

Analyse harmonique du courant absorbé par un pont triphasé à thyristors

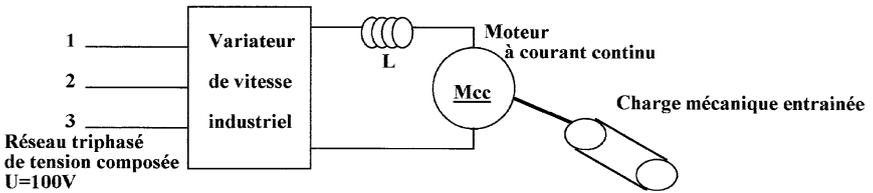
par Patrick BRUNET
LEGT Henri Brisson - 18103 Vierzon Cedex

Ce texte fait suite à l'article «Utilisation d'un analyseur de spectre associé à un système d'acquisition» publié dans le bulletin de novembre.

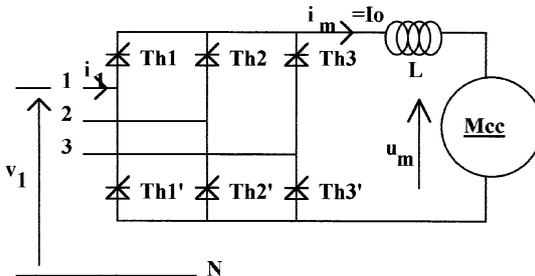
RÉSUMÉ

Le but de cet article est de montrer l'intérêt de l'analyse harmonique en **régime non sinusoïdal de courant** lorsque la source de tension, elle, reste sinusoïdale. On rappellera les différentes puissances utilisées en électronique de puissance.

1. MONTAGE UTILISÉ



1.1. Schéma de principe



Le réseau triphasé d'alimentation est réalisé à partir du réseau EDF dont la tension est abaissée avec un autotransformateur pour permettre l'alimentation du moteur. La tension composée (mesurée entre deux fils de phase) U vaut 100 V.

Le moteur Mcc entraîne une charge mécanique telle que le courant moyen qu'il absorbe est de 10 A. L'inductance L , appelée inductance de lissage du courant, permet de limiter l'ondulation de ce courant i_m . Si sa valeur est suffisante, i_m peut être considéré comme quasiment constant.

Le contrôle de la vitesse du moteur se fait en réglant le retard à l'amorçage des thyristors du pont de Graëtz. On fait varier ainsi la valeur moyenne de la tension appliquée au moteur u_m , donc sa vitesse.

On enregistre simultanément une image de la tension simple v_1 et un image du courant de ligne i_1 . L'acquisition des données est faite avec la carte PCMES2 gérée par le logiciel PHYSCOPE qui permet de faire tous les traitements. Les niveaux d'entrée doivent être compris entre -5 V et $+5$ V pour ne pas endommager le convertisseur d'entrée de la carte. On utilisera un transformateur abaisseur de tension pour la mesure de v_1 et un capteur de courant à effet Hall pour celle du courant i_1 (ce type de capteur permet une isolation galvanique entre la tension de mesure qu'il fournit et le courant à mesurer).

1.2. Formes des ondes de courant et de tension

On trouvera sur la figure 1 les oscillogrammes des tensions images de v_1 et i_1 .

A0 est la tension image de v_1 et A1 celle de i_1 .

Le gain du capteur de tension est $G_v = 4.53E-2$: l'amplitude de la tension est de 3.7 V et correspond à une amplitude réelle de $(100 * \sqrt{2})/\sqrt{3}$ V.

Le gain du capteur de courant est $G_i = 0.4$ V/A : 4 V correspondent au courant approximativement constant i_m de 10 A absorbé par le moteur.

