

Générateur de signaux quasi-sinusoïdaux

Optimisation du taux de distorsion harmonique à l'aide d'une analyse spectrale

par Jean-Philippe MULLER
Lycée Louis Armand - 60100 Mulhouse

1. PRINCIPE

La majorité des générateurs de signaux basse-fréquence en service dans nos laboratoires produisent la forme sinusoïdale par déformation d'un signal triangulaire à l'aide d'un conformateur à diodes ou mieux grâce à une paire différentielle.

Le principe de ces techniques a été décrit dans deux intéressants articles de notre collègue J. CANDAU parus dans le B.U.P. en novembre et décembre 1993 et intitulés «Approximation sinusoïdale par conformateur à diodes» et «Approximation sinusoïdale par paire différentielle».

Le montage proposé utilise une paire différentielle à résistances d'émetteur pour déformer le signal triangulaire issu d'un générateur de signaux triangulaires à amplificateur opérationnel.

La non-linéarité introduite par la paire différentielle modifie le spectre du signal triangulaire. On pourra donc optimiser les réglages à l'aide de l'analyseur de spectre en minimisant l'amplitude des harmoniques 2, 3, 4 ...et obtenir une sinusoïde de bonne qualité (distorsion typique de l'ordre de 2 % à 3 %) sur une grande plage de fréquence.

Cette maquette permet de mettre en évidence l'intérêt de l'analyse spectrale et peut être utile en travaux pratiques dans les sections de Génie électrique et électronique, mais également en classe préparatoire aux grandes écoles où l'analyse spectrale d'un signal produit par un générateur quasi-sinusoïdal figure explicitement au programme.

2. ÉTUDE THÉORIQUE DE LA PAIRE DIFFÉRENTIELLE

Le schéma de principe est donné en figure 1 :

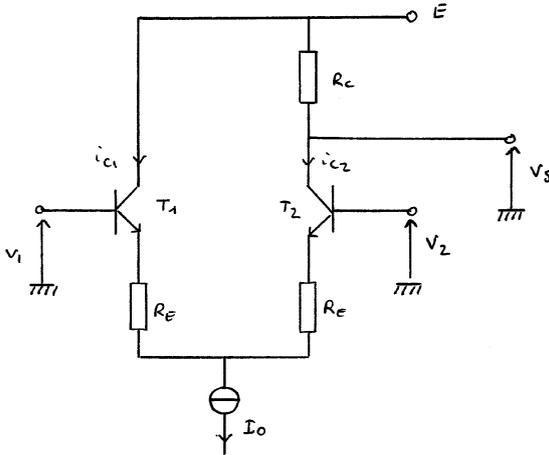


Figure 1 : Principe de la paire différentielle.

On supposera les deux transistors identiques et à la même température. Le courant collecteur est alors donné par la relation :

$$i_c = i_s \cdot \exp(q \cdot V_{be}/kT)$$

avec : $kT/q = V_o = 26 \text{ mV}$ à 27 degrés

On aura alors :

$$i_{c1} = I_s \cdot \exp(V_{be1}/V_o) \quad \text{et} \quad i_{c2} = I_s \cdot \exp(V_{be2}/V_o)$$

d'où : $i_{c1}/i_{c2} = \exp\left(\frac{(V_{be1} - V_{be2})}{V_o}\right)$

et, si on pose : $V_{be1} - V_{be2} = z$

$$i_{c1}/i_{c2} = \exp(z/V_o)$$

D'autre part, la loi des nœuds au niveau des émetteurs nous donne :

$$i_{c1} + i_{c2} = I_o$$

De ces deux dernières équations, nous pouvons tirer i_{c_1} et i_{c_2} en fonction de z :

$$i_{c_1} = I_0 / \left(1 + \exp(-z/V_0) \right) \quad \text{et} \quad i_{c_2} = I_0 / \left(1 + \exp(z/V_0) \right)$$

Relions maintenant $z = V_{be_1} - V_{be_2}$ à la tension différentielle d'entrée $V_1 - V_2$ en écrivant la loi de maille au niveau des jonctions base-émetteur des deux transistors :

$$V_1 - V_{be_1} - R_e \cdot i_{c_1} + R_e \cdot i_{c_2} + V_{be_2} - V_2 = 0$$

soit :
$$V_1 - V_2 = V_{be_1} - V_{be_2} + R_e \cdot (i_{c_1} - i_{c_2})$$

Si nous remplaçons i_{c_1} et i_{c_2} par leurs expressions en fonction de z et si on appelle x la tension différentielle d'entrée, on trouve finalement :

$$x = z + R_e \cdot I_0 \cdot \left(\exp(z/V_0) - 1 \right) / \left(\exp(z/V_0) + 1 \right)$$

alors que la tension de sortie $V_s = y$ s'écrit :

$$y = E - R_c \cdot i_{c_2} = E - R_c \cdot I_0 / \left(1 + \exp(z/V_0) \right)$$

Application numérique

$$R_e = 33 \, \Omega, \quad R_c = 4,7 \, \text{k}\Omega, \quad V_0 = 0,026 \, \text{V}, \quad E = 15 \, \text{V}, \quad I_0 = 2,52 \, \text{mA}$$

$$\begin{cases} x = z + 0,0832 \cdot \left(\exp(z/0,026) - 1 \right) / \left(\exp(z/0,026) + 1 \right) \\ y = 15 - 11,85 / \left(1 + \exp(z/0,026) \right) \end{cases}$$

avec : $x = V_1 - V_2$ tension différentielle d'entrée

$y = V_s$ tension de sortie

$z = V_{be_1} - V_{be_2}$

Pour différentes valeurs de z comprises entre -150 mV et $+150$ mV, on peut calculer les valeurs de x et y et en déduire l'allure de la caractéristique de transfert de la paire différentielle $y = f(x)$.

