

# COURANTS RÉSEAUX

## - CHARGE ÉLECTRONIQUE -

<b>1 -Origine des harmoniques de courant.....</b>	<b>3</b>
<b>2 -Analyse des harmoniques de courant.....</b>	<b>4</b>
Lissage inductif -monophasé.....	4
Lissage inductif triphasé sans neutre.....	5
Lissage capacitif.....	6
Courant réseau - monophasé ou triphasé avec neutre.....	6
Courant dans le neutre - triphasé avec neutre.....	7
Lissage capacitif triphasé sans neutre.....	8
<b>3 -Pollution du réseau.....</b>	<b>9</b>
<b>4 -Solutions de compensation.....</b>	<b>10</b>
4.1 -Bilan des harmoniques générés.....	10
4.2 -Utilisation des couplages de transformateur.....	11
4.3 -Utilisation d'une inductance de lissage.....	11
4.3.1 -Inductance AC.....	11
4.3.2 -Inductance DC.....	12
4.3.3 -Inductance AC ou DC ?.....	12
4.4 -Piège à harmonique.....	12
4.4.1 -Comportement du piège pour les BF.....	13
4.4.2 -Comportement du piège pour les HF.....	14
4.4.3 -Dimensionnement du piège.....	14
4.5 -Filtre actif.....	15
<b>5 -Alimentations et variateurs <math>F_p=1</math>.....</b>	<b>16</b>
5.1 -Alimentations continues à absorption sinusoïdale.....	16
5.2 -Variateurs 4Q.....	17

## 1 - ORIGINE DES HARMONIQUES DE COURANT.

Une charge électronique (appareil électronique ou variateur de vitesse) doit être alimentée en continu. Son alimentation comporte donc un pont redresseur à diodes branché sur le réseau.

Dans la plupart des cas, il y a après le redresseur un condensateur de lissage pour lisser la tension.

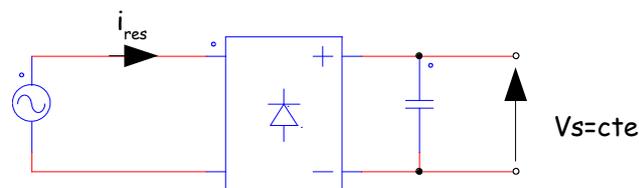


figure 1: Redresseur avec lissage capacitif

Parfois il y a une inductance de lissage (alimentation d'excitation de machine en courant continu) pour lisser le courant.

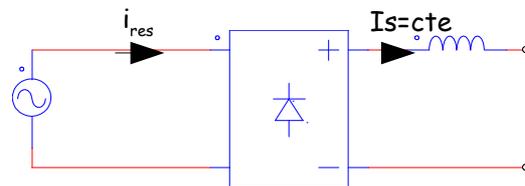


figure 2: Redresseur avec lissage inductif

C'est la présence de l'élément de lissage (condensateur ou inductance) et du pont de diodes qui explique que le courant réseau n'est pas sinusoïdal.

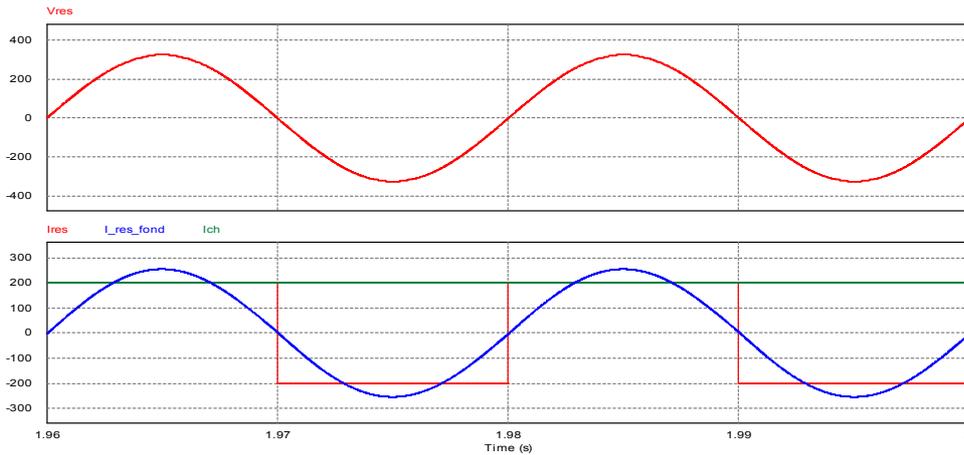
Le courant réseau est alternatif dans tous les cas (donc absence d'harmonique de rang pair).

## 2 - ANALYSE DES HARMONIQUES DE COURANT.

Les courants réseaux sont alternatifs, ils ne comportent que des harmoniques de rang impair.

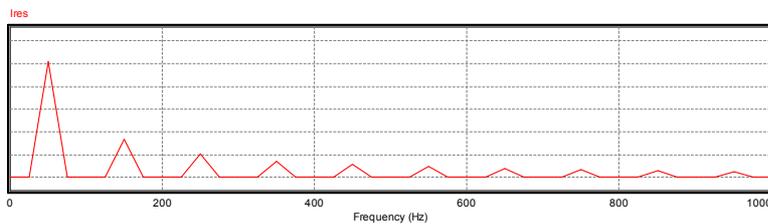
### LISSAGE INDUCTIF - MONOPHASÉ.

