

TP : Pollution harmonique

Objectif : mettre en évidence les conséquences d'une charge non linéaire connectée à un réseau et mettre en œuvre des solutions.

Pour ce faire il faut disposer d'un analyseur spectral d'une pince ampèremétrique avec sortie analogique d'une sonde d'isolement et d'un oscilloscope.

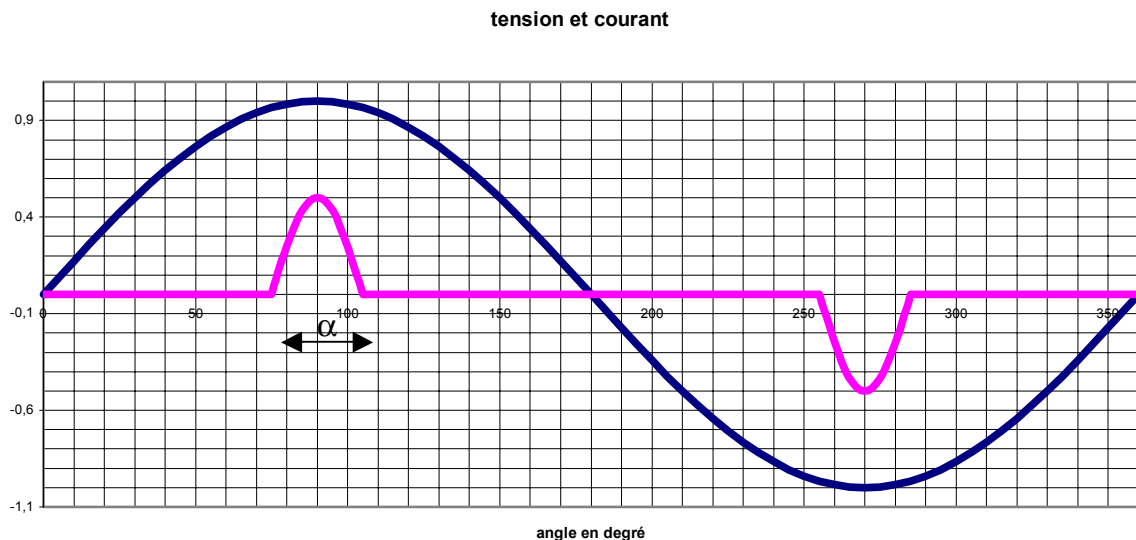
Les mesures sont menées sur le Banc d'étude des perturbations des réseaux électriques CEM et Harmoniques.

Pré-requis ou connaissances sollicitées lors de ce TP

- Série et analyse de Fourier
- Notion de puissance active, réactive, déformante et grandeurs caractéristiques du réseau.

Partie 1 : Prédétermination des grandeurs caractéristiques :

- 1.1 Citer des charges non linéaires.
- 1.2 Quelles sont les conséquences sur le réseau BT ?
- 1.3 Un récepteur absorbe un courant répondant à l'allure suivante :



$i(\theta)$ s'exprime sur l'intervalle angulaire α par la relation suivante : $i(\theta) = \hat{I} \cos(q\theta)$ en plaçant l'axe de référence en $(\pi/2)$ radians.

- 1.3.1 Exprimer la valeur efficace I de $i(\theta)$ en fonction de α .
- 1.3.2 Exprimer le courant $i(\theta)$ sous la forme de sa série de Fourier. En déduire l'amplitude des 17 premiers harmoniques. Pour $\alpha = \frac{\pi}{6}$ et $I = 3$ A.

- 1.3.3 Exprimer P,Q,S,D et THD respectivement puissance active, puissance réactive, puissance apparente, puissance déformante et taux de distorsion harmonique lorsque
- $$i(\theta) = \sum_{n=1}^{+\infty} I_n \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(n(\theta - \varphi)).$$
- 1.3.4 Effectuer les applications numériques de P,Q,S, D, THD et le facteur de puissance Fp puis conclure.
- 1.3.5 Déterminer la structure d'un filtre passif qui permettrait d'éteindre l'harmonique (p≠0) le plus ample. Préciser la valeur des différents éléments qui concourent à sa réalisation.