La figure 2 représente le relevé expérimental de cette caractéristique de transfert $y = f(x)$ sur laquelle nous avons fait figurer quelques points calculés à l'aide des équations précédentes.

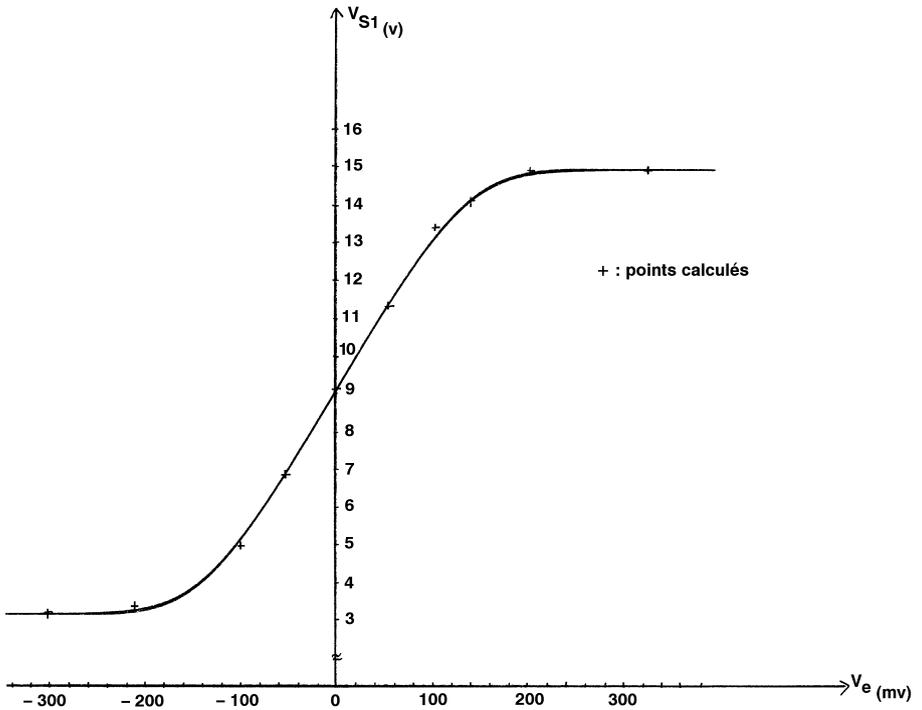


Figure 2 : Caractéristique de transfert de la paire différentielle.

On constate que la courbe relevée est très proche des valeurs calculées.

La caractéristique de transfert de la paire différentielle présente une non-linéarité en S symétrique par rapport au point d'abscisse $x = 0$.

Si nous appliquons un signal $x(t)$ triangulaire, cette non-linéarité va arrondir les pointes du triangle et nous donner un signal $y(t)$ assez voisin d'une sinusoïde.

3. STRUCTURE DE LA MAQUETTE

Cette maquette didactique comporte les éléments suivants :

- un générateur de triangle de fréquence et d'amplitude réglable,
- un étage à paire différentielle pour la transformation triangle-sinus,

– un étage adaptateur d'impédance et de niveau pour attaquer l'analyseur de spectre.

Le schéma complet est donné figure 3.