Tension réseau, courant réseau et son fondamental, courant en sortie du pont



Le courant réseau est de forme carrée.

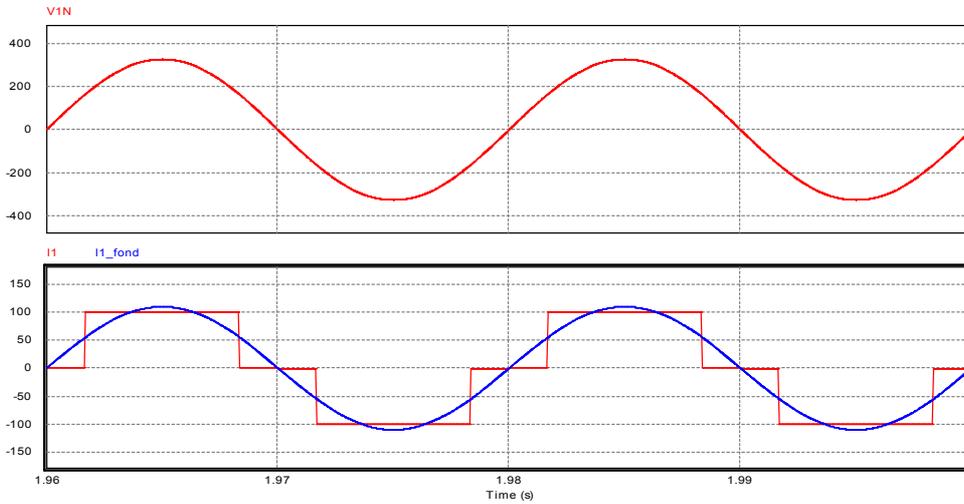
Son fondamental est en phase avec la tension



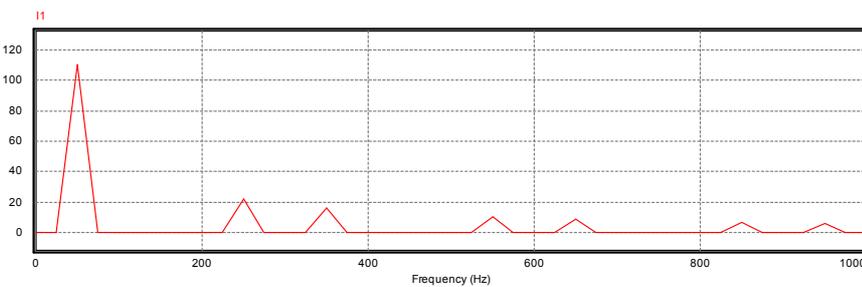
THD	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 Hz
Vres	9.4114724e-004
Ires	4.8342546e-001

### LISSAGE INDUCTIF TRIPHASÉ SANS NEUTRE.

Tension simple, courant ligne et son fondamental



Le courant réseau est de forme créneau 30°. Son fondamental est en phase avec la tension



THD	
Fundamental Frequency	5.000000e+001 Hz
V1N	9.4114715e-004
I1	3.1084130e-001

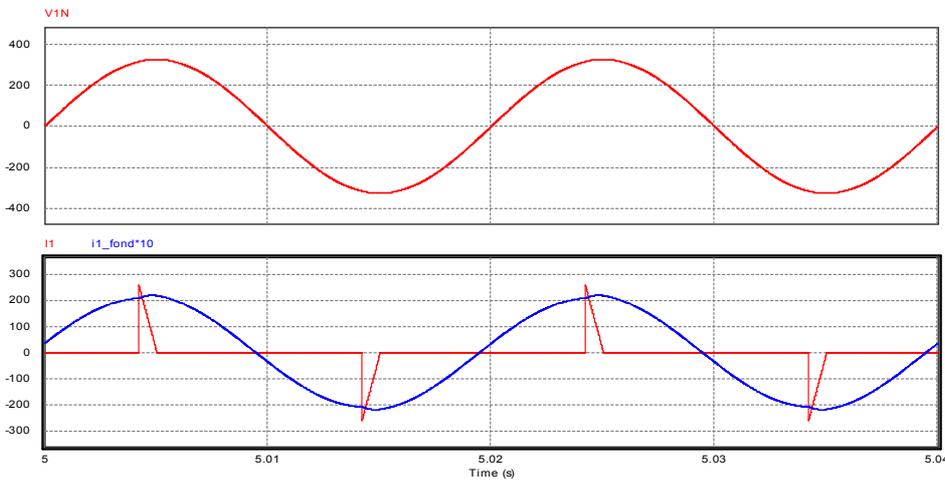
Il n'y a pas de neutre, donc pas de composante homopolaire pour le courant. Il n'y a pas d'harmonique de courant de rangs multiples de 3.



