

4.9. Les circuits électriques en régime non sinusoïdal

4.9.1. Notion de charges

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé équilibré. Selon leurs caractéristiques d'entrée, certaines charges peuvent perturber cette distribution.

4.9.1.1. Charge linéaire

Une charge est dite "linéaire" si le courant qu'elle absorbe est sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur ne génère pas d'harmonique. Ex. : convecteurs, moteurs en régime établi, ...

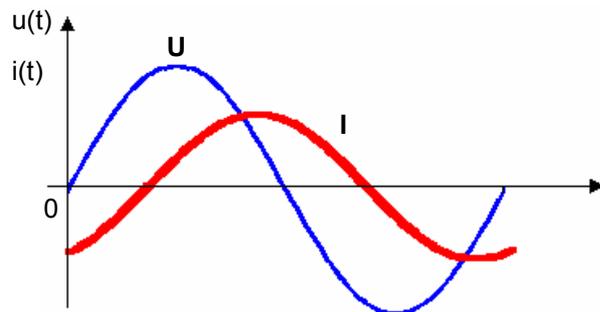


Fig. 4.9-1

4.9.1.2. Charge non linéaire

Une charge est dite "non linéaire" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ce type de récepteur est générateur d'harmoniques. Ex. : alimentation à découpage, moteurs au démarrage, mise sous tension de transformateurs, ...

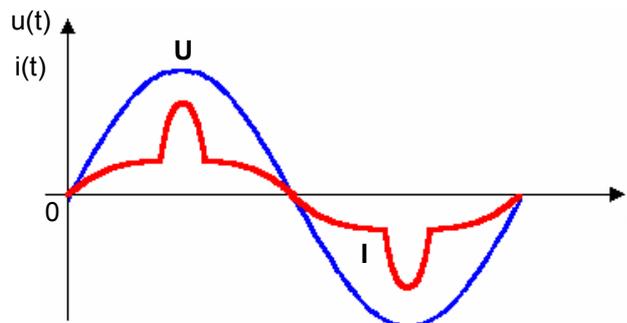


Fig. 4.9-2

4.9.2. Caractérisation des grandeurs alternatives non sinusoïdales

4.9.2.1. Décomposition harmonique d'une fonction périodique

FOURIER a démontré que toute fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence f peut être représentée selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme composée :

- d'un terme sinusoïdal à la fréquence f de valeur efficace Y_1 . Ce terme est appelé **fondamental**.
- de termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à n fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces Y_n . Ces autres fréquences multiples du fondamental sont appelées **harmoniques**.
- d'une éventuelle composante continue d'amplitude Y_0 .

La formule correspondant à la décomposition harmonique d'une fonction périodique courant ou tension $y(t)$ est la suivante :

$$y(t) = Y_0 + Y_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2 \sqrt{2} \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n) +$$

soit encore de façon plus générale :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} Y_0 : \text{ valeur de la composante continue généralement} \\ \text{ nulle.} \\ Y_n : \text{ valeur efficace de l'harmonique de rang n.} \\ \omega : \text{ la pulsation de la fréquence du fondamental.} \\ \varphi : \text{ déphasage de la composante harmonique à } t = 0 \end{array} \right.$

Exemple : décomposition d'un signal périodique :