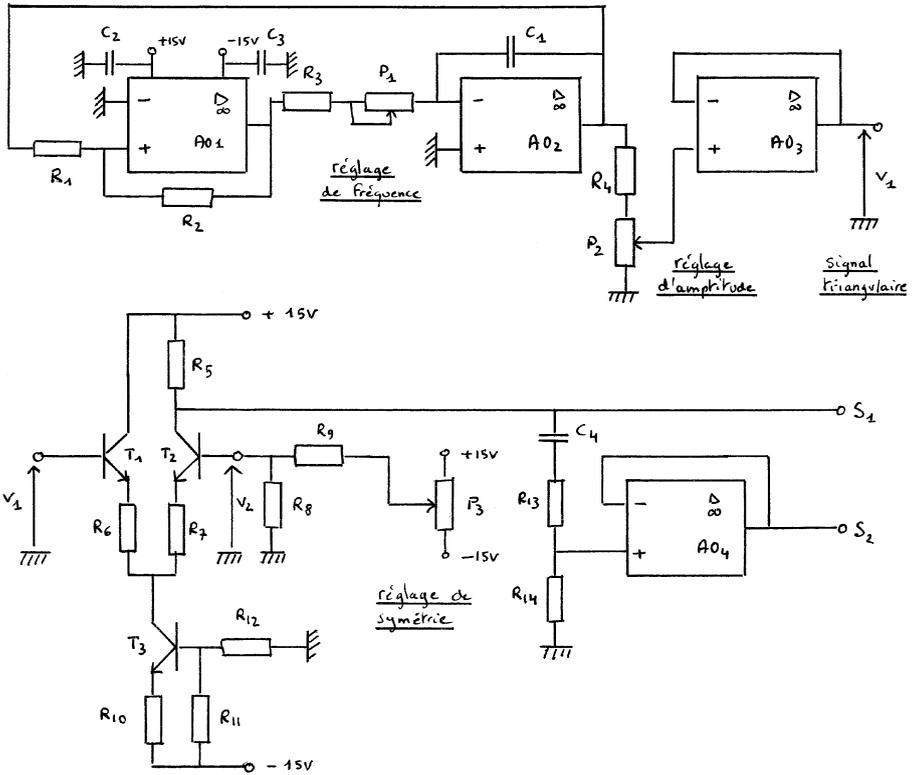


Figure 3 : Schéma complet de la maquette.

Valeurs des composants

$R_1 = R_5 = 4,7 \text{ k}$	$R_2 = 22 \text{ k}$	$R_3 = 470 \text{ } \Omega$
$R_4 = R_9 = 47 \text{ k}$	$R_6 = R_7 = 33 \text{ } \Omega$	$R_8 = 100 \text{ } \Omega$
$R_{10} = 2,7 \text{ k}$	$R_{11} = R_{12} = 10 \text{ k}$	$R_{13} = R_{14} = 100 \text{ k}$
$P_1 = P_2 = P_3 = 50 \text{ k}$	$C_1 = C_2 = C_3 = 100 \text{ nF}$	$C_4 = 1 \text{ } \mu\text{F}$
$T_1 = T_2 = \text{SSM2210}$	$T_3 = 2\text{N4401}$	$\text{Aop} = \text{TL084}$

L'amplificateur AO_1 est monté en trigger inverseur dont les seuils de basculement sont :

$$V_a = V_{\text{sat}} \cdot R_1/R_2 = 14,4,7/22 = 3 \text{ V} \quad \text{et} \quad V_b = -V_a = -3 \text{ V}$$

Lorsque AO_1 est en butée haute, AO_2 monté en intégrateur inverseur intègre la tension $+V_{\text{sat}}$. La tension en sortie de AO_2 décroît donc linéairement selon l'équation :

$$v(t) = \frac{-V_{\text{sat}} \cdot t}{(R_3 + P_1) C_1} + v(0)$$

Dès que cette tension atteint -3 V , AO_1 bascule à $-V_{\text{sat}}$ et la tension en sortie de AO_2 croît linéairement.

L'excursion totale vaut $2 \cdot V_a = 6 \text{ V}$, et cet intervalle est balayé durant une demi-période $T/2$, ce qui nous permet de calculer facilement la fréquence d'oscillation :

$$2 \cdot V_a = \frac{V_{\text{sat}} \cdot T/2}{(R_3 + P_1) C_1}$$

d'où : $T = 4 \cdot R_1 \cdot (R_3 + P_1) \cdot C_1/R_2$

et enfin : $F = \frac{R_2}{4 R_1 C_1 (R_3 + P_1)}$

Application numérique

P_1 au minimum $F_{\text{max}} = 24,9 \text{ kHz}$

P_1 au maximum $F_{\text{min}} = 234 \text{ Hz}$

Le potentiomètre P_1 permet donc de régler la fréquence du triangle, dans le but de vérifier que la paire différentielle permet de transformer un triangle en sinusoïde sur une large plage de fréquences.

Le potentiomètre P_2 nous permet évidemment de faire varier l'amplitude du signal triangulaire entre 0 et 1,5 V crête.

En ce qui concerne la paire différentielle, P_3 , R_8 et R_9 fournissent une tension V_2 pouvant varier entre -32 mV et $+32$ mV pour pouvoir compenser une éventuelle dissymétrie au niveau des deux transistors. Une action sur le potentiomètre P_3 décale latéralement la caractéristique de transfert et rend donc possible un ajustage de sa symétrie.

Le transistor T_3 est monté en source de courant. Sa base est à un potentiel de $-7,5$ V, ce qui nous donne $6,8$ V aux bornes de R_{10} , et donc un courant de collecteur I_0 de $2,52$ mA.

La sortie de la paire différentielle se fait en S_1 .

Après coupure de la composante continue par C_4 et division par deux de l'amplitude, le signal quasi-sinusoïdal est disponible en S_2 avec une amplitude inférieure à 5 V crête et donc compatible avec le niveau d'entrée maximal de l'analyseur de spectre que nous utilisons.

4. OPTIMISATION DE LA MISE EN FORME À L'OSCILLOSCOPE

Une fois que la fréquence de travail est choisie à l'aide de P_1 , si on veut avoir en sortie du montage (points S_1 ou S_2) un signal le plus proche possible d'une sinusoïde, on peut agir sur deux réglages :

- P_2 qui définit l'amplitude du signal triangulaire, ce qui fixe la partie utile de la non-linéarité,
- P_3 qui règle V_2 et donc la symétrie de la caractéristique.