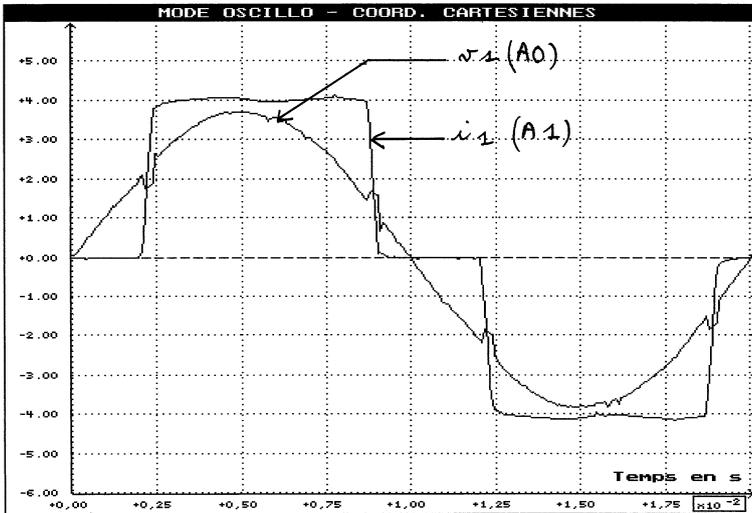
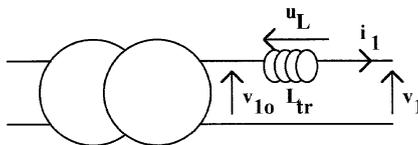


Figure 1

1.3. Analyse qualitative des ondes de courant et de tension

L'onde de courant peut, en première approximation, être approximée par deux créneaux. Sur la première alternance de la tension v_1 , la conduction de TH1 permet le passage du créneau positif de courant. On a alors $i_1 = i_m$ et l'on constate effectivement que le courant est à peu près constant durant cette période. C'est la conduction de TH1' qui assure le créneau négatif sur l'alternance négative de v_1 .

L'examen de la figure 1 met en évidence la déformation de la tension v_1 d'alimentation à chaque fois que des variations brutales du courant i_1 se produisent. Ce phénomène est dû à l'inductance de fuite du transformateur d'alimentation : L_{tr} . On peut modéliser le transformateur suivant le schéma ci-dessous en négligeant la résistance des fils :



v_{10} représente la tension non déformée délivrée au secondaire du transformateur. On alors $v_1 = v_{10} - u_L$. Lorsque le courant i_1 est quasi constant $u_L = L_{tr} di_1/dt$ est nul et $v_1 = v_{10}$. Lors de la mise en conduction ou de l'extinction des thyristors T_{H1} et $T_{H'1}$, la présence de L_{tr} va limiter la croissance ou la décroissance de i_1 . Ainsi lors de la mise en conduction de T_{H1} sur la première alternance de v_1 , $v_1 = v_{10} - L_{tr} di_1/dt$ avec $di_1/dt > 0$. Finalement $v_1 < v_{10}$ ce qui est confirmé par l'examen de la figure 1.

2. ANALYSE HARMONIQUE DU COURANT

2.1. Choix de la durée d'enregistrement égale à une période

On remarquera sur la figure 1 que l'on a choisi une durée d'enregistrement T_0 égale à une période de la tension ou du courant (20 ms). Pour ce faire, il est nécessaire d'ajuster la période d'échantillonnage T_e à 78 μs si l'on fait une acquisition sur 256 points (valeur égale à une puissance de 2 justifiée par une mise en œuvre d'algorithme FFT).

La figure 2 donne le spectre en amplitude du signal du courant. La séparation entre les deux raies est $1/T_0$ (où T_0 représente la durée de l'acquisition) soit 50 Hz. On y remarque :

- la présence du fondamental à 50 Hz,
- l'absence des harmoniques de rang pair (symétrie 1/2 onde du signal étudié),
- l'absence d'harmoniques de rang multiple de 3,
- les premiers harmoniques notables : rang 5, 7, 11.

2.2. Choix d'un enregistrement de durée quelconque

La figure 3 donne un enregistrement du courant et de la tension avec une période d'échantillonnage de 100 μs .