## LISSAGE CAPACITIF.

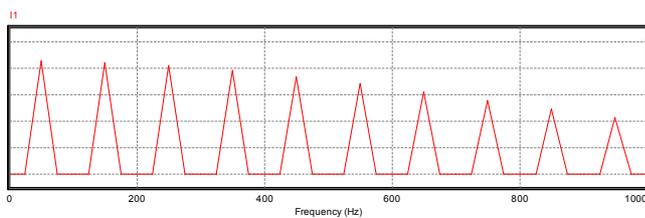
### COURANT RÉSEAU – MONOPHASÉ OU TRIPHASÉ AVEC NEUTRE.

Tension réseau, courant réseau et son fondamental\*10



Le courant réseau est impulsionnel, avec une impulsion par demi-période.

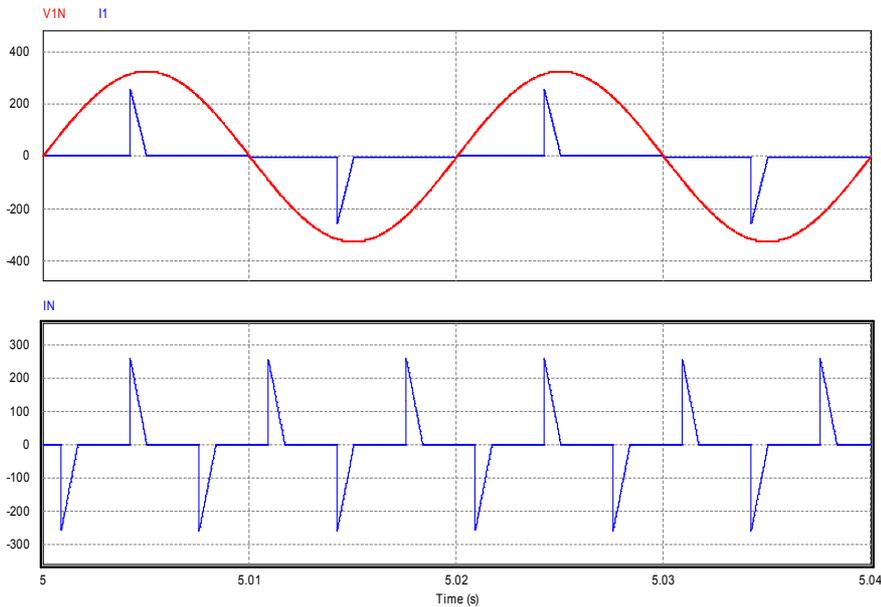
Son fondamental est en légèrement en avance sur la tension



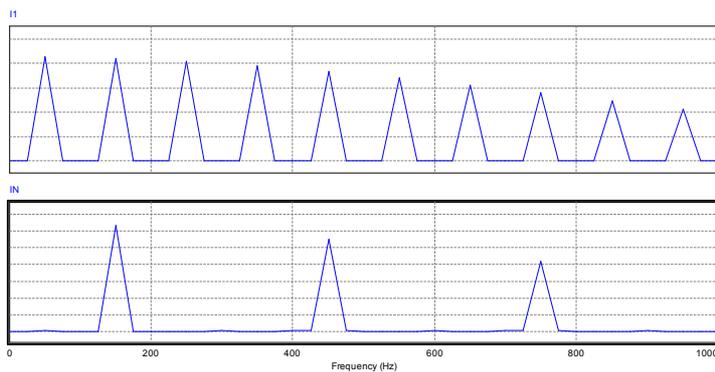
THD	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 Hz
V1N	9.4114647e-004
I1	2.6713701e+000

COURANT DANS LE NEUTRE – TRIPHASÉ AVEC NEUTRE.

Tension réseau, courant réseau et courant dans le neutre



En triphasé avec neutre, l'harmonique de rang 3 étant homopolaire, les harmoniques de courant de rangs multiples de 3 s'ajoutent dans le neutre.

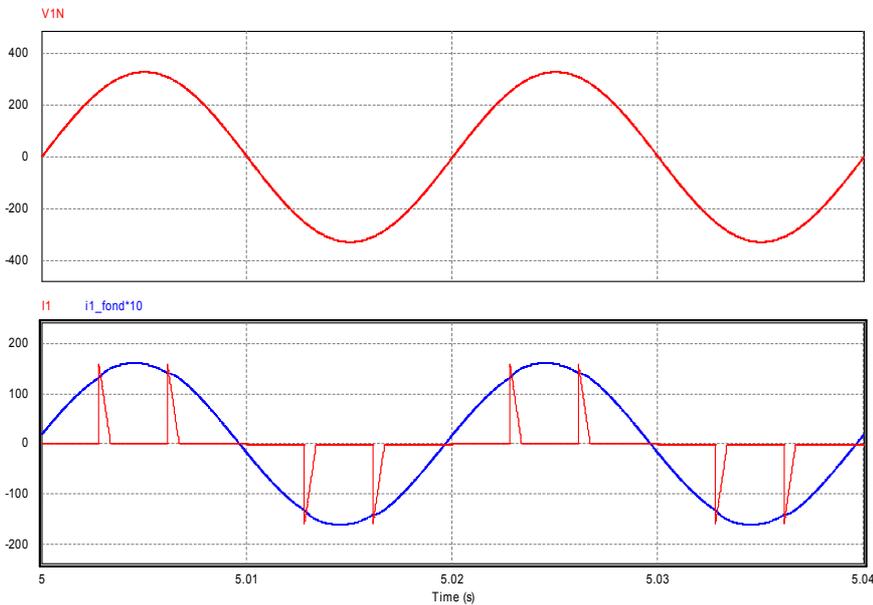


La fréquence du courant dans le neutre est de 150Hz ( $3 \cdot 50\text{Hz}$ ).