Les quatre oscillogrammes ci-après (figures 4 à 7) montrent l'évolution de la forme du signal quasi-sinusoïdal en fonction des réglages de P_1 , P_2 et P_3 .

On constate que l'amplitude idéale pour le signal triangulaire est de 400 mV crête-crête.

Dans ce cas, la déformation du triangle n'est pas suffisante, et les crêtes de la sinusoïde sont trop pointues.

Au contraire, si l'amplitude du triangle est excessive, les crêtes de la sinusoïde sont trop arrondies, comme le montre l'oscillogramme de la figure 5.

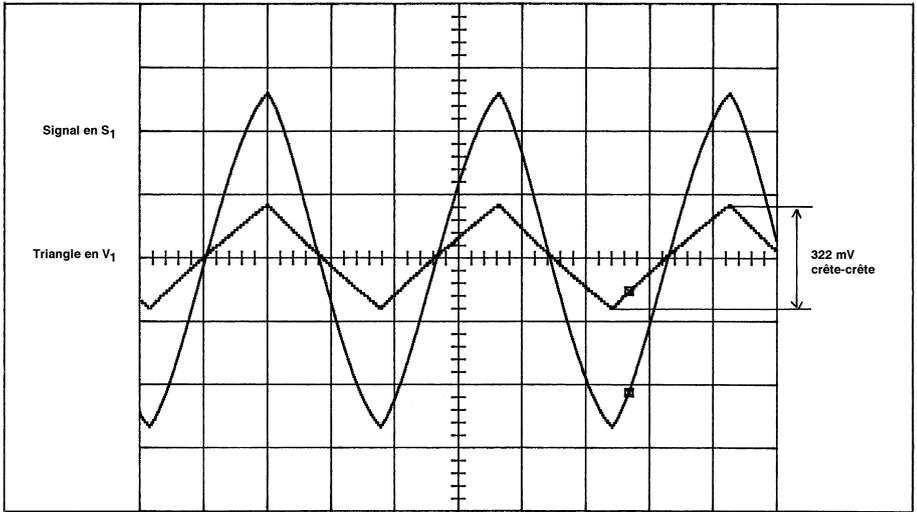


Figure 4 : Amplitude du triangle trop faible.

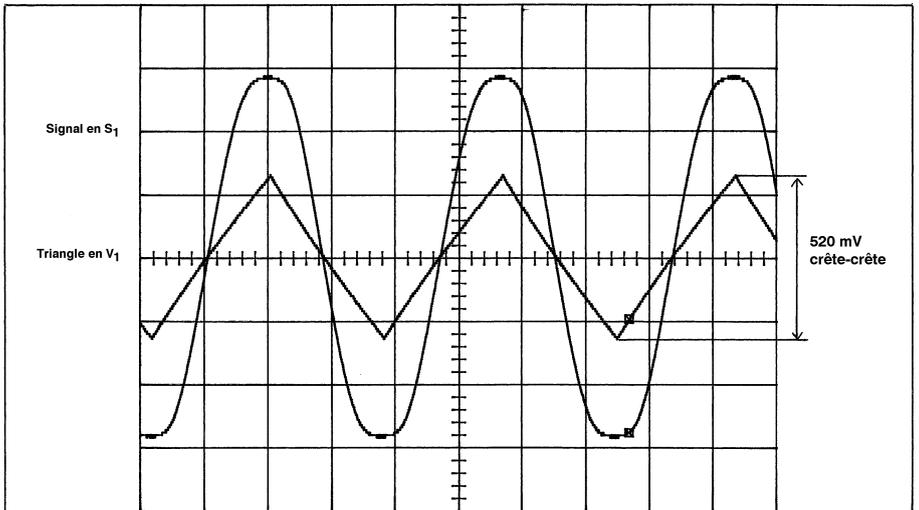


Figure 5 : Amplitude du triangle trop élevée.

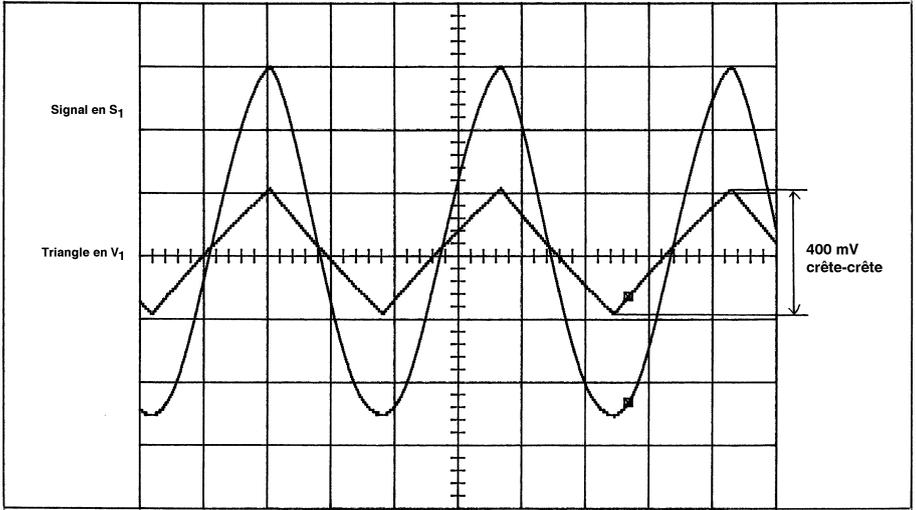


Figure 6 : Amplitude correcte, symétrie mal réglée.