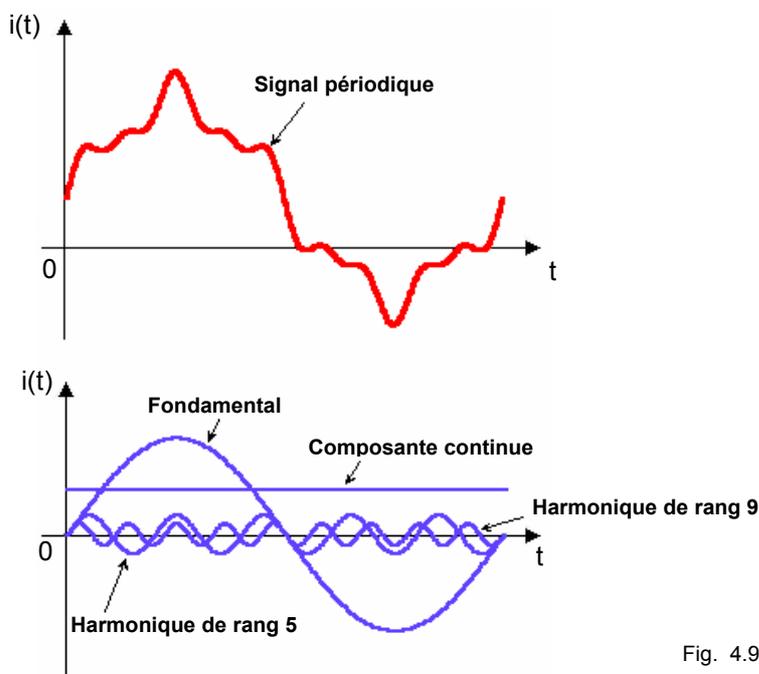


Fig. 4.9-3

4.9.3. Définition des grandeurs harmoniques

4.9.3.1. Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale

La valeur efficace qui conditionne les échauffements est obtenue par l'application de la formule générale :

$$Y_{eff.} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T y^2(t) \cdot dt}$$

On obtient ainsi la représentation harmonique :

$$Y_{eff.} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (Y_n)^2}$$

Exemple :

Considérons un signal périodique dont la décomposition harmonique donne $I_1 = 104$ A, $I_3 = 30$ A et $I_5 = 10$ A, le courant efficace de ce signal s'exprime par l'équation :

$$I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2} = \sqrt{104^2 + 30^2 + 10^2} = 109A$$

4.9.3.2. Taux individuel d'harmonique

Selon les organismes, le taux individuel d'harmonique est défini différemment. Il s'exprime en % soit :

- par le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique de rang **n** est la valeur efficace du fondamental pour la **CIGREE** :

$$H_n(\%) = 100 \cdot \frac{Y_n}{Y_1}$$

- par le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique de rang **n** est la valeur efficace du signal pour la **CEI** :

$$H_n(\%) = 100 \cdot \frac{Y_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (Y_n)^2}}$$

4.9.3.3. Taux de distorsion

Ce paramètre définit globalement la déformation de la grandeur sinusoïdale. En fonction des organismes, le taux de distorsion en % s'exprime par :

- le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du seul fondamental pour la **CIGREE**.

$$D(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (Y_n)^2}}{Y_1}$$

- le rapport de la valeur efficace des harmoniques ($n \geq 2$) à celle de la grandeur alternative, pour la **CEI**

$$THD(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (Y_n)^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (Y_n)^2}}$$

Exemple :

Si nous reprenons les données de l'exemple précédent, nous obtenons un taux de distorsion de :

- pour la **CIGREE** :

$$D(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2}}{I_1} = 100 \cdot \frac{\sqrt{30^2 + 10^2}}{104} = 100 \cdot \frac{\sqrt{1000}}{104} = 30,4\%$$

- ou selon la définition de la CEI :

$$THD(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{I_3^2 + I_5^2}}{\sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2}} = 100 \cdot \frac{\sqrt{30^2 + 10^2}}{\sqrt{104^2 + 30^2 + 10^2}} = 100 \cdot \frac{\sqrt{1000}}{\sqrt{11816}} = 29,1\%$$

Remarque :

Lorsque le taux de distorsion est faible, ce qui est le cas le plus fréquent pour la tension, les deux définitions conduisent, en pratique, au même résultat.

4.9.3.4. Spectre de fréquence

Le spectre de fréquence est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang.

Exemple :

Si nous effectuons la décomposition spectrale du signal périodique vu précédemment on obtient la figure suivante :

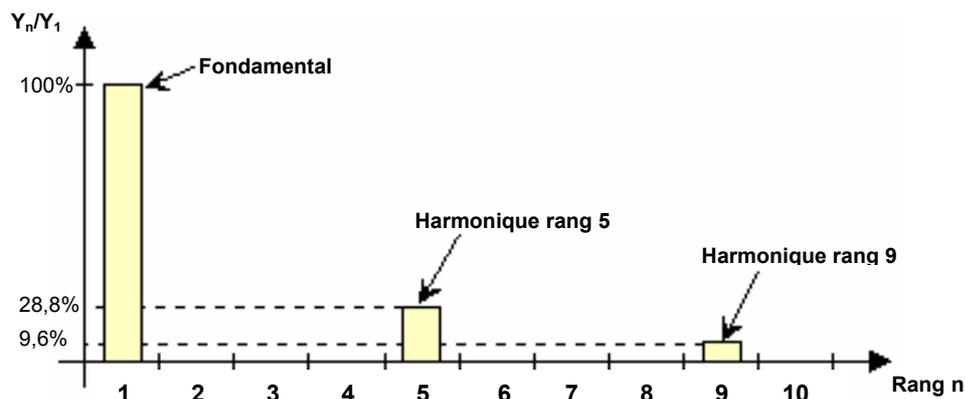


Fig. 4.9-4

4.9.3.5. Le facteur de crête

Selon la définition donnée par la CEI, le facteur de crête F_C est le rapport de la valeur de crête à la valeur efficace d'une grandeur périodique.