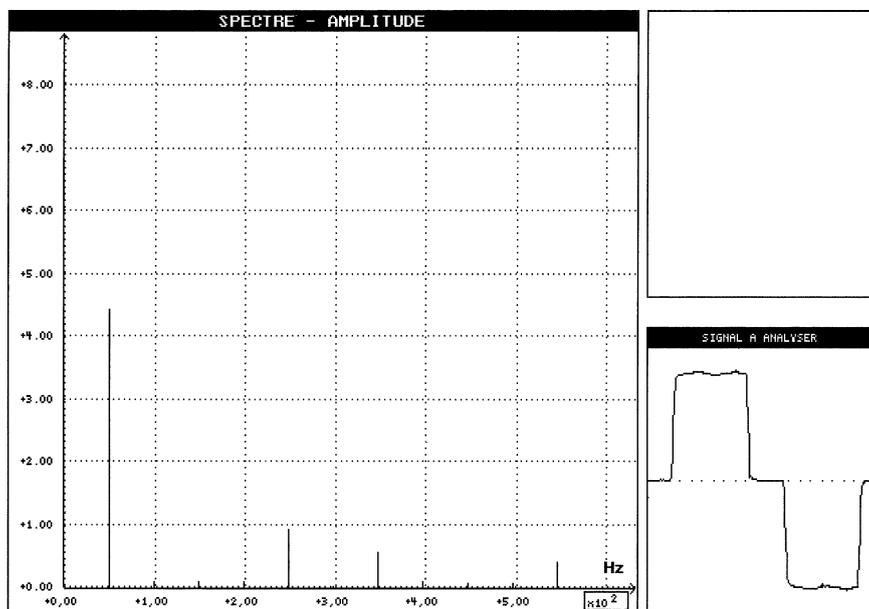


Figure 2

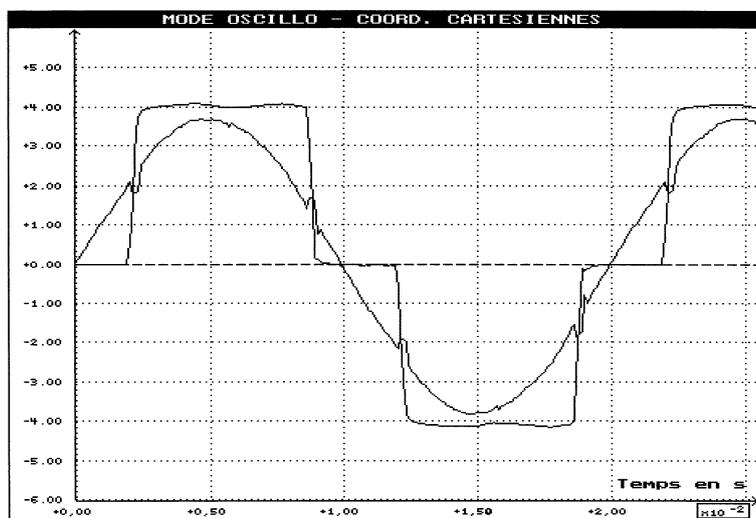


Figure 3

La figure 4 donne le spectre en amplitude de ce signal. La séparation entre deux raies est devenue $1/T_0 = 39,2$ Hz. Il est devenu inexploitable puisque les raies du signal aux fréquences multiples de 50 Hz n'y figurent plus.

