

Harmoniques et relèvement d'un facteur de puissance.

Pré-requis : Harmoniques, filtres LC série et parallèle,

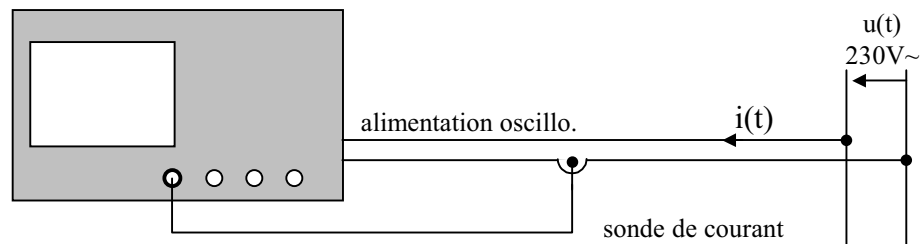
A retenir : méthodes pour relever un facteur de puissance.

Sous tension sinusoïdale de fréquence 50 Hz, seul un courant sinusoïdal et de même fréquence 50 Hz (période de 20ms) apporte la puissance active nécessairement développée par l'appareil alimenté par cette tension. Or, la plupart du temps, les appareils n'appellent pas de courant sinusoïdal : le courant a bien une période de 20 ms mais il est plus ou moins déformé et possède dans ce cas des harmoniques de courant. Seul le fondamental de ce courant déformé apporte alors la puissance active développée par l'appareil : les harmoniques du courant n'apportent pas cette puissance et contribuent (malheureusement) à augmenter inutilement l'intensité efficace du courant, ce qui se traduit par une puissance apparente plus élevée que la puissance active développée à l'entrée de l'appareil (au niveau de son cordon d'alimentation). La puissance apparente dimensionne l'alimentation de l'appareil (protection, tenue en tension et en courant de ses composants) : elle doit être aussi faible que possible, c'est à dire se rapprocher au maximum de la puissance active développée par l'appareil, afin d'être économique, mais aussi (et parfois surtout) afin de n'exiger que le minimum de courant du réseau d'alimentation.

On parlera, dans ce cours, de quelques méthodes expérimentales de relèvement d'un facteur de puissance d'un oscilloscope (appareil courant de laboratoire).

1. Problème observé.

Nous possédons, par exemple, un oscilloscope qui, alimenté sous une tension sinusoïdale 230V-50 Hz, appelle un courant non sinusoïdal $i(t)$ que l'on peut observer grâce à une sonde courant connectée à l'oscilloscope lui - même :

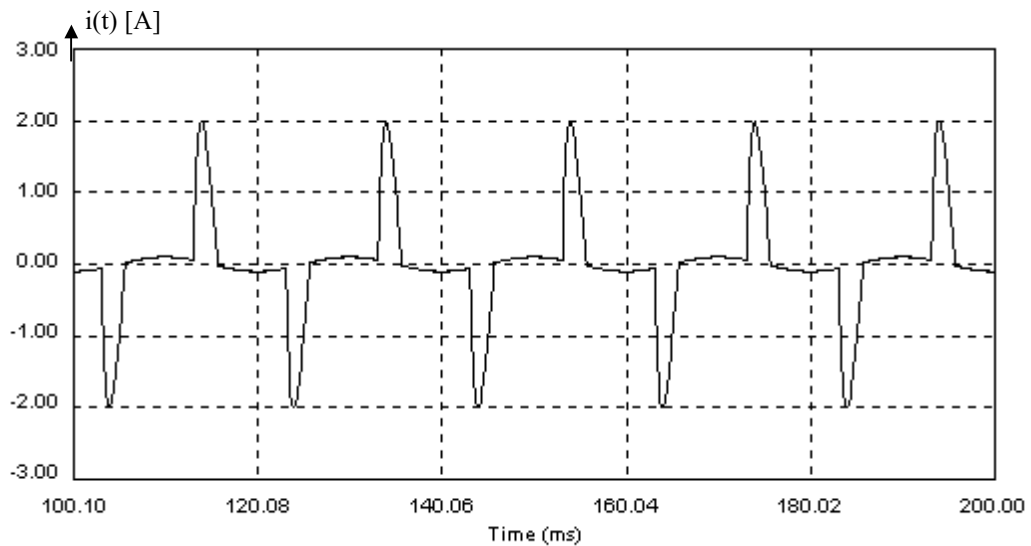


Une pince-wattmètre nous donne alors les indications suivantes au niveau du cordon d'alimentation de l'oscilloscope :

puissance apparente :	$S \approx 165 \text{ VA}$
puissance active :	$P \approx 100 \text{ W}$
puissance réactive :	$Q \approx - 41 \text{ Var}$
cos φ :	$\text{DPF} \approx 0,93$
facteur de puissance :	$\text{PF} \approx 0,61$
intensité efficace du courant $i(t)$	$I \approx 0,72 \text{ A}$
intensité efficace du fondamental $i_1(t)$	$I_1 \approx 0,47 \text{ A}$