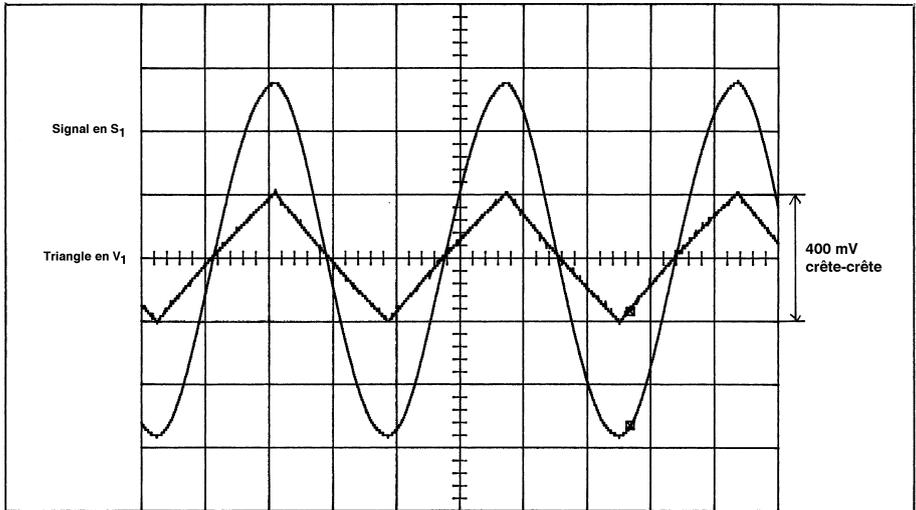


Figure 7 : Réglages d'amplitude et de symétrie corrects.

Bien que la forme du signal soit celle d'une sinusoïde, il est difficile à l'oscilloscope d'évaluer plus précisément la qualité de cette mise en forme.

Nous allons donc affiner l'évaluation de ce dispositif en utilisant l'outil très puissant de l'analyse spectrale.

On peut pour cela utiliser n'importe quel analyseur de spectre basse-fréquence, ou une carte d'acquisition pour PC et un logiciel de transformée de Fourier discrète.

Nous utilisons pour notre part une maquette didactique fabriquée par Techno-Assistance dont le principe et un exemple de réalisation ont été décrits dans le B.U.P. n° 752 (mars 1993).

Cet analyseur de spectre qui fonctionne comme un filtre sélectif accordable nous permettra d'analyser le signal en sortie de l'étage de mise en forme, mais aussi de visualiser à l'oscilloscope un harmonique de rang donné et de suivre son évolution en fonction des réglages.

5. OPTIMISATION PAR ANALYSE SPECTRALE DU SIGNAL QUASI-SINUSOÏDAL

Si la caractéristique de transfert non-linéaire est parfaitement symétrique, le spectre du signal en sortie ne comportera que des harmoniques impairs.

Le réglage de décalage agira donc sur l'amplitude des harmoniques pairs, alors que le réglage de l'amplitude du triangle aura une influence sur les harmoniques impairs.

Ceci est bien vérifié à l'analyseur de spectre et l'optimisation des deux réglages beaucoup plus facile et agréable qu'avec un oscilloscope.

Les courbes représentées en figure 8 et 9 montrent l'évolution de ces harmoniques en fonction des réglages.

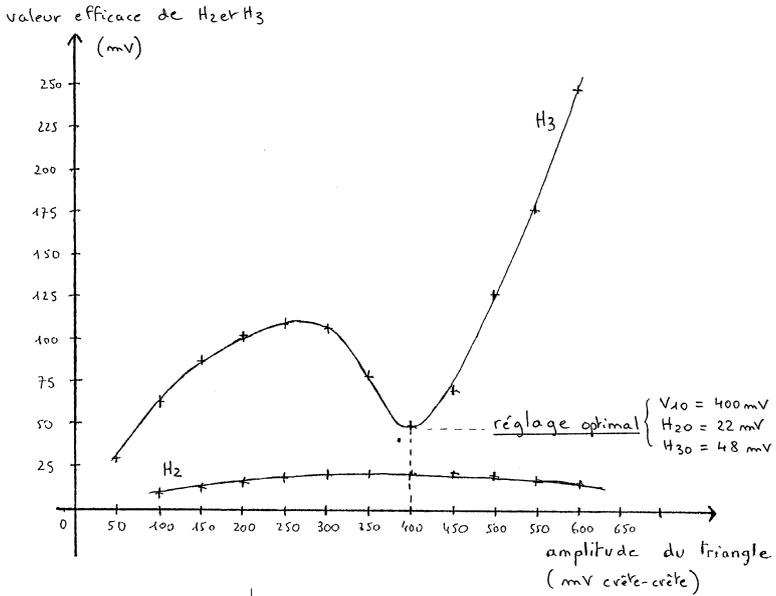


Figure 8 : Influence du réglage de l'amplitude (P₂) sur les harmoniques 2 et 3.