Partie 2 : Mise en œuvre :

Objectifs : mettre en évidence la pollution harmonique et mettre en œuvre une solution de dépollution.

2.1 Mesure avec le variateur de vitesse :

Les mesures suivantes doivent être menées avec un courant efficace absorbé par le variateur de vitesse de 3 A.

- ☞ Visualiser la tension et le courant instantané du réseau notés respectivement Vr(t) et i(t) . Puis conclure.
- ☞ Faire l'analyse harmonique de ces grandeurs puis conclure. Vous ne manquerez pas de préciser la valeur des grandeurs pertinentes en vue d'atteindre les objectifs visés.

2.2 Adjonction en série avec le variateur de la self L1 :

- ☞ Relever l'allure de la tension du réseau et le courant absorbé par le variateur. Faire une analyse harmonique de ces deux grandeurs.
- ☞ Relever la tension à l'entrée du variateur Vv et du courant absorbé par le variateur. Justifier l'allure des oscillogrammes obtenus.
- ☞ Faire une analyse harmonique de Vv. Commenter. Préciser le rôle de L1 ?
- ☞ Etablir le schéma équivalent en régime harmonique puis en utilisant les valeurs du rang 3 déterminer la valeur de L1 et comparer cette valeur à celle annoncée par le constructeur. Enoncer les causes des différences éventuelles.

ELEMENTS DE CORRECTION TP HARMOCEM

1.1 Les charges non linéaires sont les convertisseurs statiques en général tel que redresseur sur charge capacitive, gradateur, sources d'éclairage etc.... Ces charges sont des sources harmoniques.

1.2 Conséquences : surdimensionnement en général des constituants électriques depuis la source (les transformateurs), les câbles, les appareils de protection jusqu'aux récepteurs. Perturbation du fonctionnement des récepteurs. Altération des constituants en général de par l'échauffement provoqué par les harmoniques.

1.3.1 La valeur efficace I est donnée par :

$$I = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} (\hat{I} \cdot \cos(q \cdot \theta))^2 \cdot d\theta \quad \text{d'autre part } (q \cdot \alpha = \pi).$$

Cela conduit à $I = \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi}} \hat{I}$, on vérifie alors que si $\alpha = \pi$ cas où $i(\theta) = \hat{I} \cdot \cos(\theta)$ donc $I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}}$.

1.3.2 Le courant $i(\theta)$ présente des symétries intéressantes si on place l'axe de référence en $\pi/2$. En effet $i(\theta)$ est une fonction paire, la série ne contient que des termes en cosinus. D'autre part $i(\theta)$ sur l'intervalle $[0; \pi]$ est égale à $-i(\theta)$ sur l'intervalle $[\pi; 2\pi]$ cette symétrie est connue sous le nom de symétrie de glissement. Cette dernière remarque permet de dire que la série ne contient alors que des harmoniques de rang impair $(2p+1)$.

$$i(\theta) = I_k \cdot \cos(k \cdot \theta) \quad \text{avec } k = (2p+1)$$

Par conséquent l'amplitude de chaque harmonique est le résultat de l'équation suivante au

$$\text{rang } p : \quad I_k = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \hat{I} \cdot \cos(q \cdot \theta) \cdot \cos((2p+1) \cdot \theta) \cdot d\theta :$$

Après quelques développements (?!!!!!!) on aboutit à :

$$i(\theta) = \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{4 \cdot q \cdot \hat{I}}{[q^2 - (2 \cdot p + 1)^2] \pi} \cdot \cos\left(\frac{(2 \cdot p + 1) \cdot \alpha}{2}\right) \cdot \cos((2 \cdot p + 1) \cdot \theta)$$

Calcul des valeurs efficaces des harmoniques :

Rang	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Valeur efficace	1.48	1.41	1.26	1.07	0.85	0.61	0.39	0.19	0.05

1.3.3 La puissance instantanée $p(\theta)$ s'exprime : $p(\theta) = v(\theta).i(\theta)$

$$P = V.I_1.\cos\varphi$$

$$Q = V.I_1.\sin\varphi$$

$$S = V.I = V.\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}$$

Par ailleurs $S^2 = V^2.(I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2) = P^2 + Q^2 + V^2.\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2$ on identifie D communément nommée puissance déformante.