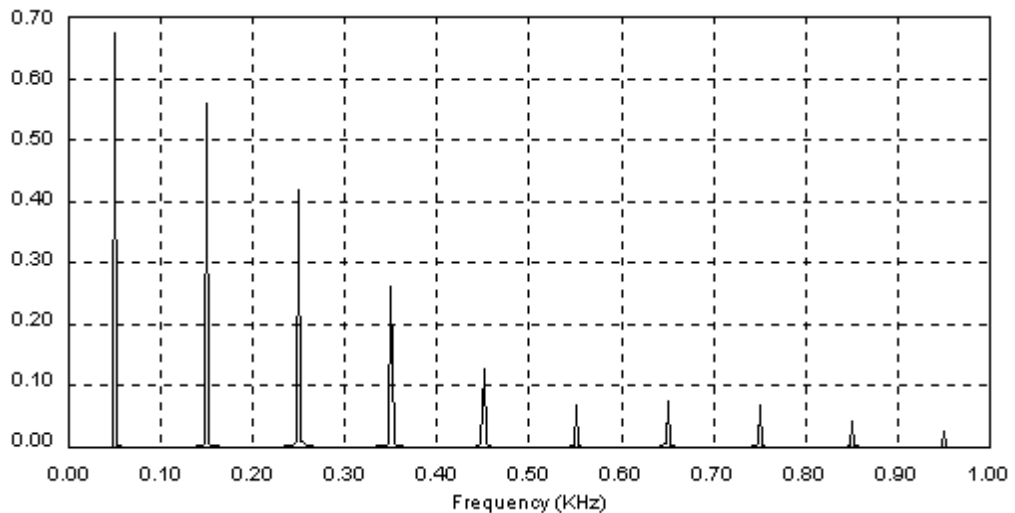
L'observation de la valeur de PF nous indique que l'intensité du courant est $1/\text{PF} \approx 1,6$ fois trop grande pour faire fonctionner correctement l'oscilloscope : on pourrait réduire la taille des fusibles de protection ou bien la taille du transformateur qui alimente l'oscilloscope : un transformateur de 100 VA devrait suffire au lieu d'un transformateur de 165 VA. Cela n'est pas très grave, étant donné la faible consommation de l'oscilloscope, mais si l'on branche 10 oscilloscope ça commence à faire beaucoup !

D'autre part, la différence entre le facteur de puissance PF (*Power Factor*) et le DPF (*Displacement Power Factor*, le "cos φ " en français) nous apprend que le courant est loin d'être sinusoïdal, comme nous le confirme la visualisation de l'allure du courant grâce à la sonde :



Cette allure du courant est typique d'une alimentation redressée double alternance sur charge capacitive (pour alimentation à découpage par exemple). L'analyse spectrale du courant nous donne les résultats suivants :

amplitude = valeur maximale des harmoniques



On vérifie bien la présence de nombreux harmoniques.

2. Relèvement du facteur de puissance

"Relever le facteur de puissance" consiste à augmenter PF de manière à le rapprocher le plus possible de la valeur 1. Dans ce cas on aura $S \approx P$ et non plus $1,6 \times P$ comme précédemment. Cela revient à diminuer l'intensité efficace I du courant de ligne de manière à le rapprocher le plus possible de l'intensité efficace I_1 du courant fondamental $i_1(t)$ de $i(t)$: l'alimentation sera alors correctement dimensionnée pour l'utilisation qu'on en fait (taille, protection, coût).

En triphasé cela a d'autres avantages (par exemple la diminution de l'intensité du courant de neutre, théoriquement nul en régime triphasé équilibré sinusoïdal).

Nous connaissons les relations suivantes :

$$PF \triangleq \frac{P}{S}$$

$$Q = P \times \tan \varphi \text{ avec } \varphi \text{ le déphasage } u(t) / i_1(t) \text{ et } i_1 \triangleq \text{fondamental du courant } i(t)$$

$$S^2 = (U \times I)^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \text{ avec } D \text{ la puissance déformante } (D^2 \triangleq S^2 - P^2 - Q^2)$$

Pour avoir $S \approx P$ (c'est - à - dire la valeur minimale de S) il faudra donc réduire Q et D. Dans ce cas on aura $I \approx I_1$.

Remarque : La valeur de Q calculée par la pince Chauvin Arnoux est déduite de la relation $Q = P \cdot \tan \varphi$, cette relation prête à débat dans la littérature spécialisée : voir par exemple la définition de Q en régime alternatif dans l'ouvrage de M. Lavabre *Electronique de puissance, conversion de l'énergie*, éditeur Educavivre, collection A Capliez où l'on donne

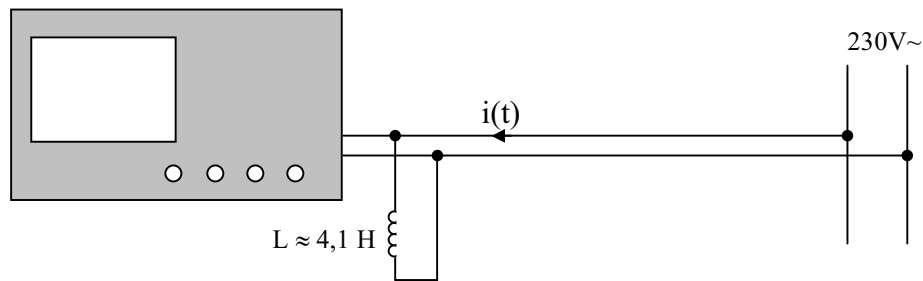
$$\text{plutôt } Q = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} U_k \cdot I_k \cdot \sin \varphi_k$$

2.1. Réduction de Q .

Il s'agit d'obtenir $Q \approx 0$: cela signifie que l'on veut augmenter le $\cos \varphi$ vu par la ligne d'alimentation : on dit que l'on réalise un "compensation de puissance réactive".