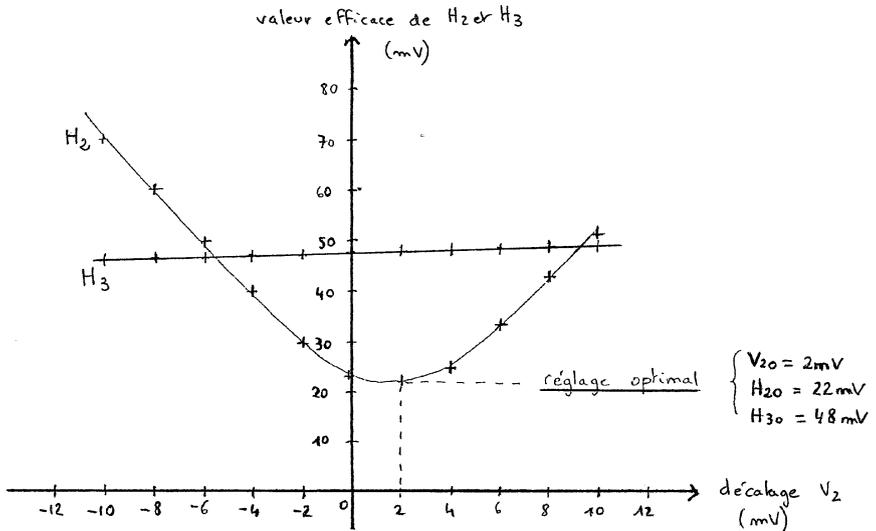


Figure 9 : Influence du réglage de symétrie (P₃) sur les harmoniques 2 et 3.

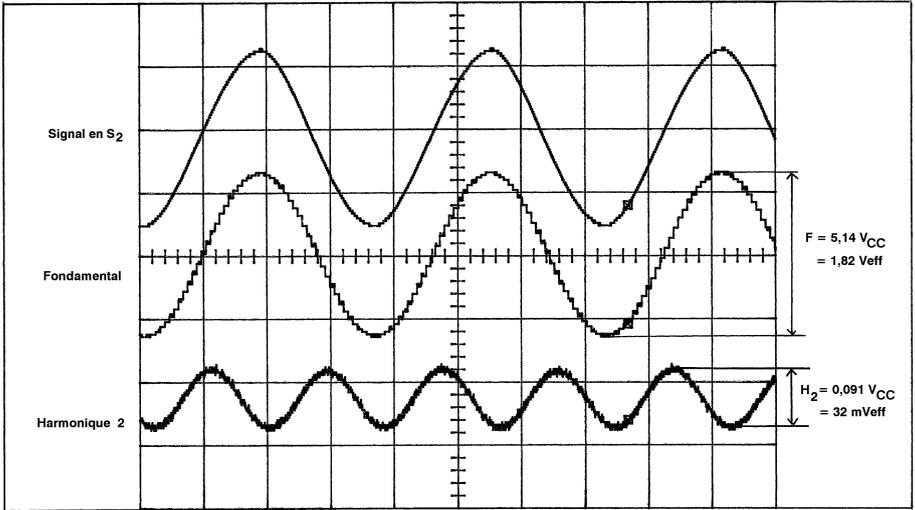


Figure 10 : Fondamental et harmonique 2 du signal quasi-sinusoidal.

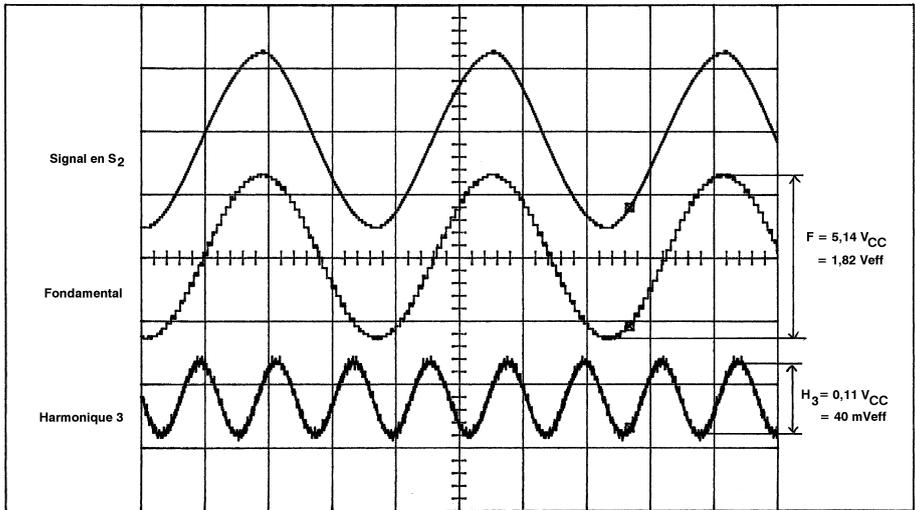


Figure 11 : Fondamental et harmonique 3 du signal quasi-sinusoidal.

