

# Mise en œuvre du circuit intégré SAB 0600 dans des expériences d'analyse et de synthèse des sons *Carillon électronique à trois tons*

par René ALLARD  
Lycée Bergson - 49036 Angers Cedex

---

Le circuit intégré SAB 0600 (Siemens) permet, avec quelques composants périphériques, de générer un son musical constitué de trois notes successives riches en harmoniques, tel un carillon.

Avec ce circuit intégré on peut réaliser une maquette simple, utilisable en T.P. par les élèves de Seconde, qui pourra être mise en œuvre dans des expériences d'acoustique variées. On peut envisager les activités suivantes :

1. **Enregistrement des signaux** correspondant aux trois notes, à l'aide d'un ordinateur. Il permettra de déterminer les fréquences des trois notes et de vérifier que les relations entre ces fréquences sont identiques à celles données par le fabricant.

2. **Analyse spectrale des signaux** correspondant aux trois notes, à l'aide d'un logiciel. Elle va permettre de déterminer la fréquence et l'amplitude des harmoniques présents dans chacune des trois notes, et d'identifier les composantes de chaque note :

- la première note est un signal carré de fréquence  $N_1^0$ ,
- la deuxième note est un «mélange» de deux signaux carrés de fréquences  $N_1^0$  et  $N_2^0$ ,
- la troisième note est un «mélange» de trois signaux carrés de fréquences  $N_1^0$ ,  $N_2^0$  et  $N_3^0$ .

3. **Synthèse mathématique des signaux** délivrés par le SAB 0600. Elle est réalisable, à l'aide d'un logiciel, car l'amplitude et la fréquence des composantes de ces signaux sont maintenant connues ; mais il faudra trouver les décalages temporels entre ces composantes pour

vérifier que l'addition de ces composantes redonne bien les signaux générés par le circuit intégré.

4. **Comparaison des signaux** délivrés par le circuit intégré et des signaux sonores captés par un microphone.

## 1. SCHÉMA DU CIRCUIT ÉLECTRONIQUE

### 1.1. Caractéristiques du C.I. SAB 0600

- Tension d'alimentation : 7 à 11 V,
- Courant de repos : 10  $\mu$ A,
- Courant en fonctionnement hors charge : 10 mA,
- Puissance délivrée (troisième note) sous  $Z = 8 \Omega$  : 0,160 W,
- Tension de déclenchement sur broche 1 : 1,5 V minimum.

### 1.2. Structure interne du SAB 0600 (figure 1)

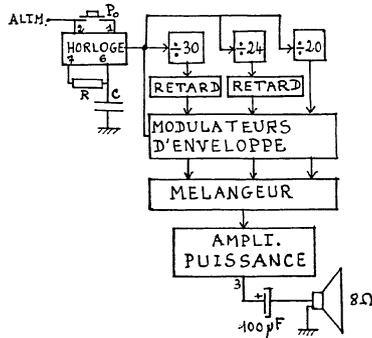


Figure 1

Le circuit intégré comprend :

- un circuit d'horloge qui génère une tension  $u_0$  dont la fréquence  $N_0$  dépend de deux composants externes (R) et (C),
- des diviseurs de fréquence qui délivrent 3 signaux de base,  $u_1$ ,  $u_2$  et  $u_3$ , de fréquences respectives  $N_1^0 = N_0/20$ ,  $N_2^0 = N_0/24$  et  $N_3^0 = N_0/30$ , à partir du signal d'horloge,
- deux circuits «retard» qui font subir aux signaux  $u_2$  et  $u_3$  un décalage temporel par rapport au signal  $u_1$ ,



## 2. ACQUISITION DE DONNÉES ET EXPLOITATION DES RÉSULTATS

**L'acquisition** et la mémorisation des valeurs des tensions générées par le SAB 0600 ont été réalisées à l'aide de l'interface ESAO 3 commandée par le logiciel LABO (Langage et Informatique). Avant de procéder à l'acquisition proprement dite il faut régler les paramètres d'acquisition ; ainsi on doit indiquer, entre autres, le nombre de mesures  $N_b$  à effectuer, l'intervalle de temps  $\Delta t$  entre deux mesures, le niveau de synchronisation qui est choisi égal à 0,1 V, et le nombre de voies (une).

Comme la valeur de  $\Delta t$  ne peut être inférieure à 50  $\mu s$ , la fréquence  $N_0$  du signal d'horloge du SAB 0600 sera réglée à sa valeur minimale, 6,82 kHz environ, dans toutes les expériences, pour avoir un nombre suffisant de mesures correspondant à une période du signal enregistré.

### Déroulement d'une expérience

La tension délivrée par le SAB 0600 sur la broche n° 3 est prélevée, entre  $S_2$  et la masse, aux bornes d'une charge qui ne perturbe pas la forme de cette tension, une résistance de 100  $\Omega$  (figure 2).

Comment procéder pour enregistrer, par exemple, un échantillon de la deuxième note ?

L'inverseur K étant en position (1), on exerce une pression fugitive sur le poussoir  $P_0$  pour activer le SAB 0600. Lorsque la première note émise par le H.P. se termine et que débute la note suivante, on bascule rapidement l'inverseur en position (2) et on frappe une touche du clavier pour déclencher l'acquisition d'une série de mesures.