Comme $Q \approx -41 \text{ Var}$ dans le cas présent, il suffit de placer en parallèle avec l'alimentation de l'oscilloscope une inductance qui absorbera $Q_{\text{ind}} \approx 41 \text{ Var}$. Calculons alors l'inductance L :

$$Q = \frac{U^2}{L \cdot \omega} \Leftrightarrow L = \frac{U^2}{Q_{\text{ind}} \cdot \omega} \approx \frac{230^2}{41 \times 2\pi \times 50} \approx 4,1 \text{ H}$$

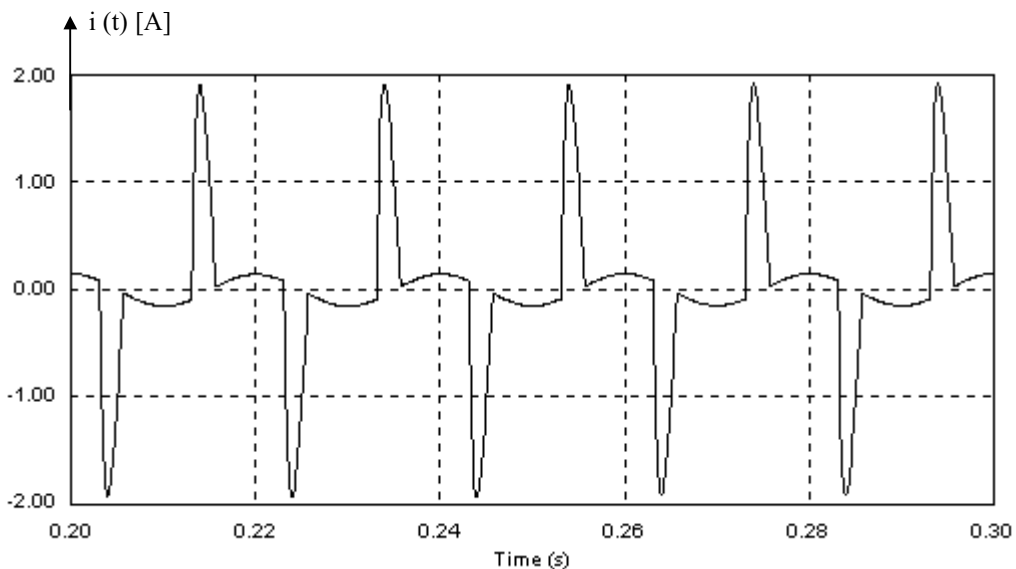


La pince-wattmètre nous donne alors les indications suivantes :

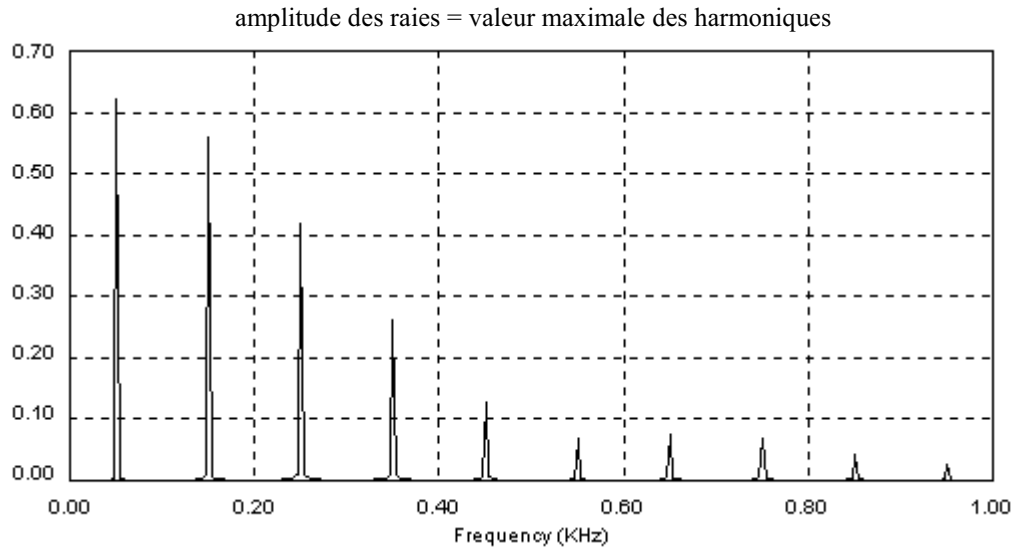
puissance apparente :	$S \approx 169 \text{ VA}$
puissance active :	$P \approx 100 \text{ W}$
puissance réactive :	$Q \approx 0 \text{ Var}$
$\cos \varphi$:	$\text{DPF} \approx 1$
facteur de puissance :	$\text{PF} \approx 0,59$
intensité efficace du courant $i(t)$	$I \approx 0,74 \text{ A}$
intensité efficace du fondamental $i_1(t)$	$I_1 \approx 0,43 \text{ A}$

Conclusion :

Le $\cos \varphi$ a bien été relevé à 1...mais le facteur de puissance diminue légèrement contre toute attente. En fait on pouvait s'y attendre car la valeur faible du PF est essentiellement due à une déformation (ou "distorsion") importante du courant (qui contient beaucoup d'harmoniques) et non à un déphasage $u(t) / i_1(t)$ qui était déjà faible. L'augmentation du courant I est due à l'impédance non infinie de la bobine pour les harmoniques...l'effet recherché est donc nul ici !