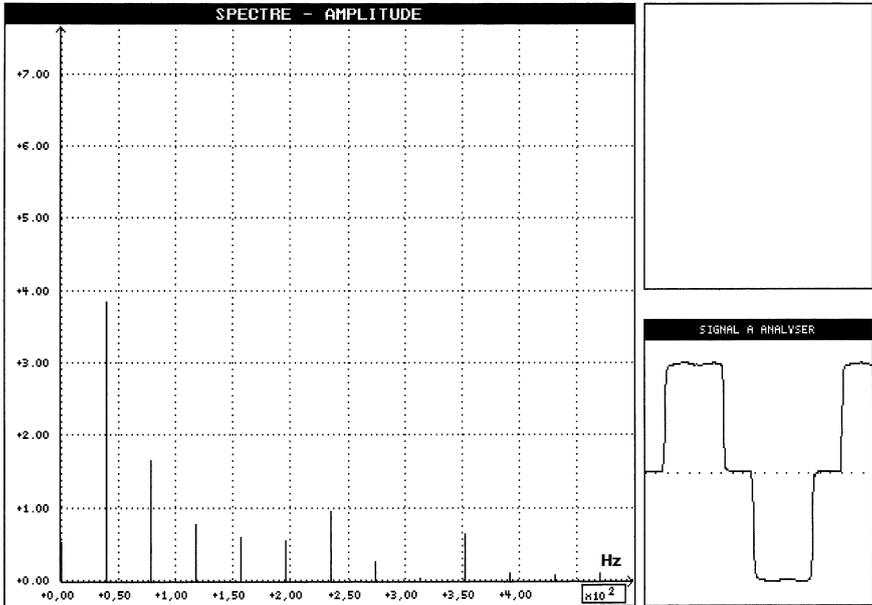


Figure 4

La figure 5 permet d'expliquer le phénomène. Le fait de faire une acquisition du signal de durée limitée à T_0 élargit les raies réelles (voir article sur l'utilisation d'un analyseur de spectre - B.U.P. n° 768).

2.3. Extraction du fondamental du signal image du courant

La page de calcul de la figure 6 propose une méthode pour cela (voir article sur l'utilisation d'un analyseur de spectre - B.U.P. n° 768). V_{fond} représente le fondamental du signal image de la tension et I_{fond} le fondamental du signal image du courant. On se reportera à la figure 7 pour la visualisation de V_{fond} et de I_{fond} . Dans la suite, on confondra la tension avec son fondamental V_{fond} .

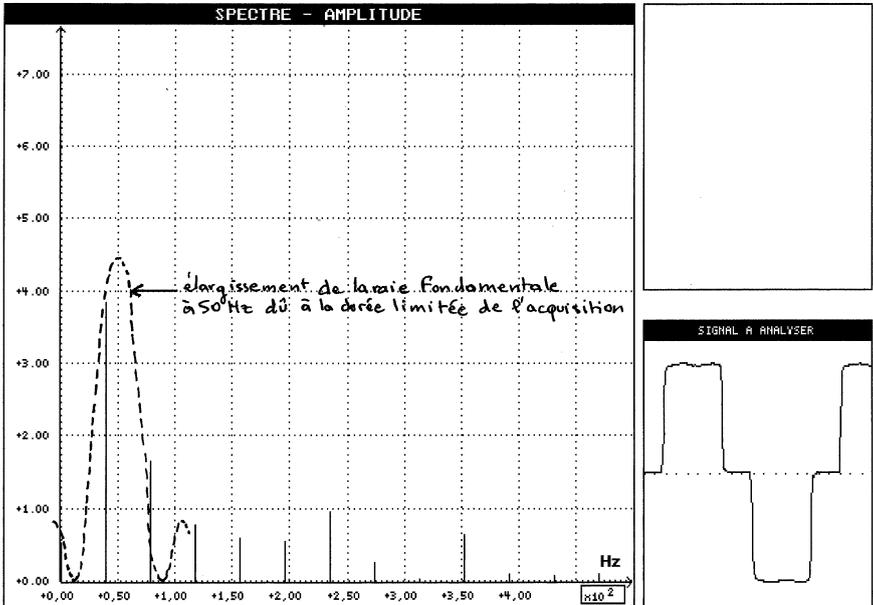


Figure 5

FEUILLE DE CALCUL :

```

Gv=4.53E-2                                --> 0.0453
Gi=0.4                                       --> 0.4
V=A0                                          --> Table[256]
I=A1                                          --> Table[256]

c=creneau(3,255)                            --> Table[256]
c_1=1-c                                      --> Table[256]

R_v=fftr(V)                                  --> Table[256]
I_v=iffti(V)                                 --> Table[256]
R_i=fftr(I)                                  --> Table[256]
I_i=iffti(I)                                 --> Table[256]
fond_R_v=R_v*c_                             --> Table[256]
fond_I_v=I_v*c_                             --> Table[256]
fond_R_i=R_i*c_                             --> Table[256]
fond_I_i=I_i*c_                             --> Table[256]
Vfond=rfft(fond_R_v,fond_I_v)               --> Table[256]
Ifond=rfft(fond_R_i,fond_I_i)               --> Table[256]
    
```