$D = V.\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}$; le taux de distorsion harmonique THD est donné par la relation suivante :

$$THD_R = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I} = \sqrt{\frac{I^2 - I_1^2}{I^2}} \text{ par rapport au courant efficace } I.$$

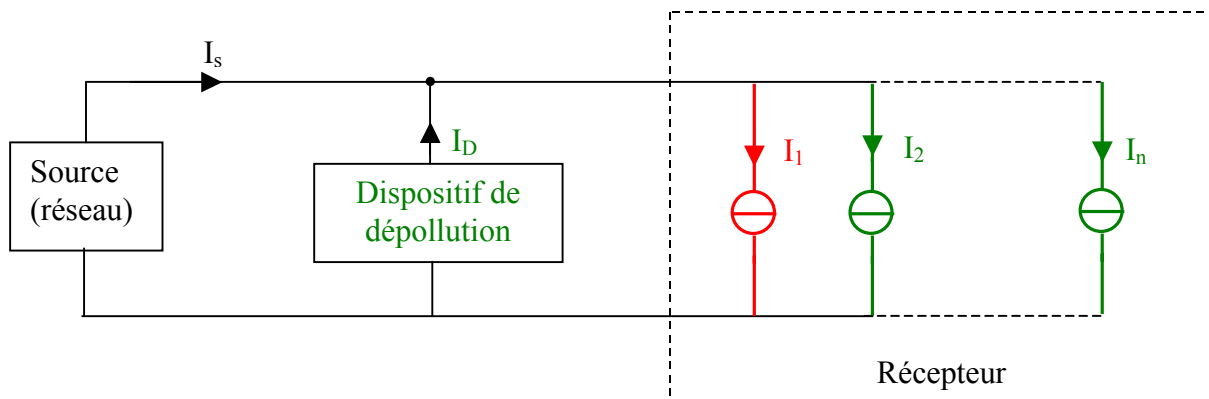
$$THD_F = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \text{ par rapport au fondamental (harmonique de rang 1)}$$

Le facteur de puissance $Fp = \frac{P}{S} = \frac{V.I_1.\cos\varphi}{V.I} = \frac{I_1}{I}.\cos\varphi$, on vérifie alors que si le courant se réduit au fondamental alors $\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = 0$ (pas d'harmonique) et $Fp = \cos\varphi$.

La puissance déformante est nulle et les puissances véhiculées sont actives et réactives.

Seul le courant I_1 est utile, les autres sont néfastes. On peut donc espérer optimiser le transfert de puissance en éliminant les autres courants à l'aide de dispositifs appropriés.

En effet :



On peut écrire $I_s = I_1 + I_2 + \dots + I_n - I_D$. Si on réalise la condition $I_D = \sum_{n=2}^{+\infty} I_n$ alors le courant réseau se confond avec I_1 (le fondamental). En pratique on se borne pour les filtres passifs aux premiers rangs harmoniques.

Les filtres actifs permettent un traitement de l'ensemble des harmoniques.(une autre histoire....)

1.3.4 Application numérique : $\hat{I} = 10 \text{ A}$; $q = 6$; $V = 230 \text{ Volts}$ et $\varphi = 0$.

$P = 483 \text{ W}$; $Q = 0 \text{ V.A.R}$; $S = 690 \text{ V.A}$ et $D = 493 \text{ V.A.D}$ (Volt.Ampère.Déformant)
on vérifie $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$.

