

Les harmoniques circulant dans le réseau électrique détériorent la qualité de la fourniture d'énergie. Les effets principaux sont ceux cités en page 6. En marge de ces effets, il ne faut pas oublier les impacts économiques qui ne sont pas négligeables :

- **Pertes énergétiques** : pertes Joules supplémentaires
- **Surcoût de l'abonnement** : la puissance déformante créée par les harmoniques accroît la puissance apparente globale de l'installation et nécessite d'augmenter le niveau de puissance souscrite
- **Surdimensionnement des équipements** : déclassement des sources, surdimensionnement des câbles pour permettre la circulation des harmoniques
- **Réduction de la durée de vie des équipements** : un THD-U voisin de 10% provoque une réduction sensible de la durée de vie
- **Déclenchement intempestifs et arrêt de l'installation**

Les émissions harmoniques sont soumises à différentes normes et réglementation (normes de compatibilité adaptée aux réseaux, d'émission applicables aux équipements générateurs d'harmonique, recommandations des distributeurs d'énergie).

Par exemple pour la qualité de l'énergie fournie par les réseaux publics moyenne et basse tension, nous pouvons citer la norme EN 50160 qui donne, dans les conditions normales d'exploitation les valeurs des rangs d'harmonique au point de fourniture à ne pas dépasser. Le taux global THD-U ne doit pas dépasser 8%.

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
Rang h	Tension relative	Rang h	Tension relative	Rang h	Tension relative
5	6,0 %	3	5,0 % ⁽¹⁾	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Valeurs des tensions d'harmoniques au point de fourniture, jusqu'au rang d'harmonique 25, exprimées en pourcentage de la tension nominale (Uc)

(1) Suivant la conception du réseau, la valeur de l'harmonique de rang trois peut être beaucoup plus basse.

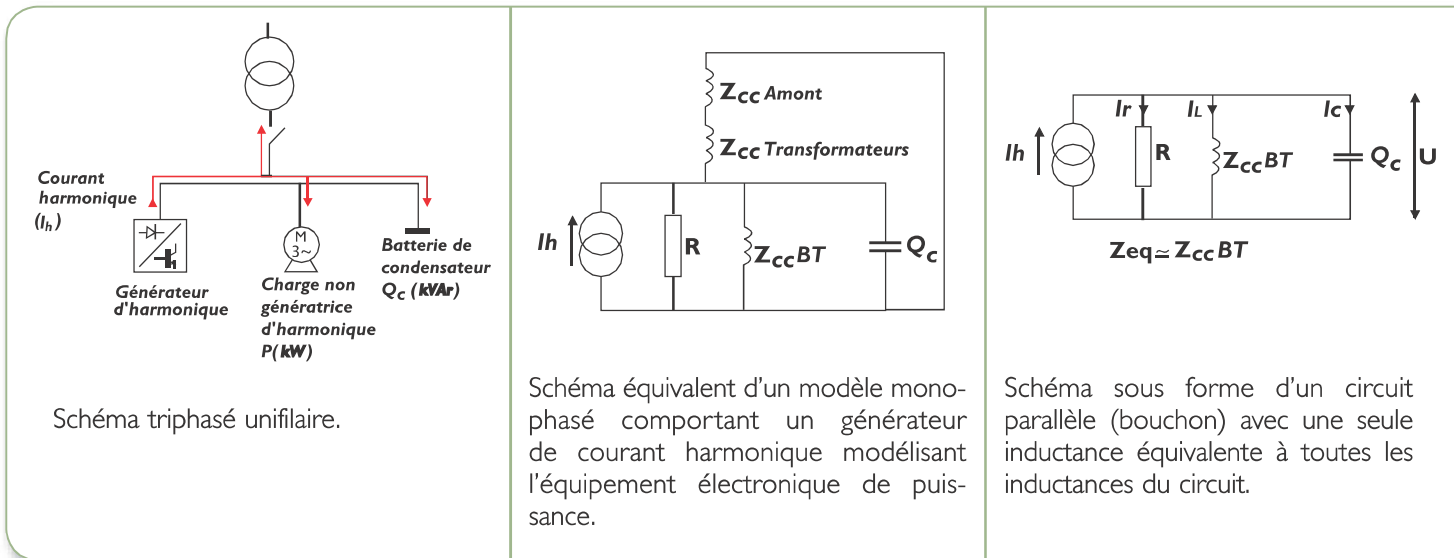
NOTE : Les valeurs correspondant aux harmoniques de rang supérieur à 25 étant généralement faibles mais très imprévisibles en raison des effets de résonance, elles ne sont pas indiquées dans ce tableau.