Le spectre de $i(t)$ est le suivant :

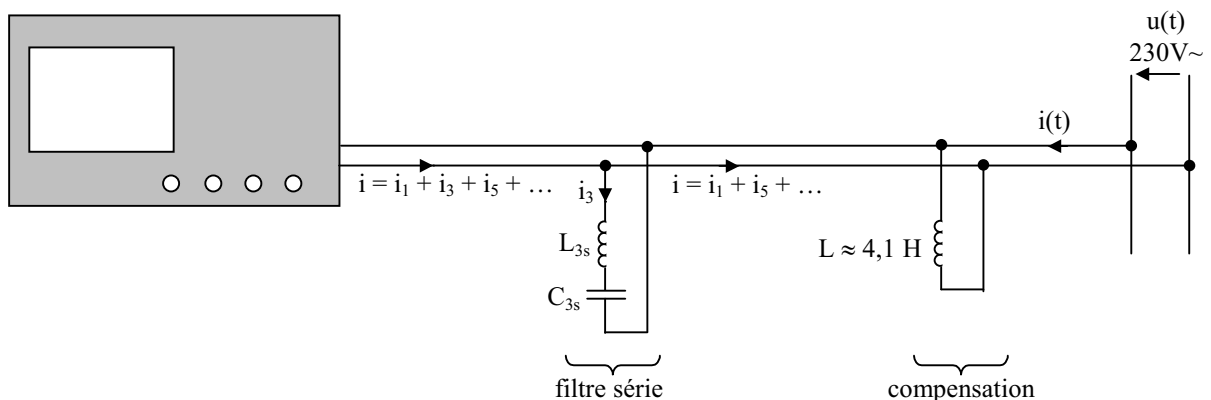


En fait cette méthode de relèvement de facteur de puissance n'est efficace que pour un courant déjà relativement sinusoïdal et n'est donc utilisée que conjointement avec des filtres : voir paragraphe suivant.

2.2. Réduction de D.

Pour réduire PF il faut alors réduire l'amplitude des harmoniques de $i(t)$, c'est - à - dire réduire la puissance déformante D. Grâce au spectre de $i(t)$ on observe la raie du fondamental du courant $i(t)$ (à la fréquence 50 Hz) et les harmoniques impairs, seuls présents puisqu'on a une absence d'harmoniques pairs due à la symétrie de glissement de $i(t)$. Il faut donc concevoir des filtres de courant qui annulent les harmoniques impairs. Le premier harmonique à supprimer est celui qui possède la raie de plus forte amplitude, c'est-à-dire ici l'harmonique de rang 3 que l'on va nommer $i_3(t)$ ⁽¹⁾.

Une idée est de prendre "un piège à harmonique" qui consiste à prendre un filtre LC série qui possède une impédance nulle à la fréquence de résonance, que l'on choisie alors égale à $3 \times 50 = 150$ Hz (filtre utilisé pour l'harmonique 3). L'impédance nulle du filtre à cette fréquence a pour effet de court-circuiter l'harmonique 3 du courant qui, de ce fait, ne "remonte" plus vers le réseau d'alimentation :



Calcul du filtre LC série :

à la résonance nous avons $L_{3s} \cdot C_{3s} \cdot \omega_3^2 = 1$ avec $\omega_3 = 3 \times \omega$. Il faut donc que les éléments L_{3s} et C_{3s} du filtre assurent :

¹ Remarque : pour les onduleurs de tension la stratégie de commande vise non pas à supprimer la raie de plus forte amplitude mais à supprimer la (ou les) raie la plus proche du fondamental, en effet : il ne s'agit pas de filtrage. Cette stratégie de commande des onduleurs ne modifie pas le taux de distorsion harmonique (cause de la puissance déformante) mais à faciliter un filtrage ultérieur qui n'aura qu'à réduire l'amplitude des harmoniques de rang élevé, donc de fréquence élevée (\Rightarrow filtre moins coûteux).

$$\boxed{L_{3s} \times C_{3s} = \frac{1}{(3.\omega)^2}} \approx \frac{1}{(3 \times 2\pi \times 50)^2} \approx 1,13.10^{-6} \text{ rad}^{-2}.\text{s}^2$$

Une infinité de valeurs sont possibles pour le choix de L_{3s} et C_{3s} . L'impédance du filtre à 50 Hz est donnée par la relation

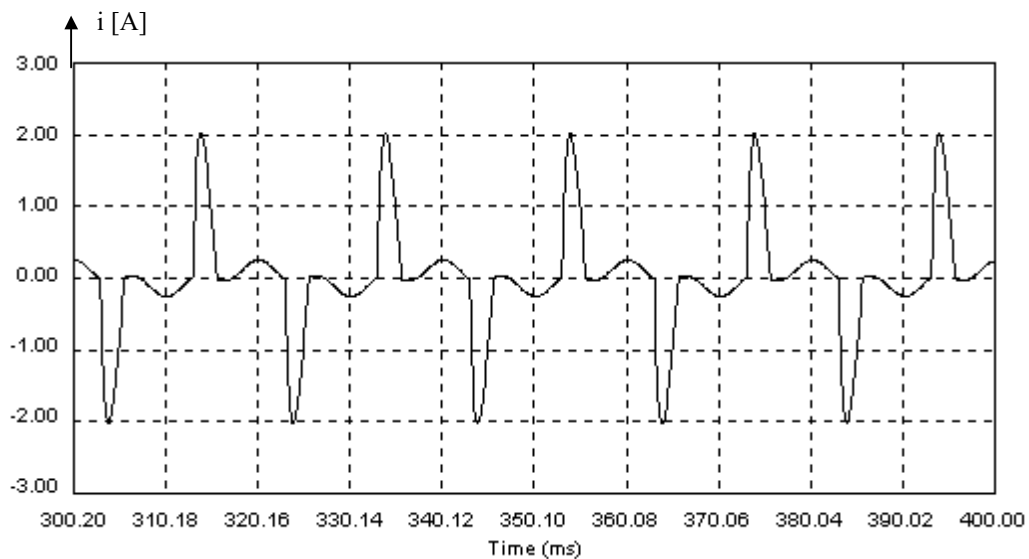
$$Z_s = \left| \frac{L_{3s} \cdot C_{3s} \cdot \omega^2 - 1}{C_{3s} \cdot \omega} \right|$$

Puisque le produit $L_{3s} \cdot C_{3s}$ est constant (calculé précédemment), il devient nécessaire de prendre C_{3s} aussi faible que possible pour assurer Z_{3s} élevée à 50 Hz (le filtre ne doit pas court-circuiter le courant fondamental !). Attention cependant à ne pas prendre C_{3s} trop faible car cela reviendrait à prendre L_{3s} élevée avec les problèmes que cela engendre (taille, coût, consommation de puissance active due aux pertes fer, résistance série élevée qui réduit l'efficacité du filtre).