$$F_C = \frac{Y_{crête}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (Y_n)^2}}$$

4.9.4. Puissances en présence d'harmoniques

4.9.4.1. Définition

La puissance apparente S est égale au produit de la valeur efficace de la tension par la valeur efficace du courant soit :

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff}$$

Lorsque la tension et le courant sont déformés, il faut alors effectuer la somme quadratique des valeurs efficaces de chaque rang.

- Valeur efficace de la tension

En reprenant la définition de la valeur efficace d'une grandeur non sinusoïdale on peut écrire :

$$U_{eff} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}$$

soit encore en sortant le terme U_1^2 du radical de la racine

$$U_{eff} = U_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 + \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2}$$

Cette relation peut également s'e transformer en introduisant le fondamental du signal et les différents taux d'harmoniques en tension :

$$H_{n(u)} = \frac{U_n}{U_1}$$

on obtient la nouvelle expression de la valeur efficace de la tension

$$U_{eff} = U_1 \cdot \sqrt{1 + H_{2(u)}^2 + H_{3(u)}^2 + \dots + H_{n(u)}^2}$$

Cette dernière expression fait apparaître un taux de distorsion en tension **D_U** dans le coefficient.

$$U_{eff} = U_1 \cdot \sqrt{1 + D_U^2}$$

avec
$$D_U^2 = \sum_{n=2}^{n=\infty} H_{n(u)}^2$$

- Valeur efficace du courant

La définition de la valeur efficace conduit à l'expression suivante du courant efficace :

$$I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

De la même façon que précédemment, il apparaît un taux de distorsion en courant **D_I**.

$$I_{eff} = I_1 \cdot \sqrt{1 + D_I^2}$$

En présence d'harmoniques, la puissance apparente **S** n'est donc pas uniquement la résultante $\sqrt{P^2 + Q^2}$, mais il apparaît une puissance de distorsion ou déformante **D** telle que:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

avec
$$\left\{ \begin{array}{l} S : \text{ la puissance apparente.} \\ P : \text{ la puissance active.} \\ Q : \text{ la puissance réactive.} \\ D : \text{ la puissance déformante ou de distorsion.} \end{array} \right.$$

P et **Q** ne dépendent que **du fondamental** du courant, de la tension (supposée sinusoïdale) et de l'angle φ . L'angle φ est le déphasage entre le fondamental du courant et la tension, et **D** dépend uniquement **des courants harmoniques**

4.9.4.2. Facteur de puissance et facteur de déphasage.

Il est important en présence d'harmoniques de ne pas confondre ces deux termes qui ne sont égaux que lorsque tension et courant sont sinusoïdaux :

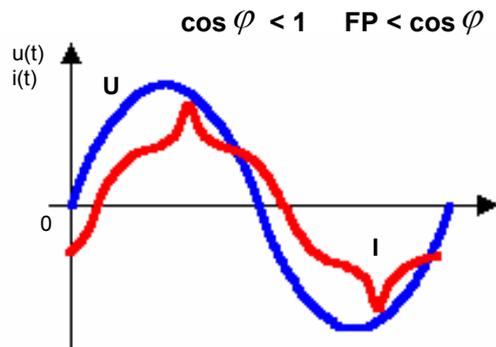
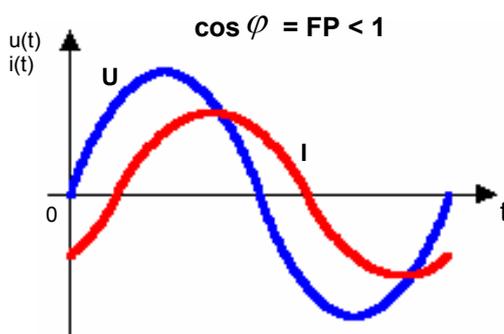
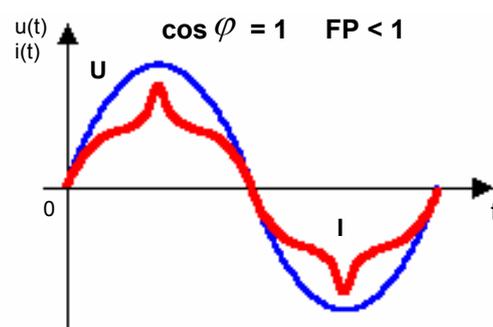
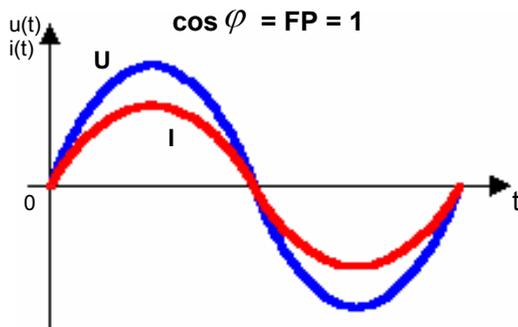
- Le facteur de déphasage ($\cos \varphi = 1$) ne concerne que les grandeurs fondamentales de la tension et du courant.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