Compensation et atténuation des harmoniques

EFFETS DE RÉSONANCE

L'installation de batteries de condensateurs dans une installation électrique peut conduire à l'amplification des harmoniques existants. On entend par amplification, l'augmentation des taux de distorsion harmonique en tension comme en courant. Cette amplification est due à une résonance électrique entre la capacité de la batterie et les inductances de lignes et de source.

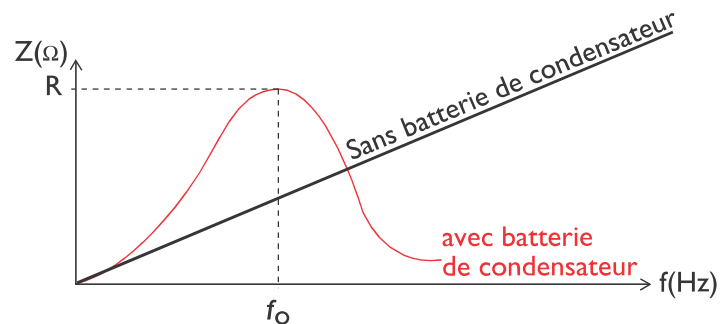
Pour comprendre ce phénomène, nous allons étudier une installation type. Le schéma unifilaire ci-dessous, modélisé par un circuit électrique équivalent, permet d'étudier l'effet de l'amplification sur 3 types de récepteurs : générateurs d'harmoniques, récepteurs non générateurs de perturbation sur le réseau électrique et batteries de condensateurs.



Nous pouvons déterminer l'impédance équivalente de ce réseau, vu du TGBT par :

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{L\omega} - C\omega\right)^2}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



L'amplification s'observe au travers de la courbe représentative des impédances du système en fonction de la fréquence. On y voit la valeur amplifiée comparée à la valeur initiale du réseau sans condensateurs.

A la résonance f_0 toute l'intensité I_0 de rang n générée par le circuit perturbateur, passe dans la résistance R , signifiant ainsi que la quasi totalité de cette intensité est absorbée par les charges consommant de la puissance active.

La conséquence directe de cette résonance est l'augmentation des tensions harmoniques, donc du THD-U.

INFLUENCE DES HARMONIQUES SUR LES ARMOIRES DE REPHASAGE

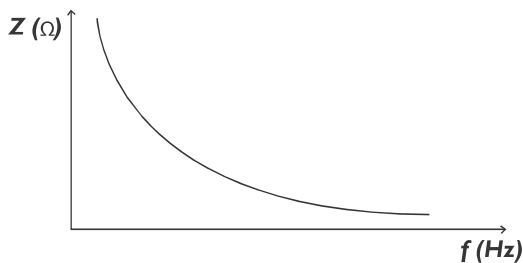
Influence des harmoniques sur les armoires de rephasage

La superposition des harmoniques au signal fondamental provoque :

- un **vieillissement prématuré** voire la destruction des condensateurs
- un phénomène de **résonance parallèle ou série**
- des **échauffements** de machines (moteurs, transformateurs)
- un **déclenchement intempestif** des éléments de protection
- une **perturbation** des appareillages électriques (organe de régulation, informatique)
- une **diminution du facteur de puissance (FP)**

Principaux phénomènes rencontrés et les solutions ENERDIS associées

Effets à terme sur les condensateurs



$$Z_c = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{C 2\pi f}$$

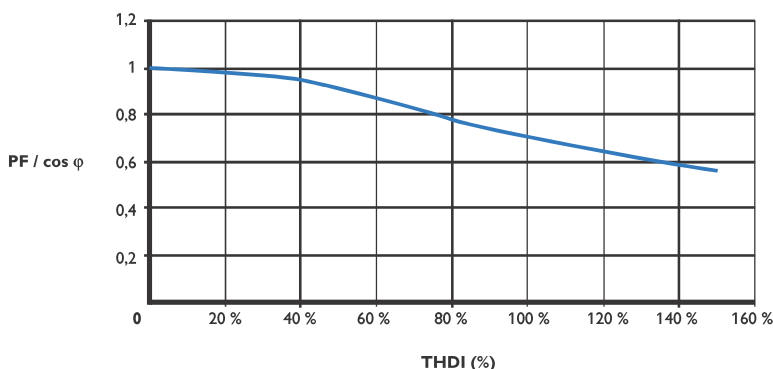
Cette courbe montre que **l'impédance d'un condensateur décroît avec la fréquence**. Ceci entraîne **une augmentation de l'intensité absorbée** par les condensateurs et donc provoque des **échauffements** qui accélèrent **le vieillissement des condensateurs** et peuvent, dans certains cas, conduire à sa **destruction**.