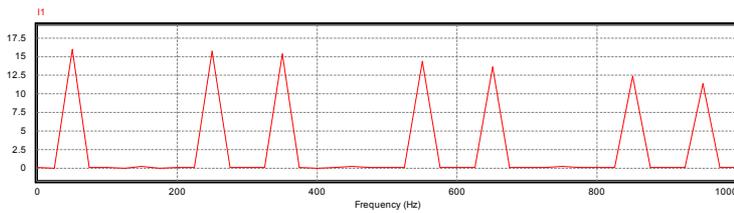
On voit sur les simulations que son amplitude peut être équivalente à celle du courant de ligne : « le neutre est chargé » .

### LISSAGE CAPACITIF TRIPHASÉ SANS NEUTRE.

Tension simple, courant ligne et son fondamental\*10



Le courant de ligne est toujours impulsif mais avec 2 impulsions par demi période. Son fondamental est légèrement en avance sur la tension.



THD	
Fundamental Frequency	5.0000000e+001 Hz
V1N	9.4114700e-004
I1	2.5832405e+000

Il n'y a plus de neutre, donc plus de composante homopolaire pour le courant, donc plus d'harmonique de courant de rangs multiples de 3.

### 3 - POLLUTION DU RÉSEAU.

Les harmoniques de courant que demande un pont redresseur, en circulant dans les inductances de ligne du réseau, créent des harmoniques de tension et donc déforment la tension au point de livraison.

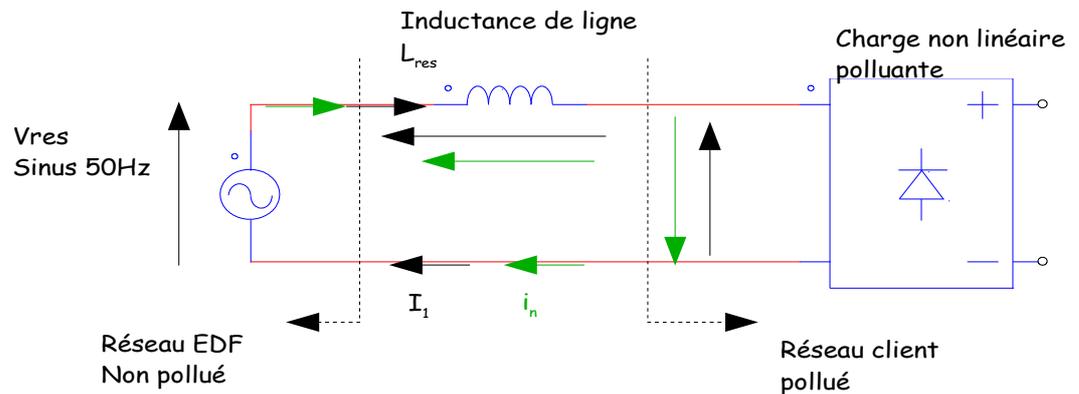


figure 3: Apparition d'harmonique de tension

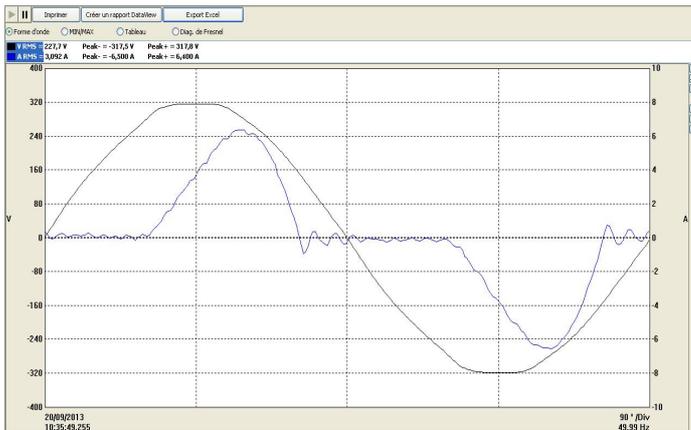


figure 4: tension et courant coté réseau EDF

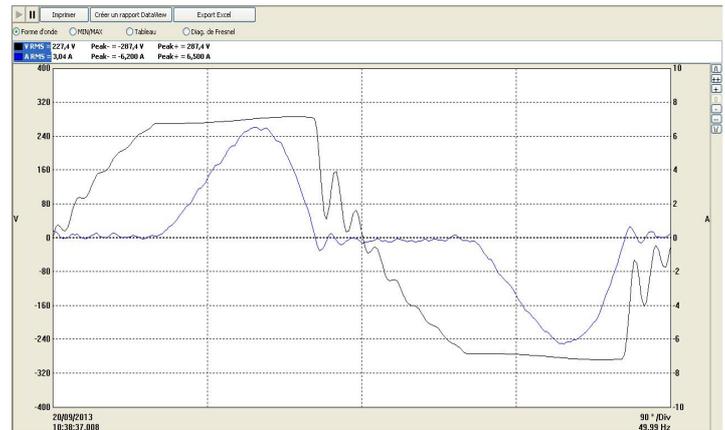


figure 5: tension et courant coté charge non linéaire

Si la tension est déformée, il apparaît des harmoniques de puissance. Ces harmoniques ne servent à rien pour le fonctionnement des appareils, elles sont source de chaleur (pertes) ou de vibrations mécaniques.