- Le facteur de puissance noté F_P est le rapport de la puissance active P à la puissance apparente S . Il tient compte des harmoniques.

$$F_P = \frac{P}{S}$$

Les figures ci-dessous montrent quelques exemples de signaux courants et tensions mettant en évidence les différences entre le facteur de déphasage $\cos \varphi$ et le facteur de puissance F_P .



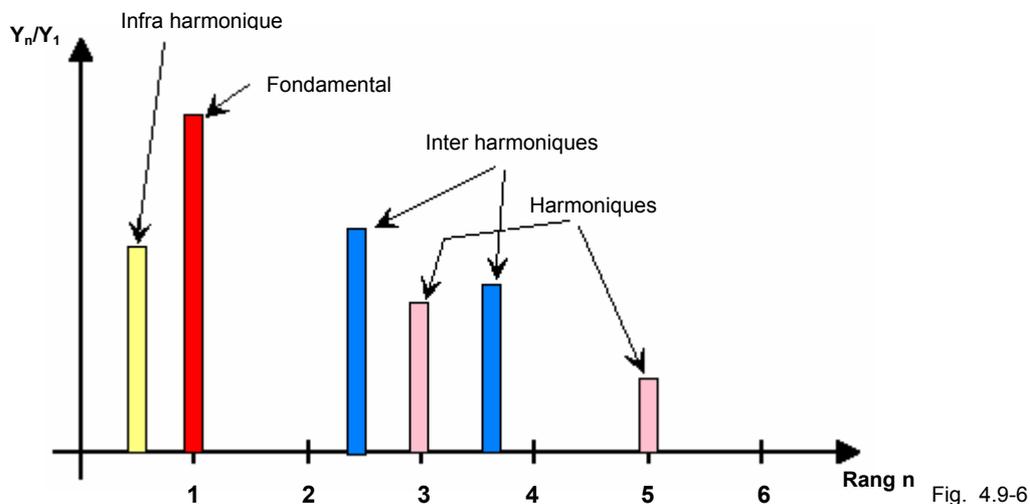
4.9.5. Les inter et infra harmoniques

4.9.5.1. Les inter harmoniques

Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental.

4.9.5.2. Les infra harmoniques

Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.



Ces deux catégories de perturbations sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certaines machines (commande par train d'ondes, ...).

4.9.6. Rôle de l'impédance de la source

4.9.6.1. Distorsion en tension

Pour une source de tension donnée, il est toujours possible de définir une impédance de sortie, même si celle-ci dépend de la fréquence. Dans la mesure où cette impédance est indépendante de la valeur du courant (linéarité), il est possible, pour chaque harmonique de courant, de calculer une tension harmonique correspondante et d'en déduire le taux individuel d'harmoniques.