Ces deux courbes peuvent être relevées très facilement en utilisant l'analyseur de spectre en filtre sélectif calé successivement sur l'harmonique 3 puis sur l'harmonique 2.

Les oscillogrammes de la figure 10 et 11 mettent en évidence les harmoniques 2 et 3 lorsque les réglages ont été optimisés.

On peut évidemment aussi relever à la table traçante le spectre du signal quasi-sinusoïdal, ce qui donne les résultats suivants.

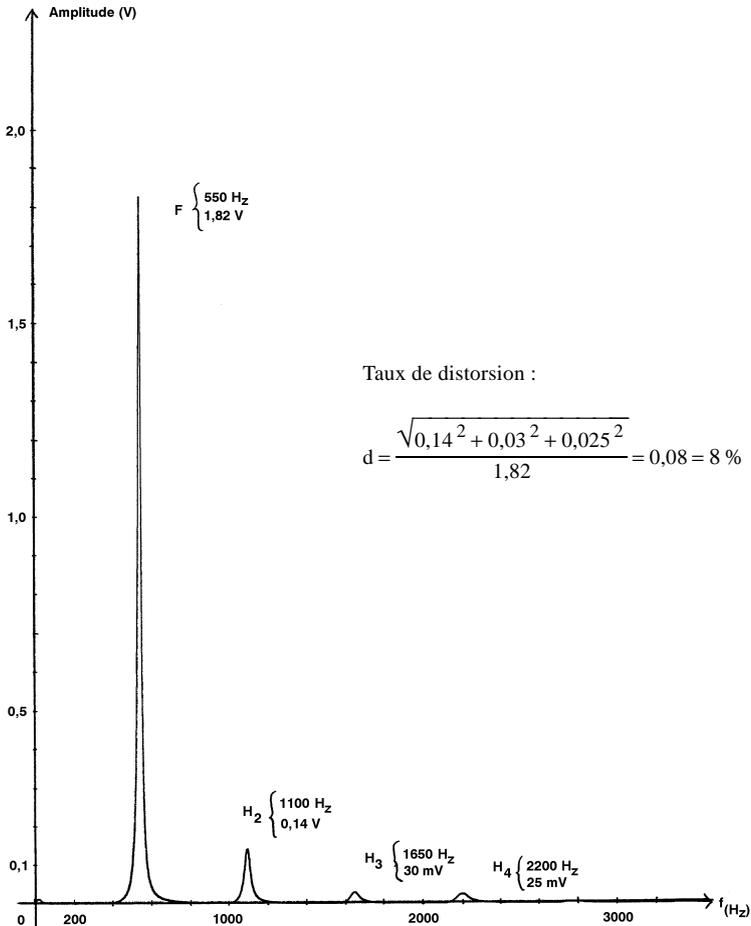


Figure 12 : Spectre du signal lorsque la symétrie est mal réglée (oscillogramme figure 6).

Lorsque la maquette est réglée au mieux, le spectre contient un peu d'harmonique 3 et une proportion plus faible d'harmonique 2.

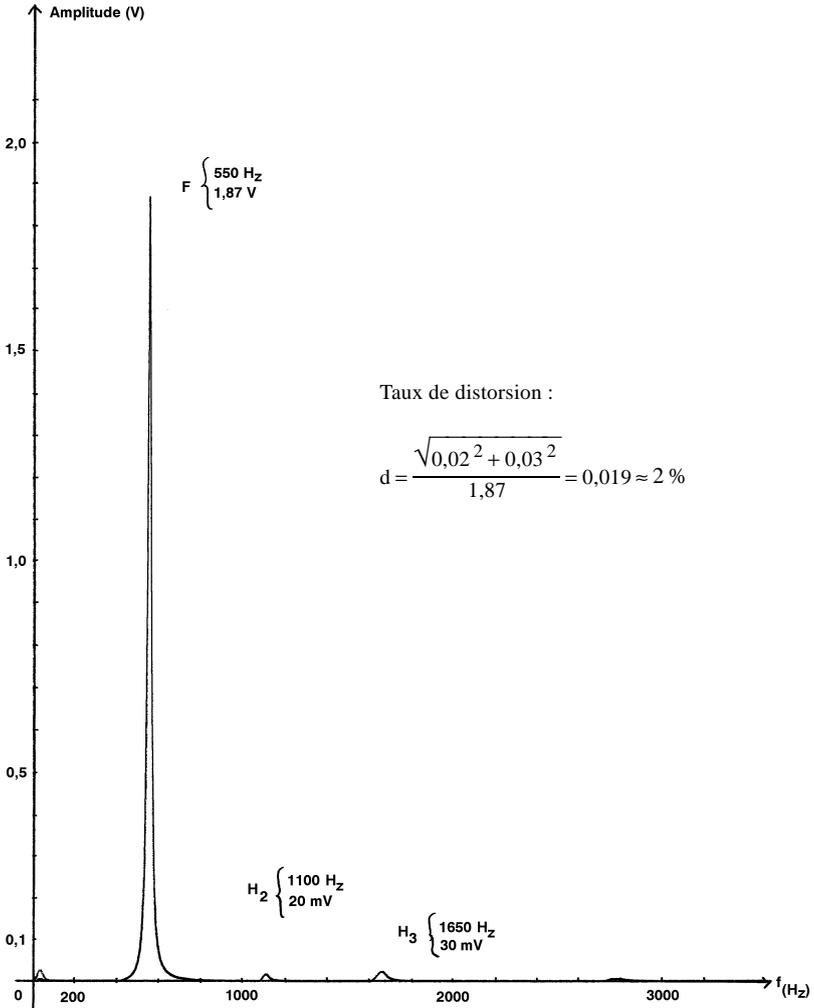


Figure 13 : Spectre du signal quasi-sinusoïdal optimal.