$\text{THD}_R = 23.8 \%$ et $\text{THD}_F = 101.2 \%$ et le facteur de puissance $F_p = 0.7$

1.3.5 Filtrage passif : On désire éliminer l'harmonique de rang 3, il convient donc de proposer à cette composante une impédance nulle. Cette condition est réalisée grâce à une association L-C dont la résonance se situe à $3.f$ (f fréquence du réseau).

$$3f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ en fixant une valeur pour L on en déduit la valeur de C.}$$

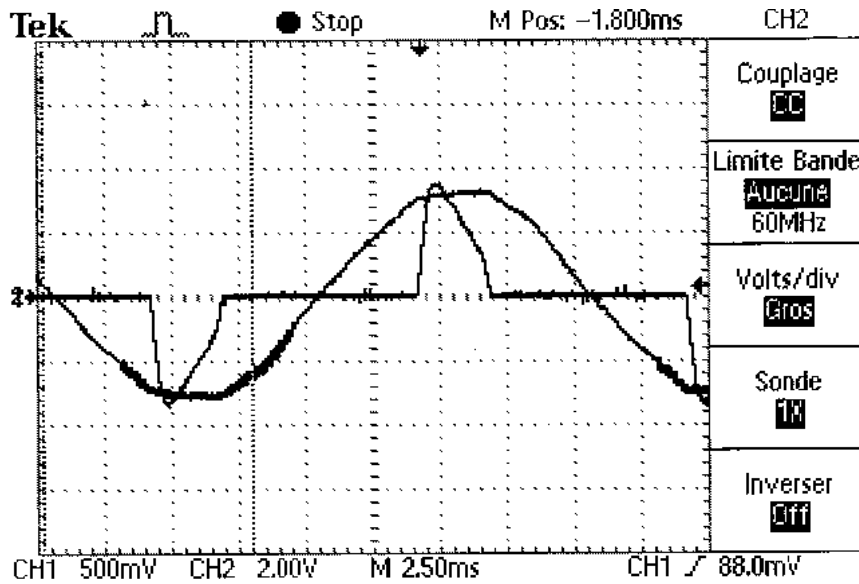
Exemple de couple de valeurs : $L = 46 \text{ mH}$ alors $C = 24.47 \mu\text{F}$.

2.1 Mesure avec le variateur de vitesse : On règle $I = 3 \text{ A}$ en appliquant un couple résistant au moteur (frein à poudre).

Remarque : Les mesures ont été réalisées avec une sonde d'isolement de rapport 1/100. La sonde de courant a un taux de conversion de 100mV.A^{-1} .

Les résultats diffèrent un peu selon les conditions au moment des essais. (Exemple la tension du réseau) . Néanmoins les interprétations demeurent.

Oscillogrammes de Vr et Ir : (Sans self)



Analyse harmonique :

rang	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Valeur efficace (%)	100	83	56	30	17	15	16.8	10.8	5.4
Valeur efficace (A)	2.08	1.74	1.2	0.6	0.36	0.32	0.35	0.23	0.11

$$\text{THD}_F = 112 \% \text{ et } F_p = 0.69$$

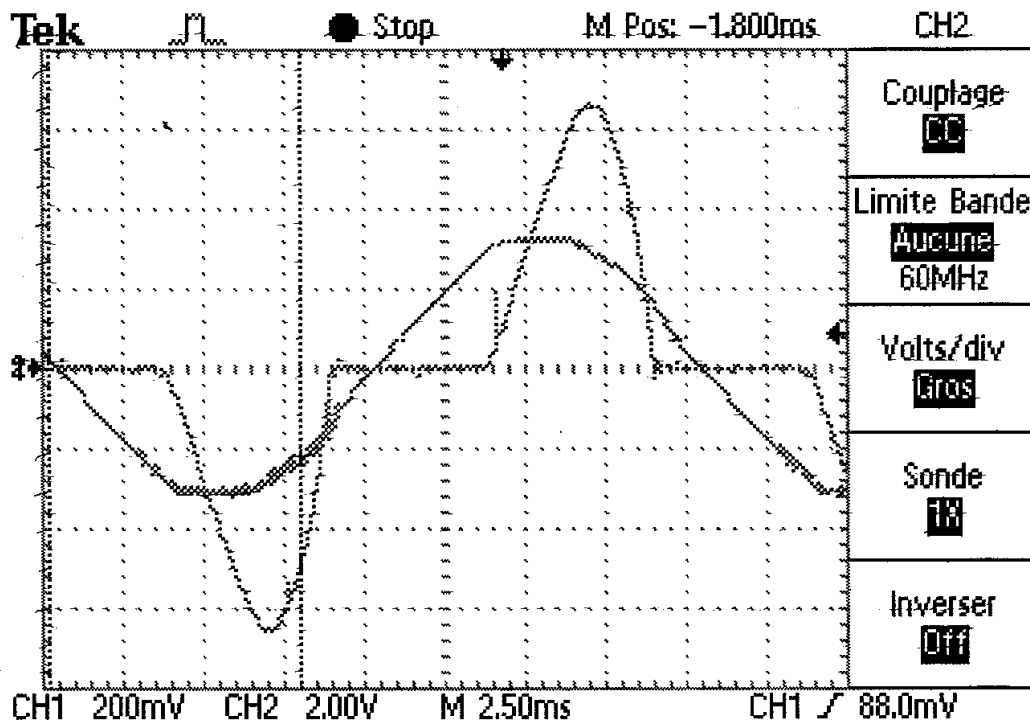
Il y a cohérence entre ces résultats et l'étude préliminaire.