ENERDIS propose des condensateurs qui peuvent supporter :

- une surtension de 1,1 U_n (durée max pour 8h toutes les 24h) à 50 Hz
 $U_n = 400 \text{ V}$ (condensateurs standard)
 $U_n = 440 \text{ V}$ ou 500 V (condensateurs renforcés)
- une surintensité permanente à 50 Hz de 1,3 I_n

Ces condensateurs répondent aux normes **CEI 831 et NFC C54-104** (domaine BT).

Influence du THD-I sur le rapport FP/cos φ



Variation de $\frac{FP}{\cos \varphi}$ selon **THD-I**

avec **THD-U = 0 %**

$$FP \approx \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \text{THD-I}^2}}$$

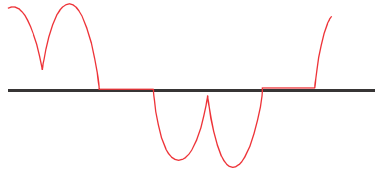
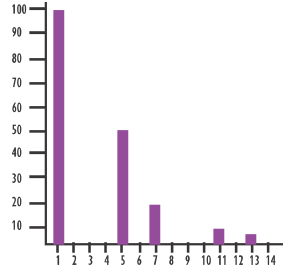
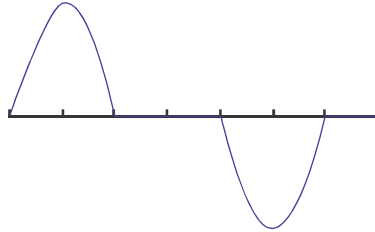
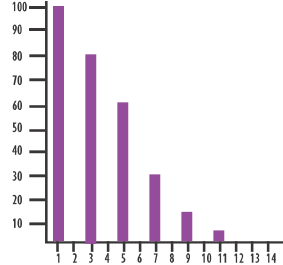
Les réseaux électriques étant en 50 Hz, nous prendrons cette fréquence comme fondamentale (f_1).

Rang d'harmonique (n)

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence (f_n) est un multiple de la fréquence fondamentale ($f_1 = 50$ Hz).

$$f_n = n \times f_1$$

Ces harmoniques provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Le tableau suivant recense les harmoniques les plus courantes dans les réseaux électriques où les charges sont non-linéaires.

Type de charge	Forme d'onde du courant	Spectre harmonique en courant pour une charge non linéaire
Convertisseur triphasé : <ul style="list-style-type: none"> ▶ variateurs de vitesse ▶ Alimentation Sans Interruption (ASI) ▶ redresseurs 		
Convertisseur monophasé : <ul style="list-style-type: none"> ▶ variateurs de vitesse ▶ lampes à décharge (le signal est différent mais spectre riche) ▶ onduleurs 		

Les principaux **générateurs d'harmoniques de rang 3** sont les **redresseurs monophasés** à diodes avec filtrage capacitif.

Les **charges triphasées**, équilibrées, symétriques, non linéaires, **sans raccordement au neutre ne génèrent pas d'harmoniques de rang 3**, ni d'harmoniques de rangs multiples de 3.

Les **charges triphasées**, équilibrées, symétriques, non linéaires, **avec raccordement au neutre génèrent** dans ce conducteur, **des courants harmoniques de rang 3 et des courants harmoniques de rangs multiples de 3**.

La valeur efficace du courant de neutre peut être supérieure à celle du courant de phase.

Pour y remédier, il faut choisir une section de conducteur de neutre égale à 2 fois la section d'un conducteur de phase. D'autres solutions sont possibles comme l'utilisation de réactances à couplage zig-zag ou des filtres accordés sur le rang 3.

Taux de distorsion harmonique

Le signal sinusoïdal étant déformé, il est nécessaire de quantifier cette déformation en faisant appel aux formules ci-dessous :

<p>THD Individuel</p> <p>A_1 = Valeur efficace du fondamental A_n = Valeur efficace du rang harmonique n Les valeurs efficaces A_x peuvent être des tensions ou des courants</p> $T_n(\%) = \frac{A_n}{A_1} \times 100$	<p>THD Global</p> $THD-U(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n U_n^2}}{U_1} \times 100$ $THD-I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_1} \times 100$
---	--

Exemple	I	U	Fondamental	rang 5	rang 7	rang 11	rang 13	THD (%)
			327 A	224 A	159 A	33,17 A	9A	84,66 %
			440V	20V	17V	6V	2V	6,75 %

QU'EST-CE QUE LES HARMONIQUES ?