Figure 6

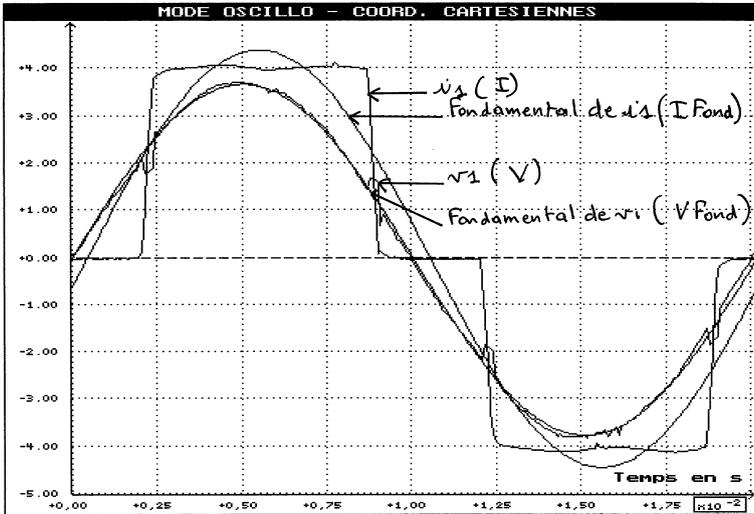


Figure 7

3. PUISSANCES EN RÉGIME NON SINUSOÏDAL DE COURANT

On suppose ici la tension sinusoïdale. On définira les puissances sur une phase. Pour obtenir la puissance totale fournie par l'alimentation, il suffirait de multiplier par 3. On appellera V et I (figure 8) les tableaux représentant les valeurs de la tension et du courant réels, c'est-à-dire que l'on fera intervenir ici les gains des capteurs ($V = A0/Gv$, $I = A1/Gi$).

3.1. Puissance moyenne ou puissance active

Elle se définit comme la valeur moyenne de la puissance instantanée : $P_{moy} = moy(V * I)$. On peut aussi calculer la puissance moyenne transportée par le fondamental du courant soit : $P_{fond_moy} = moy(I_{fond} * V)$. La figure 8 montre que les deux résultats sont sensiblement égaux ce qui illustre le fait *qu'en régime non linéaire de courant, la puissance est transportée par le fondamental de ce courant.*

3.2. Puissance apparente

Quel que soit le régime de tension (sinusoïdal ou non), elle se définit comme le produit des valeurs efficaces de la tension et du courant soit $S = V_{eff} * I_{eff}$. On remarquera qu'il ne s'agit pas ici *du*

fondamental mais du courant réel. Le facteur de puissance du montage se définit par $k = P/S$. Il vaut dans notre cas 0.95 (voir figure 8).

FEUILLE DE CALCUL :

```

Gv=4.53E-2 --> 0.0453
Gi=0.4 --> 0.4
V=A0/Gv --> Table[256]
I=A1/Gi --> Table[256]
c=creneau(3,255) --> Table[256]
c_=1-c --> Table[256]

R_v=fftr(V) --> Table[256]
I_v=ffti(V) --> Table[256]
R_i=fftr(I) --> Table[256]
I_i=ffti(I) --> Table[256]
fond_R_v=R_v*c --> Table[256]
fond_I_v=I_v*c --> Table[256]
fond_R_i=R_i*c --> Table[256]
fond_I_i=I_i*c --> Table[256]
Vfond=ffft(fond_R_v,fond_I_v) --> Table[256]
Ifond=rfft(fond_R_i,fond_I_i) --> Table[256]

Pmoy=moy(V*I) --> 449.8899
Veff=eff(V) --> 58.1388
Ieff=eff(I) --> 8.1233
S=Veff*Ieff --> 472.2781

k=Pmoy/S --> 0.9526

P_fond_moy=moy(Ifond*V) --> 448.7087
Ieff_fond=eff(Ifond) --> 7.8159

P1_fond_moy=Veff*Ieff_fond*cos(8.5/180*pi) --> 449.4176
Qfond=Veff*Ieff_fond*sin(8.5/180*pi) --> 67.1659
D=sqrt(S*S-P_fond_moy*P_fond_moy-Qfond*Qfond) --> 131.1331

H_harm_i=fftm(I) --> Table[256]
S_2h=2.3021^2+1.3890^2+0.9849^2+0.6447^2 --> 8.6147
D1=Veff*sqrt(S_2h)/sqrt(2) --> 120.6619