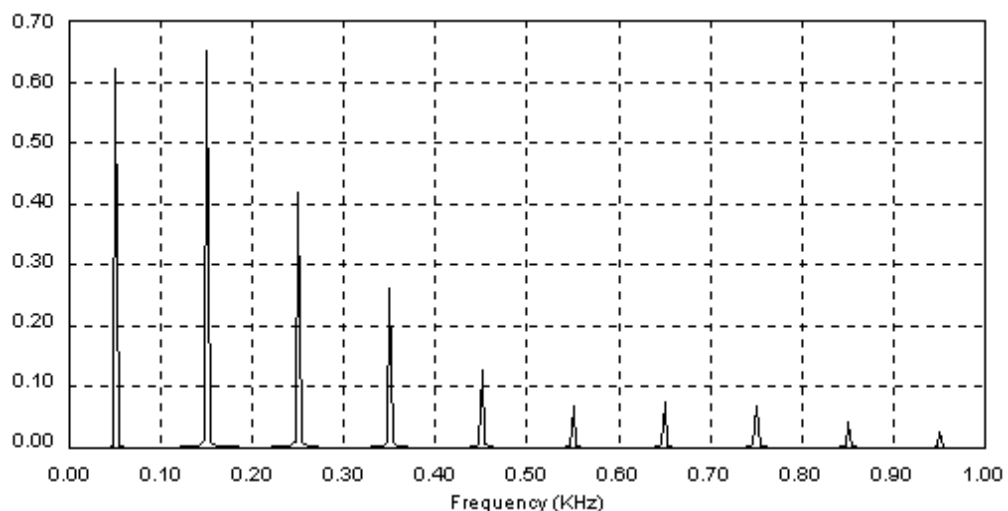
On peut choisir les valeurs suivantes : $L_{3s} \approx 1 \text{ H}$ et $C_{3s} \approx 1,1 \mu\text{F}$. Les mesures données par la pince wattmètre sont les suivantes (L réajustée approximativement à 2,7 H pour obtenir un DPF = 1) :

puissance apparente :	$S \approx 189 \text{ VA}$
puissance active :	$P \approx 100 \text{ W}$
puissance réactive :	$Q \approx 0 \text{ Var}$
cos φ :	$\text{DPF} \approx 1$
facteur de puissance :	$\text{PF} \approx 0,53$
intensité efficace du courant $i(t)$	$I \approx 0,82 \text{ A}$
intensité efficace du fondamental $i_1(t)$	$I_1 \approx 0,43 \text{ A}$

Le facteur de puissance est encore plus mauvais qu'avant !!! Il semble que cette méthode soit encore inefficace (ça alors !). C'est ce que confirme la visualisation du courant $i(t)$ et de son spectre :



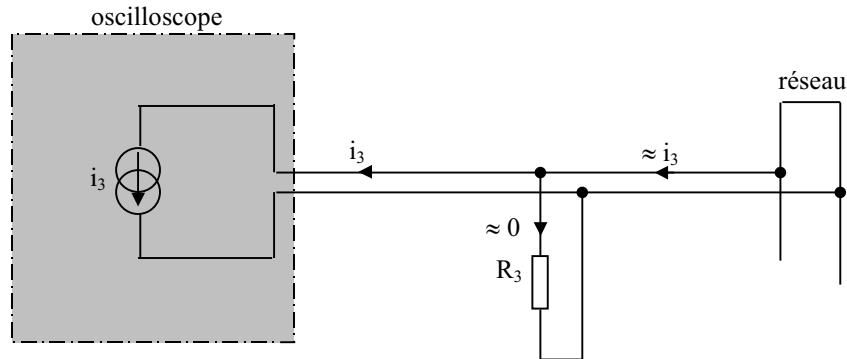
Le spectre de $i(t)$ est le suivant :



L'harmonique 3 est toujours présente (et en outre d'amplitude supérieure au fondamental !) alors que le filtre devait l'éliminer !

Pourquoi le facteur de puissance PF n'a t'il pas augmenté ?

En fait il faut en venir au schéma équivalent du circuit vis à vis de l'harmonique 3 (le filtre LC série se comporte comme une résistance R_3 à la résonance, due essentiellement aux pertes fer et à la résistance série de la bobine) :



Puisque le réseau EDF est assimilable à un générateur de tension sinusoïdale de 50 Hz quasiment dépourvu d'harmoniques de tension, il devient équivalent à un court-circuit en ce qui concerne l'harmonique 3 de courant (son impédance étant faible devant l'impédance de R_3). Dans ce cas le courant prend le chemin le plus facile pour lui : il ne passe pas par le filtre qui oppose une impédance résistive R_3 faible mais non nulle (due à la résistance équivalente de la bobine) et le filtre ne "piège" donc pas l'harmonique 3. Le réseau possède en réalité une impédance $Z_{\text{réseau}} (\approx 1 \Omega$ par exemple), ce procédé peut donc donner des résultats à condition d'avoir $R_3 < Z_{\text{réseau}}$: cela explique la raison pour laquelle ce type de filtre peut être efficace, mais il ne faut pas prendre L_3 trop élevée (car cela entraîne toujours R_3 élevée).