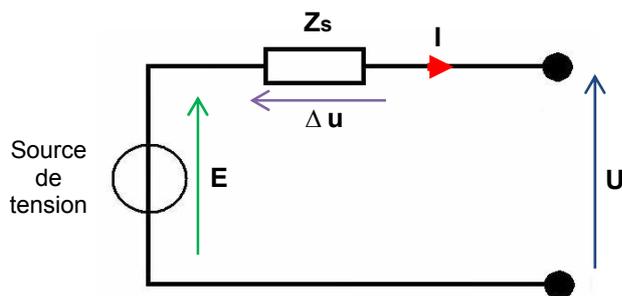


Fig. 4.9-7

La loi des mailles permet d'écrire l'égalité :

$$U = E - \Delta u$$

Or, la valeur efficace de la chute de tension Δu due à l'impédance interne de la source pour l'harmonique de rang n vaut :

$$U_n = Z_{s_n} \cdot I_n$$

avec $\left\{ \begin{array}{l} Z_{s_n} : \text{ l'impédance de sortie pour l'harmonique de rang n.} \\ I_n : \text{ le courant efficace de l'harmonique.} \end{array} \right.$

Le taux de individuel d'harmoniques pour le rang n vaut donc pour la tension :

$$H_n = \frac{U_n}{U_1}$$

Avec U_1 la valeur efficace du fondamental de la chute de tension.

Le taux global de distorsion en tension s'obtient alors par l'expression :

$$D(u) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (U_n)^2}}{U_1}$$

Ou encore exprimée en %

$$D(u)\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (U_n)^2}}{U_1}$$

Soit encore :

$$D(u)\% = 100 \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (H_n)^2}$$

On constate ainsi, que l'impédance de la source aux diverses fréquences harmoniques joue un rôle fondamental dans l'apparition de la distorsion en tension. Plus cette impédance de source sera élevée, plus le taux de distorsion en tension sera grand pour un courant sinusoïdal donné.

La déformation de la tension sinusoïdale ainsi induite de la source risque en conséquence de provoquer la perturbation et des disfonctionnements des autres récepteurs alimentés par cette même source.

4.9.7. Les effets des harmoniques sur l'appareillage

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés,
- soit des effets à terme.

4.9.7.1. Les effets instantanés

Ce sont les perturbations qui apparaissent dans le fonctionnement des appareils de protection et de commutation des équipements.

Parmi les effets instantanés des tensions harmoniques, on peut citer :

- La perturbation des systèmes électroniques
 - Déranagement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension
 - Augmentation de la marge d'erreur sur les compteurs d'énergie à induction.
 - Perturbation des récepteurs de télécommande utilisés par les distributeurs d'énergie, lorsque les tensions harmoniques sont de fréquence voisine de celle du système.

- Les bruits et vibrations
 - Efforts électrodynamiques entraînant des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, ...).
 - Couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donnant des vibrations dans les machines tournantes.
- Les perturbations induites
 - Ce sont essentiellement des effets sur les lignes à courants faibles, qui sont dus au couplage par diaphonie inductive, lorsqu'il y a présence d'harmoniques de rang élevé.
- Les différences de potentiel entre masses
 - 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".

4.9.7.2. Les effets à terme

Hormis la fatigue mécanique des matériaux due aux vibrations, l'effet à terme est essentiellement l'échauffement des matériels électriques entraînant un vieillissement prématuré de ceux-ci.

- Echauffement des condensateurs
 - Les pertes causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans le diélectrique.
Ces pertes sont en première approximation proportionnelles au carré du courant efficace. Elles sont définies par l'angle de perte δ du condensateur, angle dont la tangente est le rapport entre les pertes et l'énergie réactive.
Ces échauffements peuvent conduire au claquage du composant.
 - Dérangement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension
- Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs
 - Se sont les 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 inducteurs harmoniques et le rotor. Ces pertes sont difficilement mesurables.
 - Pour les transformateurs, se sont les pertes supplémentaires dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis et au courants de Foucault apparaissant dans la circuit magnétique.
- Echauffement des câbles et des équipements

Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorés, d'où une élévation de température. Parmi les causes des pertes supplémentaires on peut citer :

 - Une augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée ;
 - 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 ;
- Des phénomènes de proximité, de gaines, d'écrans mis à la terre aux deux extrémités, etc.

4.9.7.3. Tableau récapitulatif des effets des harmoniques sur l'appareillage

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors,..etc).	Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissants à un vieillissement prématuré des condensateurs (claquage)
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'IMAGE
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2

4.9.8. Quelques remèdes contre la pollution harmonique

Nous venons de voir que les perturbations harmoniques générées ou subies par les équipements électriques peuvent avoir des conséquences néfastes au bon fonctionnement des installations. Aussi, il existe de nombreuses méthodes pour atténuer les harmoniques au sein même du système d'entraînement ou en externe. Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients, et impliquent toutes un surcoût plus ou moins élevé en fonction de leur complexité. La meilleure solution sera fonction de la charge totale, de l'alimentation du site et du niveau de distorsion autorisé.