Le taux de distorsion obtenu est tout à fait comparable au taux de distorsion habituel des générateurs basse-fréquence qui se trouvent dans nos laboratoires.

6. CONCLUSION

Ce montage est intéressant parce qu'il permet de montrer à nos étudiants une application dans laquelle l'utilisation de l'analyseur de spectre est pratiquement indispensable.

L'analyse spectrale du signal quasi-sinusoïdal aboutit ici très concrètement à l'optimisation du réglage de l'étage de mise en forme, en agissant séparément sur les harmoniques pairs et impairs.

Les collègues intéressés trouveront en figure 14 le dessin du typon de la maquette et en figure 15 le plan d'implantation. Par rapport au schéma de la figure 3, nous avons simplement rajouté deux condensateurs électrochimiques de découplage de l'alimentation ainsi que deux diodes électroluminescentes indiquant la présence des deux tensions d'alimentation.

Enfin, les collègues désireux de se procurer la maquette montée et prête à l'emploi peuvent l'acquérir chez :

TECHNO-ASSISTANCE - 1 rue du Capitaine Pilleux - 68720 ZILLISHEIM -
Fax : 89.06.42.84.

pour un montant de 280 F TTC .

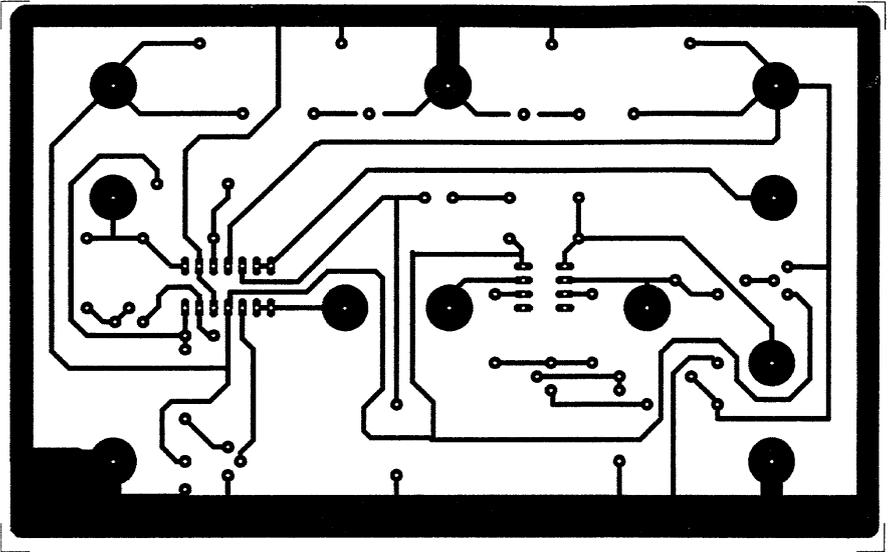


Figure 14 : Typon de la maquette.

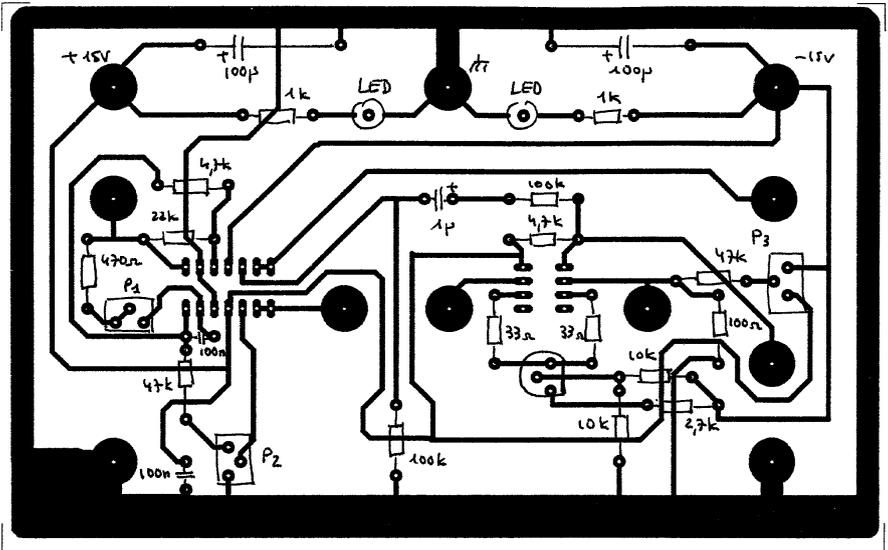


Figure 15 : Plan d'implantation des composants.