La durée de vie des appareils soumis à cette tension déformée va être réduite.

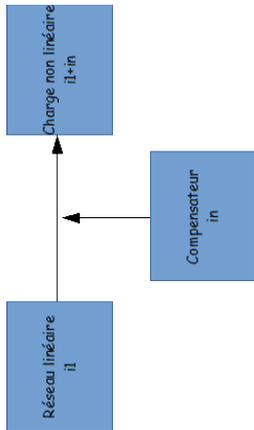
À part pour les appareils « grand public » consommant moins de 16A par phase, il n'y a pas encore de norme quant aux harmoniques de courant (CEI 61000-3-X).

Mais sur une installation électrique, la qualité de la tension doit être suffisante pour respecter la norme CEI 61000-2-X.

Un client doit donc s'assurer que ses variateurs ne polluent pas trop sa tension.

Dans le cas contraire, il a tout intérêt à compenser les harmoniques de courant, déjà pour maintenir la durée de vie de ses appareils.

## 4 - SOLUTIONS DE COMPENSATION.



La compensation d'harmonique fonctionne sur le même principe que la compensation de réactif :

la charge a besoin d'un certain type de courant (déphasé - riche en harmonique) mais le réseau ne veut fournir qu'un courant sinusoïdal 50Hz en phase avec la tension.

Il faut donc placer en parallèle au réseau une installation capable de fournir à la charge les courant que ne veut pas fournir le réseau.

Toutes les informations présentées ci-dessous sont issues :

- du « cahier technique Schneider n°152 »,
- du document « réduction des harmoniques - les solutions Danfloss VLT Drives ».

### 4.1 - BILAN DES HARMONIQUES GÉNÉRÉS.

Un pont monophasé PD2 génère des harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 3 - 5 ; 7-9 etc.. (harmoniques de rang impair car courant alternatif)

Un pont triphasé PD3 génère des harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 5 - 7 ; 11-13 etc.. (absence de rangs multiples de 3 car absence du conducteur de neutre).

Comparatif ponts à lissage capacitif et inductif (points positifs en vert) :

	Lissage capacitif $V_s = cte$	Lissage inductif $I_s = cte$
Tension de sortie	<b><math>V_{S-DC} = V_{in-max}</math></b> PD2 : $U_{S-DC} = V_{res} \sqrt{2}$ PD3 : $U_{S-DC} = U_{res} \sqrt{2}$	$< V_{in-max}$ PD2 : $U_{S-DC} = 0.9 V_{res}$ PD3 : $U_{S-DC} = 2.34 V_{res}$
Courant réseau	Impulsionnel PD2 : 1 impulsion / demi période PD3 : 2 impulsions TDH >100%	Créneau PD2 : carré PD3 : créneau 30° <b>TDH &lt;50%</b>
Fp	~0.5	<b>PD2 : 0,9</b> <b>PD3 : 0,95 &gt;0.93</b>
Fabrication	<b>Simple - valeurs normalisées</b> <b>supporte un peu de retour de</b>	Inductance à fabriquer, lourde et volumineuse

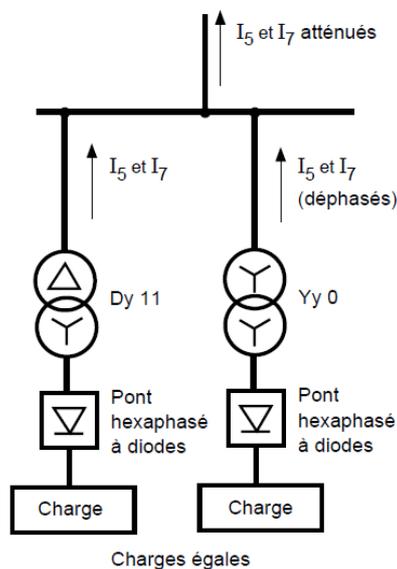
courant grâce au condensateur	pas de retour de courant
-------------------------------	--------------------------

Le lissage inductif est donc plus performant coté réseau, mais le volume et le poids fait que l'on préfère utiliser des redresseurs à lissage capacitif.

#### 4.2 - UTILISATION DES COUPLAGES DE TRANSFORMATEUR.

Comme on peut le voir dans le TD « influence d'un Dy », le couplage triangle permet de piéger les composantes homopolaires (donc les harmoniques de rang 3, 9, 15 ..).

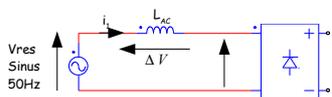
La mise en parallèle de ponts redresseurs de puissance équivalente alimentés un par un Yy, l'autre par un Dy, permet aussi de limiter les harmoniques de rang 5 et 7.



#### 4.3 - UTILISATION D'UNE INDUCTANCE DE LISSAGE.

Cette inductance de lissage peut être placée soit coté réseau (AC) soit en sortie du pont (DC).