A noter la présence d'une petite composante 3 (6.8 Volts) dans la tension du réseau, le rang 1 étant à 230 Volts.

Par ailleurs les différences sont générées par l'approximation de $i(t)$ à un terme « cosinusoidal ». l'angle de conduction est d'environ $(\pi/4)$ et $\hat{I} = 9 \text{ A}$.

2.2 Mesure avec adjonction de la self L_1 en série avec le récepteur.

Oscillogramme V_r et I_r :



La self joue son rôle de lissage de l'intensité et de filtre . $\hat{I} = 6.8 \text{ A}$ au lieu de 9 A .

Analyse harmonique :

Rang	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Valeur efficace	2.14	1.3	0.38	0.17	0.08	0.04	0.03	0.02	0.01

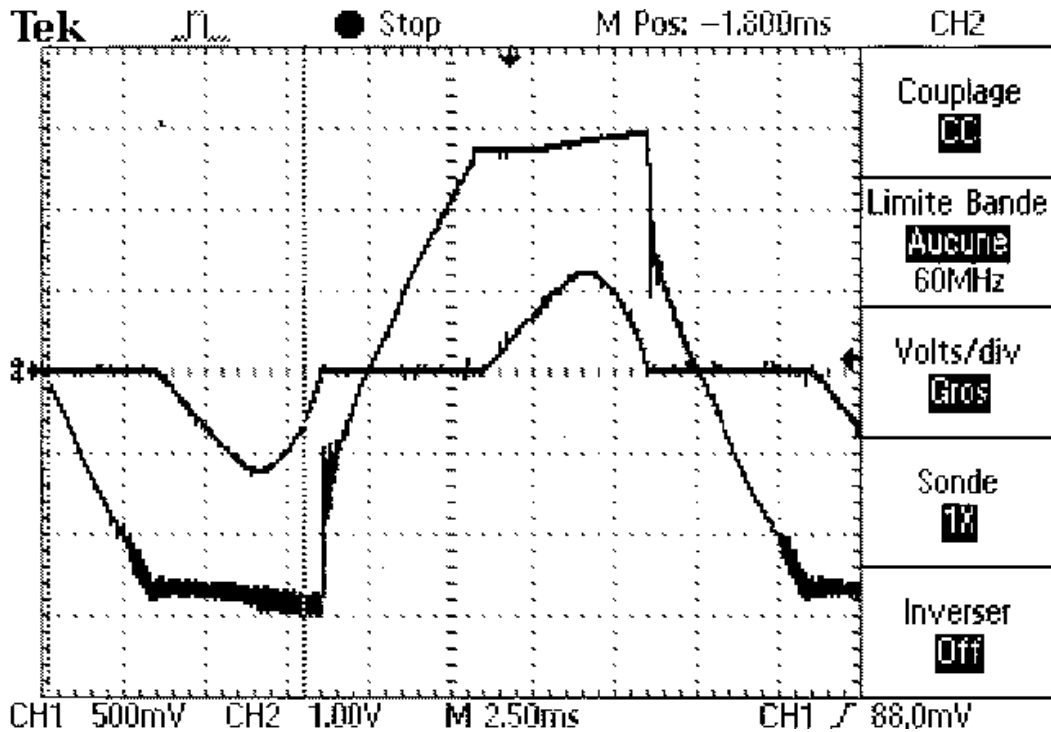
On remarque une action manifeste au rang supérieur à 3. En effet l'impédance de la self croît avec la fréquence ($L.W$) , d'où une diminution des courants.