```

Figure 8

3.3. Puissance réactive

Nous supposons toujours que la tension est purement sinusoïdale. La puissance réactive se définit simplement en **régime sinusoïdal de courant**. C'est pourquoi, on la définit sur le fondamental du courant réel (voir article de J.-P. CARON «*pour une définition plus générale de la puissance réactive en régime non sinusoïdal*» : B.U.P. n° 701 de février 1988).

La tension V et le courant I_{fond} constituent un système sinusoïdal. On sait alors que la puissance active transportée par ce système se calcule par $P_{1_moy_fond} = V_{\text{eff}} * I_{\text{eff_fond}} * \cos(\Phi_f)$, où Φ_f est la différence de phase $\Phi_f = (\text{Ifond}, V)$ de la tension V par rapport au courant fondamental I_{fond} peut être mesurée graphiquement sur la figure 7 ou bien à partir du tableau des composantes de Fourier. On trouve $\Phi_f = 8.5^\circ$. Le calcul de la puissance active par cette méthode est conforme aux précédents.

La puissance réactive se calcule par :

$$Q_{\text{fond}} = V_{\text{eff}} * I_{\text{eff_fond}} * \sin(\Phi_{\text{fond}}, V).$$

$Q_{\text{fond}} = 67 \text{ VAR}$ (Volt-Ampère Réactif).

3.4. Puissance déformante

Il est facile de vérifier que l'on n'a pas égalité entre S^2 et $P_{\text{moy}}^2 + Q_{\text{fond}}^2$, relation qui serait vérifiée en régime sinusoïdal de tension et de courant. En effet :

$$\begin{aligned} P_{\text{moy}}^2 + Q_{\text{fond}}^2 &= V_{\text{eff}}^2 * I_{\text{eff_fond}}^2 (\cos^2 \Phi_f + \sin^2 \Phi_f) \\ &= V_{\text{eff}}^2 * I_{\text{eff_fond}}^2 \end{aligned}$$

Ce résultat ne se confond avec S^2 que dans le cas où il y a identité en I_{eff} et $I_{\text{eff_fond}}$, donc quand le courant se confond avec son fondamental, c'est-à-dire lorsqu'il est sinusoïdal.

En régime non sinusoïdal de courant, on écrit :

$$S^2 = P_{\text{moy}}^2 + Q_{\text{fond}}^2 + D^2.$$

Le terme supplémentaire D traduit la déformation du courant réel par rapport à un courant purement sinusoïdal. D est appelée puissance déformante. On trouve sur la figure 8 $D = 131 \text{ VAD}$ (Volt-Ampère Déformant).

$$\begin{aligned} D^2 &= S^2 - (P_{\text{moy}}^2 + Q_{\text{fond}}^2) \\ &= V_{\text{eff}}^2 * I_{\text{eff}}^2 - V_{\text{eff}}^2 * I_{\text{eff_fond}}^2 = V_{\text{eff}}^2 (I_{\text{eff}}^2 - I_{\text{eff_fond}}^2). \end{aligned}$$

Par ailleurs, on montre que $I_{\text{eff}}^2 = \sum_1^{\infty} (I_{\text{eff_m}}^2)$ où $I_{\text{eff_m}}$ représente la valeur efficace de l'harmonique de rang m . Il est alors clair que *la puissance déformante est due aux harmoniques du courant de rang supérieur à 1.*

La figure 8 montre un calcul de D : D_1 , à partir de cette relation en calculant la somme des carrés des valeurs efficaces sur les quatre premiers harmoniques significatifs soit 5, 7, 11 et 13... La différence entre les résultats $D = 131$ et $D_1 = 120$ peut être expliquée par l'influence des harmoniques supérieurs à 13.