##### 4.3.1 - INDUCTANCE AC.



Une inductance placée coté réseau va limiter les variations du courant (« lisser le courant ») donc diminuer les harmoniques HF.

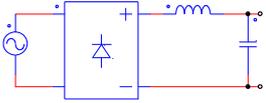
Mais l'effet de cette inductance s'ajoute à celles de la ligne : la déformation de la tension va augmenter, les performances de la charge vont diminuer.

Une inductance AC se choisit en fonction de la chute de la tension qu'elle va introduire pour le fondamental.

Cette chute de tension doit être supportable par le variateur et le moteur (norme 61000-2-X). En général elle est de l'ordre de 3 à 5%.

L'inductance est donc choisie avec la relation :  $\Delta V = L_{AC} \omega I_f$ .

#### 4.3.2 - INDUCTANCE DC.



En sortie du pont redresseur, on trouve donc un filtre L+C//R.

Ce filtre est un passe bas d'ordre 2 :

- de fréquence propre  $LC \omega_0^2 = 1$
- d'amortissement  $m = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$  ,
- fréquence de résonance :  $f_R = f_0 \times \sqrt{1 - 2m^2}$  si  $m < 1/\sqrt{2}$  .

Ce filtre ne doit laisser passer que la composante continue ( $0 \leq f_0 \leq f_{pont}$ ), mais il faut s'assurer que la fréquence de résonance n'est pas sur un des rangs d'harmonique de la tension redressée ( $f_R \neq k \times f_{pont}$ ).

#### 4.3.3 - INDUCTANCE AC OU DC ?

L'inductance coté AC limite les harmoniques de courant, mais dégrade la qualité de la tension et donc les performances du système.

L'inductance coté AC n'est placée par l'utilisateur que si l'on constate une déformation de la tension.

L'inductance coté DC est incluse dans un variateur et transforme le pont à lissage capacitif en pont à lissage légèrement inductif, elle améliore légèrement les performances coté réseau sans le perturber.

C'est parce qu'ils incluent une inductance de ce type que les variateurs type ATV 312 Schneider ou Unidrive Leroy Somer annoncent de « meilleures performances sur les harmoniques de courant » (par rapport à des variateurs sans inductance DC).

#### 4.4 - PIÈGE À HARMONIQUE.

On utilise un piège à harmonique si l'inductance de lissage AC ne suffit pas.

Il y a 1 piège pour 1 rang d'harmonique. Le piège est placé en parallèle avec le variateur.

Le piège à harmonique est constitué d'une inductance en série avec un condensateur. Les valeurs de  $L_0$  et  $C_0$  sont choisies pour annuler l'impédance du piège pour un rang  $n_0$  d'harmonique de courant.

Ainsi l'harmonique de courant de rang  $n_0$  sera piégée : elle passera dans le piège plutôt que de circuler sur le réseau.

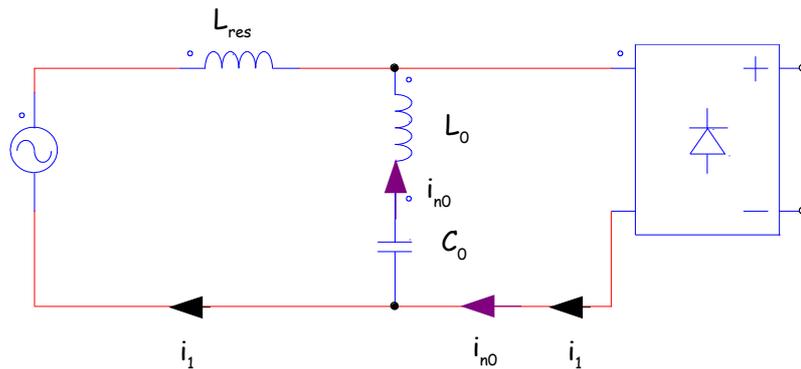


figure 6: Circulation des harmoniques de courant avec un piège de rang  $n_0$

L'impédance équivalente du filtre est  $Z_{LC} = Z_L + Z_C$

$$Z_{LC} = jL_0\omega + \frac{1}{jC_0\omega} = \frac{1 - L_0C_0\omega^2}{jC_0\omega}$$

Pour piéger l'harmonique de rang  $n_0$  il faut que  $L_0C_0\omega_0^2 = 1$

en notant  $\omega_1$  la pulsation du réseau ( $\omega_1 = 2\pi \times 50\text{Hz}$ ):  $L_0C_0n_0^2\omega_1^2 = 1$

En notant  $Z_{res} = jL_{res}\omega$  l'impédance du réseau, et en appliquant la relation du diviseur de courant, on montre que les harmoniques des courants variateurs  $i_{tot}$ , piège  $i_{LC}$  et réseau  $i_{res}$  vérifient les relations :

$$\begin{aligned} I_{LC} &= I_{tot} \times \frac{Y_{LC}}{Y_{LC} + Y_{res}} = I_{tot} \times \frac{Z_{res}}{Z_{LC} + Z_{res}} \\ I_{res} &= I_{tot} \times \frac{Y_{res}}{Y_{LC} + Y_{res}} = I_{tot} \times \frac{Z_{LC}}{Z_{LC} + Z_{res}} \\ \frac{I_{LC}}{I_{res}} &= \frac{Z_{res}}{Z_{LC}} \end{aligned}$$

#### 4.4.1 - COMPORTEMENT DU PIÈGE POUR LES BF.

À la fréquence du réseau, l'influence du condensateur est majoritaire.