En outre le filtre possède une impédance non infinie, quelles que soient les fréquences considérées et, de ce fait, appelle un courant $i(t)$ plus élevé qu'avant (les harmoniques ont des amplitudes plus élevées) : c'est la cause de l'augmentation de l'intensité efficace du courant $i(t)$, et donc du facteur de puissance (via l'augmentation de $S = U \times I$ pour une même puissance active P de 100 W).

Pour remédier à ce problème il suffit alors d'augmenter l'impédance du réseau à 150 Hz : on peut simplement utiliser un circuit LC parallèle placé en série sur l'alimentation de l'oscilloscope. En effet : théoriquement un circuit LC parallèle présente une impédance infinie à sa fréquence de résonance (voir schéma ci-dessous après le calcul du filtre).

Calcul du filtre LC parallèle :

à la résonance nous avons $L_{3p} \cdot C_{3p} \cdot \omega_3 = 1$ avec $\omega_3 = 3 \times \omega$. Il faut donc que les éléments L_{3p} et C_{3p} du filtre assurent :

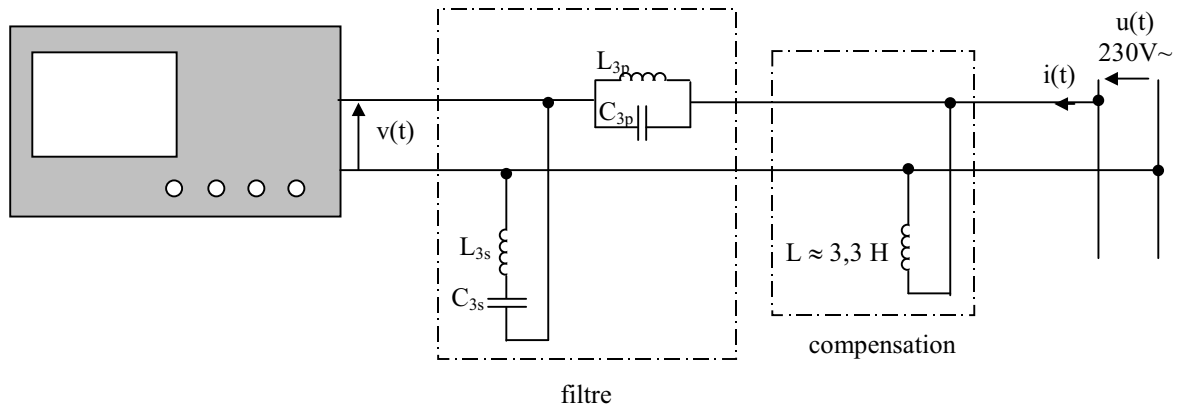
$$L_{3p} \times C_{3p} = \frac{1}{(3 \cdot \omega)^2} \approx 1,13 \cdot 10^{-6} \text{ rad}^{-2} \cdot \text{s}^2$$

Une infinité de valeurs sont encore possibles pour le choix de L_{3p} et C_{3p} . On peut prendre des valeurs qui assurent l'impédance la plus faible possible à 50 Hz, afin que le filtre ne provoque pas une chute de tension trop élevée à 50 Hz, ce qui serait préjudiciable pour le bon fonctionnement de l'oscilloscope. L'impédance du filtre à 50 Hz est donnée par la relation

$$Z_p = \left| \frac{L_{3p} \cdot \omega}{L_{3p} \cdot C_{3p} \cdot \omega^2 - 1} \right|$$

Puisque le produit $L_{3p} \cdot C_{3p}$ est constant, il devient nécessaire de prendre L_{3p} aussi faible que possible pour assurer Z_p faible lorsque $f = 50$ Hz (pour assurer un bon fonctionnement de l'oscilloscope). Dans ce cas c'est la grande valeur de C_{3p} qui, pour des raisons d'encombrement, va limiter la valeur de L_{3p} .

On peut choisir les valeurs suivantes : $C_{3p} \approx 4,4 \mu\text{F}$ et $L_{3p} \approx 256 \text{ mH}$ (L réajustée à 3,3 H pour conserver un DPF = 1)