Dans ce chapitre nous évoquerons les solutions possibles, leur présentation détaillée sera effectuée en annexe de cet ouvrage.

- Rechercher une puissance de court circuit le plus élevée possible (impédance de source faible).
- Insensibilisation par la structure de la distribution électrique
 - Connecter les charges polluantes le plus en amont possible du réseau.
 - Alimenter les charges polluantes par une source séparée
- Placer des inductances de lissage en amont de ces charges.

- Utiliser des filtres passifs accordés sur la fréquence du ou des harmoniques à atténuer.

Ces filtres (R, L, C) sont de types :

- shunt résonnant,
- filtre amorti.
- Utiliser des filtres actifs
- Utiliser un compensateur actif.
- Effectuer un prélèvement sinusoïdal des harmoniques à éliminer.
- Confiner les harmoniques (suppression en amont des transformateurs grâce à un couplage particulier).

4.9.9. Normalisation et réglementation

4.9.9.1. Définition des niveaux de perturbations

Les différents niveaux et différentes marges qui ont été définis sont :

- **niveau de susceptibilité.** Il s'agit du niveau à partir duquel il y a dysfonctionnement d'un matériel ou d'un système.
- **niveau d'immunité.** C'est le niveau d'une perturbation supportée par un matériel ou un système.
- **niveau de compatibilité.** C'est le niveau maximal de perturbation auquel on peut s'attendre dans un environnement donné.
- **niveau d'émission.** C'est le niveau maximal d'émission de perturbation que ne doit pas dépasser un matériel.
- **marge d'immunité.** C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'immunité.
- **marge d'émission.** C'est la marge qui existe entre le niveau de compatibilité et le niveau de limite d'émission.

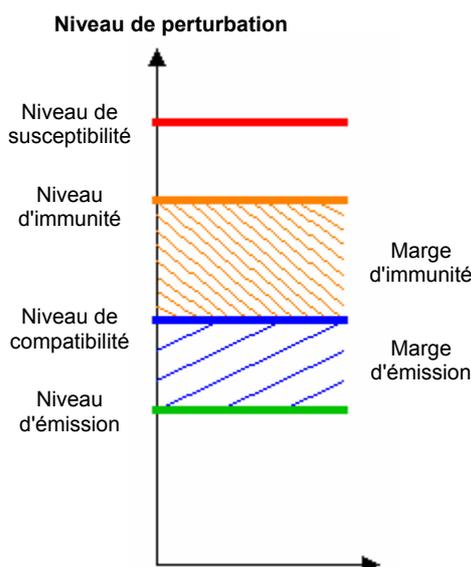


Fig. 4.9-8

4.9.9.2. Normalisation

Pour assurer la coexistence entre équipements et entre consommateurs, des normes et règlements ont été élaborés entre :

- les abonnés qui génèrent la distorsion en courant
- la distribution (EDF) qui développe et transmet la distorsion en tension.

Ces normes concernent à la fois les niveaux de compatibilité et les niveaux d'émission.

❖ Niveaux de compatibilité

Réseau ou installation	Norme
Réseau public basse tension	CEI 1000-2-2
Réseau public haute tension	Projet de norme CEI en cours
Installations industrielles	CEI 1000-2-4

Les niveaux de compatibilité préconisés par les normes ci dessus sont :

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 (%)	8	3	5	8	10

❖ Niveaux d'émission

La solution équitable consiste à autoriser des puissances perturbatrices proportionnelles à la puissance souscrite par chaque usager. Toutefois cette solution est difficile à mettre en oeuvre en B.T., en particulier pour les applications domestiques. C'est pour cette raison que des normes limitant l'émission de courant harmonique par produit ont été établies.

Actuellement (10/98), les normes d'émission qui existent, concernent uniquement l'appareillage B.T. à usage autre qu'industriel :

- **CEI 1000-3-2.** Cette norme s'applique à tous les matériels, autres qu'industriels, consommant moins de 16 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 à 40	$0,23 \cdot \frac{8}{n} A$
11	0,33 A		
13	0,21 A		
15 à 39	$0,15 \cdot \frac{15}{n} A$		

- Pour les matériels, autres qu'industriels, consommant plus de 16 A, la norme **CEI 1000-3-4** est en cours d'élaboration.

4.9.9.3. Qualité de l'électricité

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%
- 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