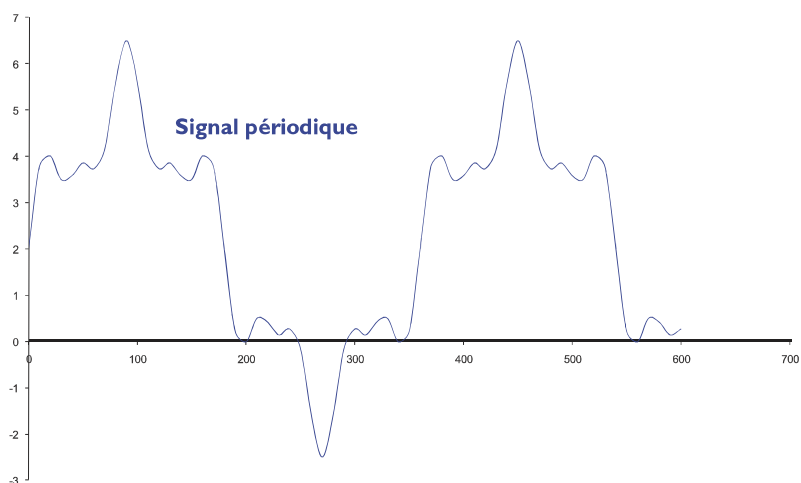
Les charges non linéaires (redresseurs, variateurs de vitesse, fours à arc, inverseurs, onduleurs, etc.) injectent sur le réseau des courants de forme non sinusoïdale. Ces courants sont formés par une composante fondamentale de fréquence 50 Hz, plus une série de courants superposés, de fréquences multiples de la fondamentale que l'on appelle harmoniques (et éventuellement une composante continue). Cette décomposition est connue sous le nom de Série de Fourier.

Le résultat est une déformation de la forme d'onde tension et courant qui conduit à une série d'effets secondaires associés.

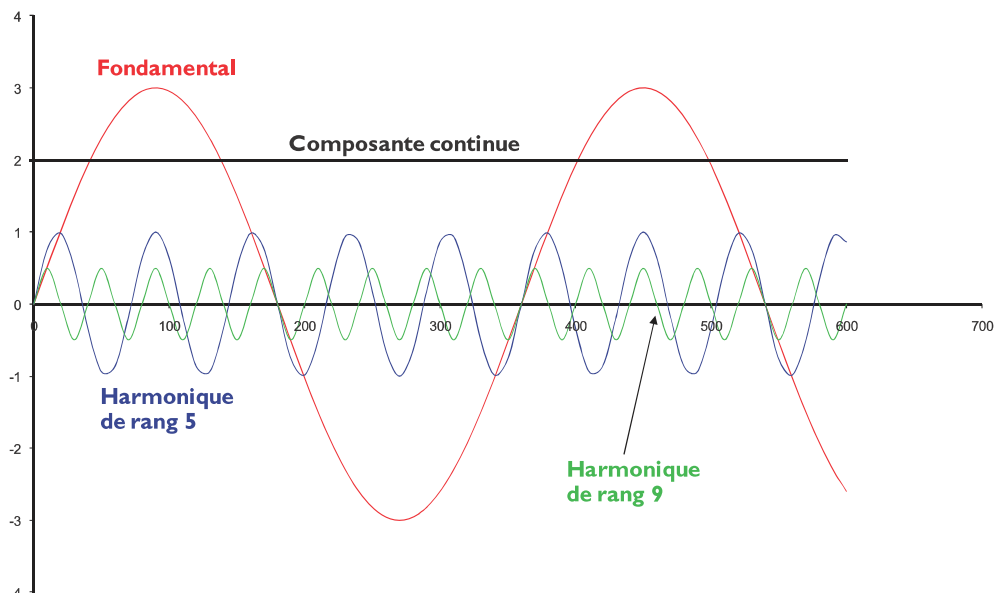
Pour la mesure des harmoniques, il est essentiel de connaître une série de paramètres pour lesquels nous donnons quelques définitions.

$$\beta_{\text{eff}} = \beta_0 + \sqrt{\beta_1^2 + \sum_{h=2}^n \beta_h^2}$$

Σ : Somme de tous les signaux harmoniques de rang 2 (50 Hz x 2) au dernier rang (50 Hz x n)



Décomposition en Série de Fourier



Compensation d'énergie réactive



LE GUIDE