Le courant efficace $I = 2.54 \text{ A}$. On vérifie que les 17 premiers rangs sont les plus significatifs.

$THD_F = 64 \%$ a diminué.

On mesure bien les effets escomptés de l'adjonction en série de L , diminution du courant efficace et donc des échauffements, mais cela reste bien insuffisant.

Oscillogrammes du courant et de la tension à l'entrée du variateur :

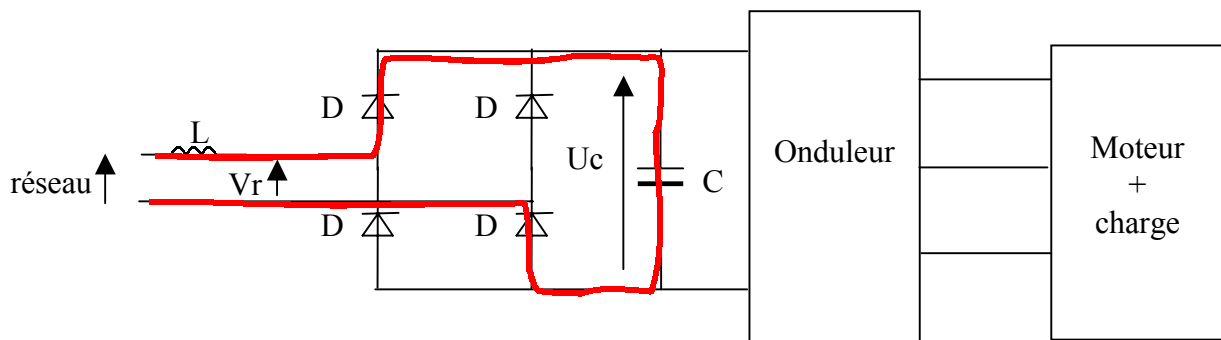


Analyse harmonique de la tension :

Rang	1	3	5	7	9	11	13	15	17
Valeur	217.8	24.8	16.7	8.35	8.2	4.6	4.37	3.7	3.5

THD = 15 %.

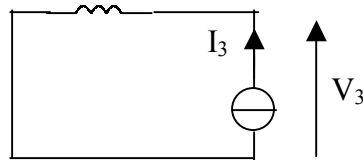
La tension aux bornes du variateur n'est plus sinusoïdale. Afin de justifier l'allure de la tension d'entrée du variateur, il faut se référer à la structure interne de ce type de convertisseur. Sur l'intervalle $i(t) \neq 0$ la circulation de i est surlignée en rouge.



Pendant les phases de conduction des diodes $V_r = U_c$ et on observe donc la charge du condensateur C . Ailleurs la tension V_r est confondue avec la tension du réseau.

Détermination de la valeur de L :

Schéma au rang 3 en supposant que le réseau est purement sinusoïdal, seul le fondamental existe.



$$3.L.\omega.I_3 = V_3 \text{ d'où } L = \frac{24.8}{300.\pi.1.3} = 20 \text{ mH environ.}$$

Le constructeur annonce 15 mH pour L . Source principale d'erreur dans notre cas :

négligence de l'harmonique de rang 3 présente au réseau de valeur efficace 6.8 Volts.

En tenant compte du rang 3 on aboutit à $L = 14.7$ mH.

De toute manière la résistance R de la bobine est inconnue et perturbe donc la détermination de L aux harmoniques de rang faible. Il convient donc de déterminer L pour des fréquences supérieures au fondamental afin de s'affranchir de la valeur de R .