En utilisant :

$$jLn_0\omega_1 + \frac{1}{jC_0n_0\omega_1} = 0 \Leftrightarrow n_0jL_0\omega_1 = -\frac{1}{jC_0n_0\omega_1} \Leftrightarrow jL_0\omega_1 = -\frac{1}{jC_0n_0^2\omega_1}$$

$$\text{on écrit } Z_{LC-1} = jL_0\omega_1 + \frac{1}{jC_0\omega_1} = -\frac{1}{jC_0n_0^2\omega_1} + \frac{1}{jC_0\omega_1} = \frac{1}{jC_0\omega_1} \times \left( \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2} \right)$$

À la fréquence du réseau, le piège se comporte comme un condensateur de capacité  $C_1 = C_0 \times \left( \frac{n_0^2}{n_0^2 - 1} \right)$ .

#### 4.4.2 - COMPORTEMENT DU PIÈGE POUR LES HF.

Au delà de la fréquence d'accord, l'influence de l'inductance est majoritaire.

En utilisant :

$$j L_0 n_0 \omega_1 + \frac{1}{j C_0 n_0 \omega_1} = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{j C_0 n_0 \omega_1} = -n_0 j L_0 \omega_1 \Leftrightarrow \frac{1}{j C_0 \omega_1} = -j L_0 n_0^2 \omega_1$$

$$Z_{LC-n} = j L_0 n \omega_1 + \frac{1}{j C_0 n \omega_1} = j L_0 n \omega_1 - j L_0 \frac{n_0^2}{n} \omega_1 = j L_0 n \omega_1 \times \left( 1 - \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 \right) .$$

Au delà de la fréquence d'accord ( fréquence  $n \times f_1$  ), le piège se comporte comme une inductance de valeur

$$L_n = L_0 \times \left( 1 - \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 \right) .$$

#### 4.4.3 - DIMENSIONNEMENT DU PIÈGE.

Il faut avant tout avoir un relevé des puissances et du spectre du courant réseau.

- Le piège est accordé sur l'harmonique de courant le plus important.
- Le condensateur est choisi pour compenser la puissance réactive de l'installation :

$$Q_{C1} + Q = P \tan 21^\circ \quad \text{avec} \quad C_1 = C_0 \times \left( \frac{n_0^2}{n_0^2 - 1} \right)$$

Les valeurs de condensateurs sont normalisées.

Le choix du condensateur se fait en fonction de la tension efficace qu'il doit supporter.

Les harmoniques de tensions dépendent des harmoniques de courant passant dans le

piège :  $I_{LCn} = j C n \omega_1 U_{Cn}$

- L'inductance est choisie pour accorder le piège :

$$L_0 C_0 n_0^2 \omega_1^2 = 1$$

On fabrique l'inductance « sur mesure » (à la valeur désirée).

Le choix de l'inductance se fait en fonction du courant efficace qui la traverse.

Il faut prendre en compte les harmoniques du courant passant dans le piège.

- On calcule les harmoniques des courants de rang  $n_0 + 2$  circulant dans le piège et sur le réseau avec les relations du diviseur de courant pour vérifier s'il y a besoin de rajouter un autre piège à ce rang là.

### 4.5 - FILTRE ACTIF.

En dernier recours, un filtre actif permettra de complètement éliminer le reliquat d'harmoniques.

Cet appareil, branché sur le réseau, surveille le courant appelé par l'installation et fabrique à la place du réseau les harmoniques de courant demandés.

Cet appareil est complètement paramétrable (on peut choisir de compenser ou non le réactif, et choisir les harmoniques à fabriquer) et se choisit en fonction du courant efficace que l'on veut compenser.

