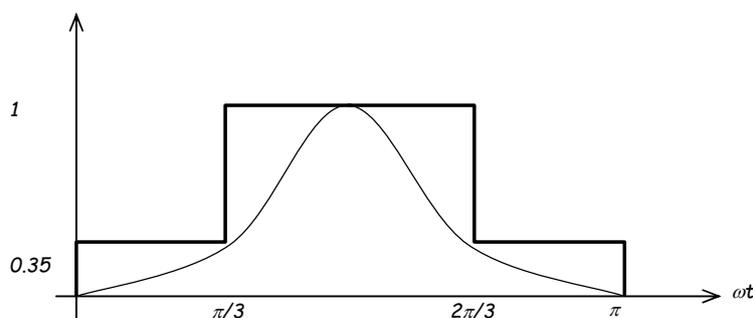
Il existe plusieurs normes. A titre d'exemples, les niveaux de compatibilité électromagnétique (**qualité de la tension d'alimentation**) préconisés par les normes CEI 61000-2-2 (Basse tension (BT)) et CEI 61000-2-4 (installations industrielles) sont :

- Matériel de classe 1 : appareils sensibles
- Matériel de classe 2 : appareils moyennement sensibles
- Matériel de classe 3 : appareils de fortes puissance

Rang harmonique	Taux individuel d'harmonique (%)				
	Réseau public		Installations industrielles		
	BT	HT	Matériel classe 1	Matériel classe 2	Matériel classe 3
2	2	1,5	2	2	3
3	5	2	3	5	6
4	1	1	1	1	1,5
5	6	2	3	6	8
6	0,5	0,5	0,5	0,5	1
7	5	2	3	5	7
8	0,5	0,2	0,5	0,5	1
9	1,5	1	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,2	0,5	0,5	1
11	3,5	1,5	3	3,5	5
12	0,2	0,2	0,2	0,2	1
13	3	1,5	3	3	4,5
Taux de distorsion global THD <sub>u</sub> (%)	8	3	5	8	10

Les niveaux de compatibilité préconisés (niveau d'émission harmonique) par les normes CEI 61000-3-2 (tout matériel autre qu'industriel consommant moins de 16 A (si supérieur à 16A : pas de normes) sont :

- Classe A : appareils triphasés équilibrés et tous les autres sauf ceux des classes qui suivent
- Classe B : Outils portables
- Classe C : appareils d'éclairage incluant les gradateurs
- Classe D : appareil de P<600W ayant un courant de forme spéciale de gabarit ci-dessous (ex : alimentation à découpage de téléviseurs ou micro-ordinateur)



**Classe A**

Rang de l'harmonique	Courant harmonique maximal	Rang de l'harmonique	Courant harmonique maximal
Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
3	2,3 A	2	1.08 A
5	1,14 A	4	0,43 A
7	0,77 A	6	0.30 A
9	0,4 A	8 < n < 40	0,23 × 8 / n
11	0,33 A		
13	0,21 A		
15 < n < 39	0,15 × 15 / n		

**Classe B**

Celles de la classe A\*1.5

**Classe C**

Rang de l'harmonique	Courant harmonique maximal
2	2 A
3	30 × f <sub>p</sub> = 18% de I <sub>h1</sub>
5	10 A
7	7 A
9	5 A
11 < n < 39	3 A

**Classe D**

Rang de l'harmonique	Courant maximal par Watt (mA/W)	Courant maximal en Ampères
2	3.4	2.3
3	1.9	1.14
5	1	0.77
7	0.5	0.4
9	0.35	0.3
11 < n < 39	3.85/n	Voir Classe A

**IV.2) Norme EDF pour la Qualité de l'électricité**

**IV.2.1) Energie réactive**

En France, EDF fixe un seuil de facturation de l'énergie réactive ; la consommation d'énergie réactive (kvarh) est gratuite si :  $\tan \varphi = \frac{kVArh}{kWh} < 0,4$

Avec kVArh et kWh les consommations mensuelles.

L'énergie réactive dépassant ce seuil est facturée

**IV.2.2) Harmoniques**

Le tarif vert d'EDF engage ses abonnés et EDF sur le niveau de pollution

La démarche d'EDF est de généraliser ses nouveaux contrats "EMERAUDE". A travers ce contrat :

EDF s'engage sur un nombre standard de coupures brèves, deux coupures pour travaux inférieures à 4 heures, des variations de tension < ou = 5%, un niveau de déséquilibre de tension de plus ou moins 2%.

Rangs		Hn (%)
Pairs	Impairs	
2		2
	3	5
4		1
> 4		0,5
	5	6
	7	5
	9	1.5
	11	3.5
	13	3
	15	0.5
	17	2
	19	1.5
	21	0.5

De son côté, l'utilisateur s'engage sur les perturbations générées, de type à coup de tension (maxi 5%), déséquilibre (maxi 1%), flicker (selon recommandation CEI 1000-2-2), courants harmoniques rejetés, selon tableau suivant

Rangs		Hn (%)
Pairs	Impairs	
2		2
	3	4
4		1
> 4		0,5
	5	5
	7	5
	9	2
	11	3
	13	3
	>13	2

**IV.2.3) Contrat Emeraude :**

D'après le contrat EMERAUDE d'EDF, les deux parties (fournisseur et récepteur) doivent s'engager à respecter les normes limitant les perturbations harmoniques. De son côté, EDF s'engage à ce que les taux individuels de tension harmonique, exprimés en pourcentage de la tension fondamentale  $V_1$  pour les réseaux HTA (1 à 50 kV), ne dépassent pas les seuils donnés dans le tableau ci-dessous.

Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA)

Concernant les réseaux HTB (plus de 50 kV), EDF s'engage à ne pas dépasser les seuils donnés dans le tableau suivant :

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
non multiple de 3		multiple de 3		Rang	$V_h/V_1$ (%)
Rang	$V_h/V_1$ (%)	Rang	$V_h/V_1$ (%)		
5 et 7	2	3	2	2	1,5
11 et 13	1,5	9	1	4	1
17 et 19	1	15 et 21	0,5	6 à 24	0,5
23 et 25	0,7	le THD global de tension ne dépassant pas 3 %.			

## Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB)

Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF à travers le contrat EMERAUDE sont données dans le tableau ci-dessous:

<i>Rangs impaires</i>	$I_h/I_1$ (%)	<i>Rangs paires</i>	$I_h/I_1$ (%)
3	4	2	2
5 et 7	5	4	1
9	2	>4	0,5
11 et 13	3		
> 13	2		

## Limitation EMERAUDE des courants harmoniques

Pour un harmonique pair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 0,6\%$

Pour un harmonique impair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 1\%$ ,

Pour le taux de distorsion global de tension : THD < 1,6 %.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains

Concernant la puissance réactive, EDF autorise ses clients à en consommer, sans être facturé, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance  $\cos \varphi > 0,928$  ou par un angle de phase  $\varphi > 21,8^\circ$ .

**IV.2.4) Déséquilibre de tension**

La démarche d'EDF est de généraliser ses nouveaux contrats "EMERAUDE". A travers ce contrat : EDF s'engage de fournir un niveau de déséquilibre de tension pas plus de plus ou moins 2%.