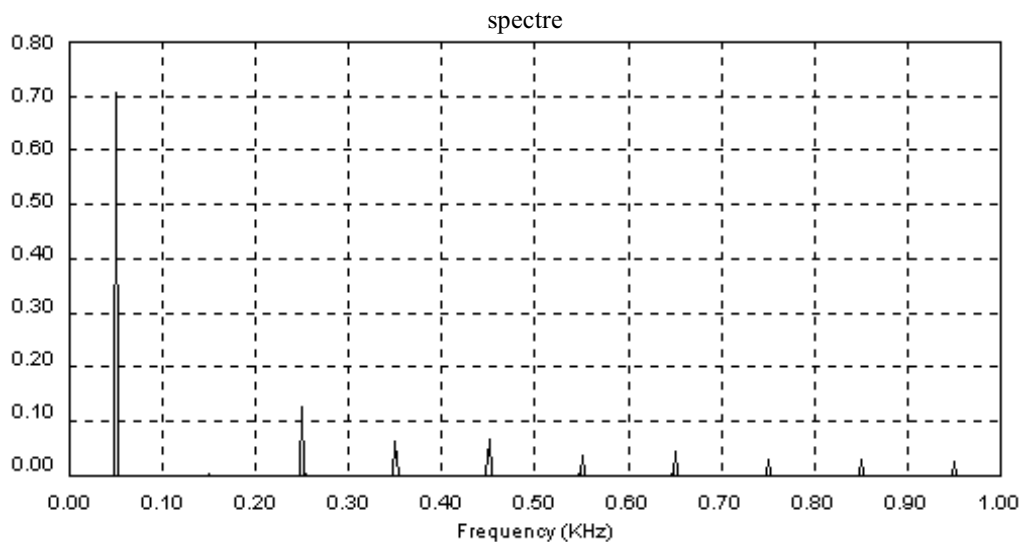
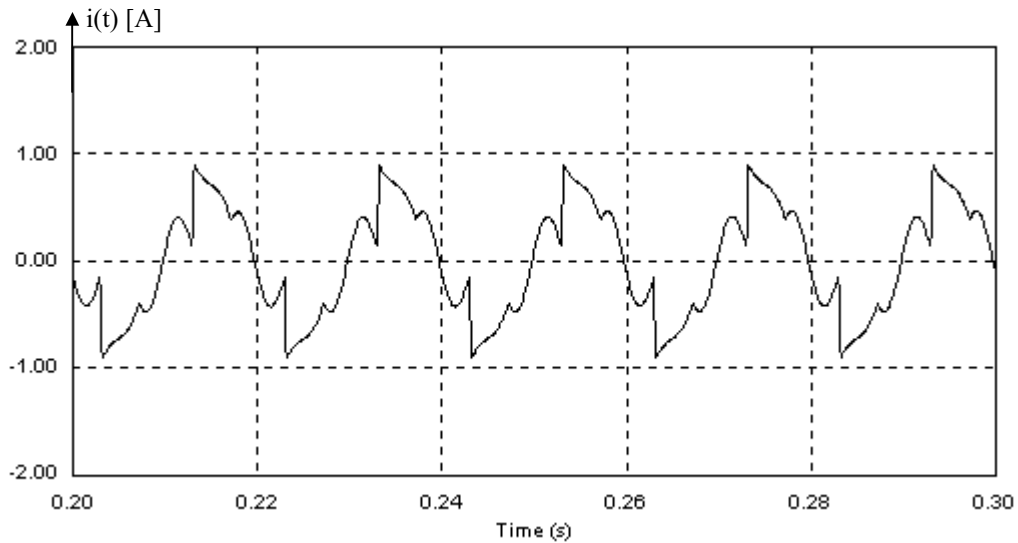


La pince wattmètre nous donne alors les indications suivantes :

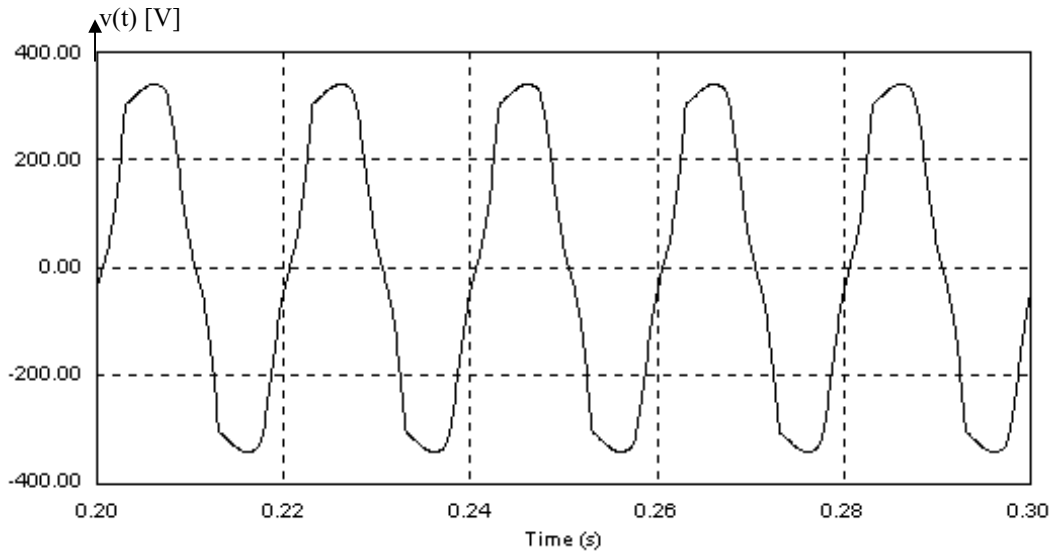
puissance apparente :	$S \approx 137 \text{ VA}$
puissance active :	$P \approx 114 \text{ W}$
puissance réactive :	$Q \approx 0 \text{ Var}$
$\cos \varphi$:	$\text{DPF} \approx 1$
facteur de puissance :	$\text{PF} \approx 0,83$
intensité efficace du courant $i(t)$	$I \approx 0,59 \text{ A}$

Le facteur de puissance a été nettement relevé ! Le filtrage est efficace, le courant efficace est passé de 0,72 A à 0,59 A (pour nos faibles puissance le jeu n'en vaut cependant pas la chandelle !). Cependant on observe une augmentation de la puissance apparente et de la puissance active...quel en est la raison ?