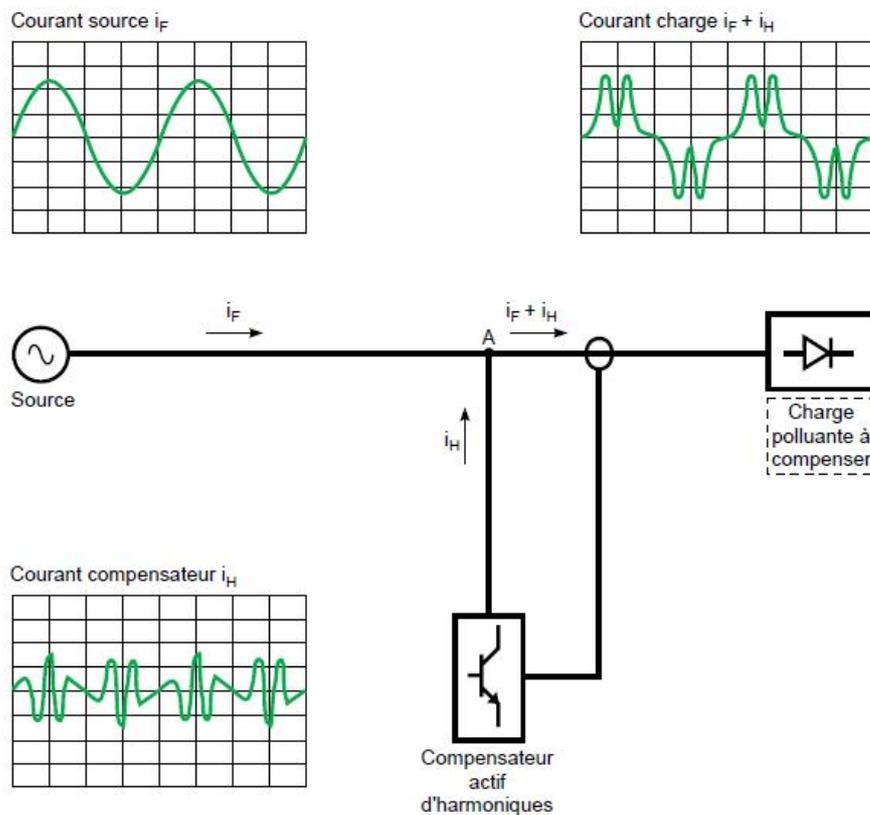
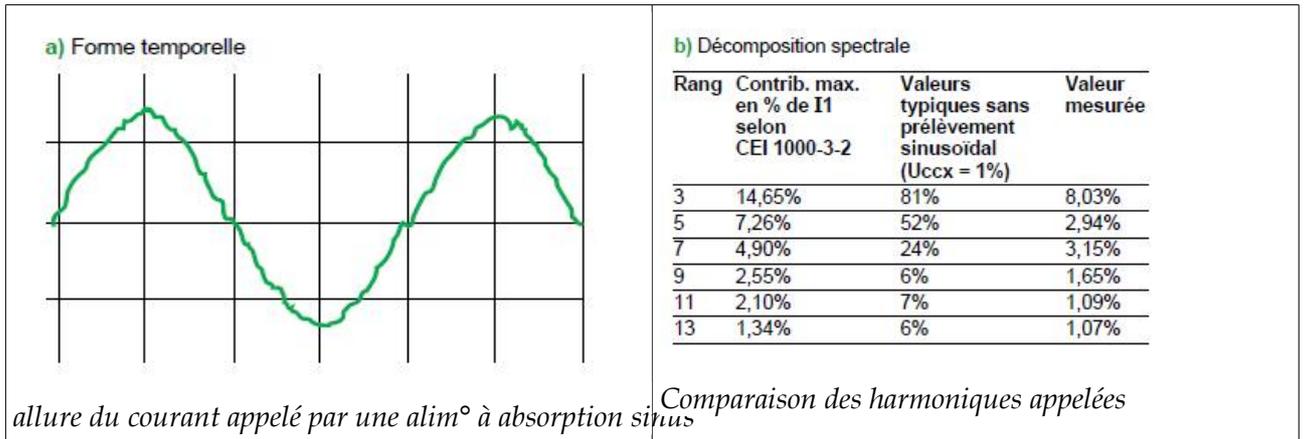


Illustration 1: principe d'un filtre actif - cahier technique Schneider n°183

## 5 - ALIMENTATIONS ET VARIATEURS $F_p = 1$ .

### 5.1 - ALIMENTATIONS CONTINUES À ABSORPTION SINUSOÏDALE.

Ces alimentations de dernière génération permettent toujours de fournir une tension continue, avec un rendement équivalent aux alimentations à découpage, mais le redresseur de tête est commandé pour appeler un courant quasiment sinusoïdal et en phase avec la tension.



### Slimline Power System

48V DC Outside Plant and Customer Premise Solution



Input	
Voltage Range	90 – 175 Vac (500W) 176 – 290 Vac (1000W)
Input Frequency	45-65 Hz
Input Current	6 Amps
Inrush Transient	16 Apk
Total Harmonic Distortion (THD)	< 5 %
Power Factor	~1.0
Holdup Time	>10 ms full power

## 5.2 - VARIATEURS 4Q.

Avec un variateur classique pour machines alternatives (brushless, asynchrone), lors des phase de freinage, l'énergie électrique produite par la machine est dissipée dans une résistance de freinage, car le redresseur à diodes de tête n'est pas réversible en courant.

Les nouveaux variateurs (comme le 890 de Parvex) ont coté réseau un « pont à commutation forcée » qui permet de renvoyer l'énergie vers le réseau, et d'appeler un courant quasiment sinusoïdal et en phase avec la tension.

**«ACTIVE FRONT END» : ALIMENTATION 4Q AVEC RÉGÉNÉRATION D'ÉNERGIE VERS LE RÉSEAU**

Les modules 890CD et 890SD peuvent être configurés en alimentation réversible 4Q permettant un renvoi d'énergie vers le réseau par un courant quasi sinusoïdal.

Harmoniques avec pont actif IGBT

La structure de ce pont est celle d'un onduleur. La tension à l'entrée du pont (coté réseau) est donc une tension MLI.

Donc entre ce pont et le réseau, il doit y avoir une inductance de lissage pour rendre le courant réseau sinusoïdal.