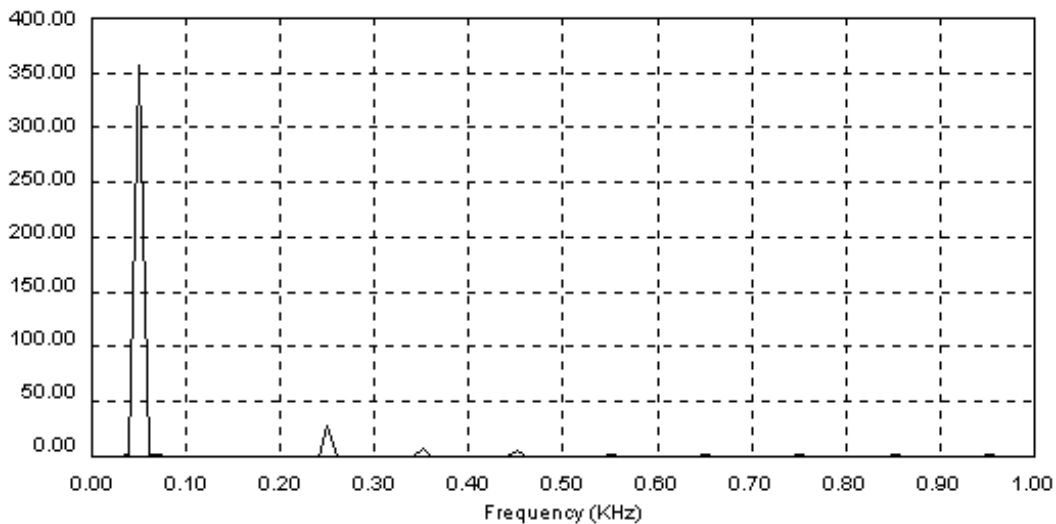
L'observation de l'allure du courant $i(t)$ et de son spectre nous donne :



L'allure et le spectre de la tension d'alimentation de l'oscilloscope sont les suivantes :



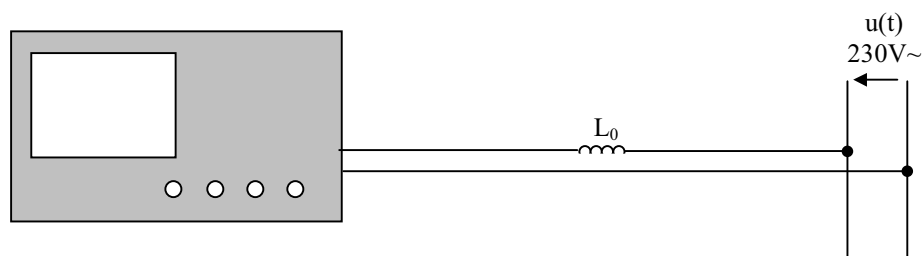
La tension est distordue, comme nous le confirme son spectre :



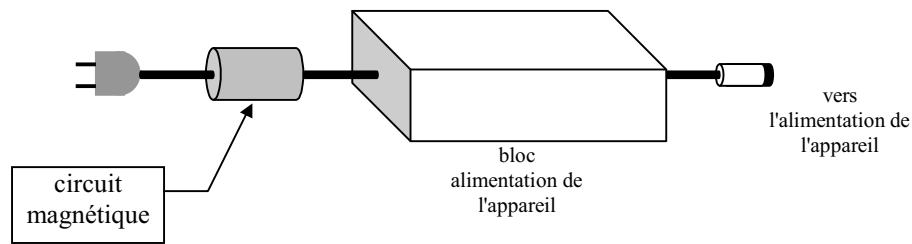
On observe que les harmoniques de tension demeurent relativement faibles par rapport au fondamental, ce n'est donc pas eux qui sont essentiellement à l'origine de l'augmentation de puissance active. Cependant en y regardant de plus près on observe une tension fondamentale d'amplitude supérieure à $230\sqrt{2} \approx 325 \text{ V}$: voilà donc l'explication de l'augmentation de puissance (une sorte de phénomène de résonance intervient aux bornes de l'oscilloscope).

Remarque 1 : On peut supprimer le circuit série $L_{3s}C_{3s}$ et l'inductance de compensation si l'on veut réduire le coût du montage : le facteur de puissance reste sensiblement égal à 0,89.

On peut encore réduire le coût du filtre en utilisant une simple inductance L_0 en série avec l'alimentation et qui a pour rôle d'opposer une impédance d'autant plus grande que l'ordre des harmonique est élevé, il faut cependant la prendre suffisamment faible (en rapport avec la courant appelé par le récepteur) pour ne pas trop faire chuter la tension d'alimentation (l'oscilloscope ne fonctionnerait plus).



Ce procédé, pas cher, est utilisé pour l'alimentation des appareils grand public de faible consommation (une petite inductance de quelques mH suffit alors) où l'on insert un circuit magnétique autour du fil d'alimentation afin de créer une inductance.



Remarque 2 : le calcul du circuit LC série se fait parfois pour une résonance à 135 Hz plutôt que 150 Hz afin d'éviter des problèmes d'échauffement (et donc de vieillissement prématuré) du condensateur série soumis à une tension harmonique 3 très élevée (dont l'amplitude est seulement limitée par la résistance équivalente à la résonance R_3 vue précédemment et qui agit comme un amortissement) : elle peut atteindre 1000 Volt ici. Cette résonance peut aboutir à la destruction des filtres.

On peut utiliser les mêmes méthodes de filtrage pour supprimer l'harmonique 5 (on se limite à 2 filtres passifs en pratique : un pour l'harmonique 3 et un autre pour l'harmonique 5). En outre ces solutions ne sont intéressantes (coût, taille, poids) qu'à partir d'une certaine puissance développée par l'appareil, ce qui explique que les appareils, tels que les oscilloscopes, n'en soient pas pourvus.

Remarque 3 : on a vu que les différentes méthodes vues ici ne sont pas toutes efficaces. Cela n'est pas général et il convient d'adapter ces procédés au problème spécifiquement étudié : des batteries de condensateurs sont généralement utilisées pour les installations inductives (avec moteurs asynchrones par exemple). Ici les courbes (chronogrammes et spectres) ont été tracées avec le logiciel de simulation gratuit PSIM et le modèle de l'oscilloscope proposé correspond à un Hewlett - Packard numérique 54501A.

Pour les personnes qui souhaitent simuler l'oscilloscope Hewlett Packard 54501A sur ordinateur, une bonne approximation de l'oscilloscope vu du réseau d'alimentation est la suivante :