### Exploitation des résultats

Elle comprend la détermination de la fréquence des signaux enregistrés et l'étude de leur spectre de fréquences qui peut être faite avec le logiciel LABO.

### La synthèse

La synthèse mathématique des signaux correspondant aux trois notes générées par le SAB 0600, réalisée à l'aide du logiciel MATH (Microlambda), a pour but d'illustrer le principe de l'élaboration d'un signal musical à partir de signaux carrés, technique mise en œuvre sur certains synthétiseurs de musique.

### 3. ENREGISTREMENT ET ANALYSE DES SIGNAUX DÉLIVRÉS PAR LE SAB 0600

#### 3.1. Le signal d'horloge (figure 3)

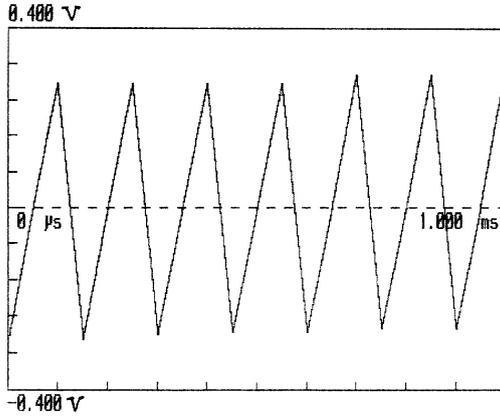


Figure 3

Nb = 1 005 mesures  $\Delta t = 500 \mu\text{s}$ .  
Fréquence du signal :  $N_0 = 6,82 \text{ kHz}$ .

#### 3.2. Les trois notes (figure 4)

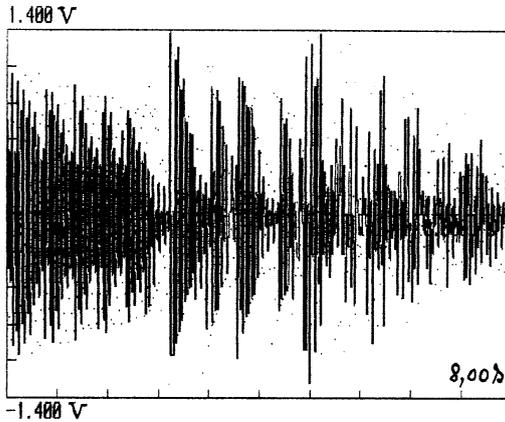


Figure 4 : Les trois notes du carillon.

Pour obtenir sur le même enregistrement les signaux correspondant aux trois notes émises successivement, il faut que la durée totale de l'acquisition de données soit de 8 s environ. Le nombre maximal de mesures que permet de faire le logiciel LABO étant  $N_b = 1\ 005$ , l'intervalle de temps entre deux mesures qui a été choisi est  $\Delta t = 8\ 000\ \mu\text{s}$ .

Sur l'enregistrement (figure 4), la variation de l'amplitude du signal met en évidence les trois notes ; le début de chaque note est caractérisé par une croissance rapide de l'amplitude des vibrations sonores, phénomène qui s'observe également avec les instruments à percussion. Chaque note s'atténue progressivement, et ce jusqu'à extinction complète pour la troisième note.

**Remarque :** Bien que le nombre de points de mesure par période soit insuffisant, mais le logiciel LABO ne permet d'effectuer que 1 000 mesures au plus, il se trouve que l'enregistrement (figure 4) nous donne une idée assez correcte de la façon dont varie **l'amplitude** des vibrations sonores ; cela est dû au fait que les notes sont obtenues à partir de signaux **carrés**. Il faut rappeler qu'en général, pour visualiser correctement un signal périodique, il faut au moins une vingtaine de points de mesure par période.

### 3.3. La première note (figure 5)

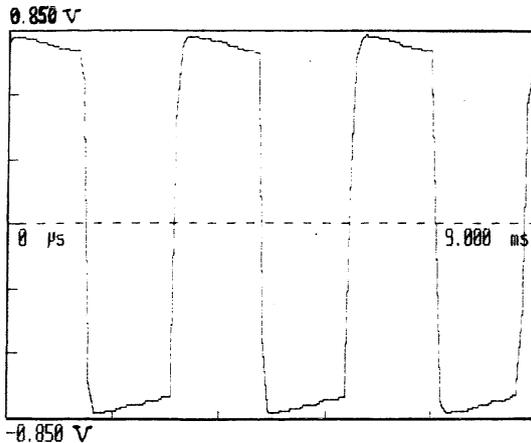


Figure 5 : La première note.

Nb = 100 mesures  $\Delta t = 92 \mu\text{s}$

Le signal, pratiquement rectangulaire, a une fréquence  $N_1 = 340,4 \text{ Hz}$  que l'on détermine sur l'enregistrement. On peut calculer la valeur «exacte» de  $N_1$  en appliquant la relation donnée par Siemens :  $N_1 = \frac{N_0}{20}$  soit  $N_1 = \frac{6820}{20} = 341 \text{ Hz}$ , valeur très proche de celle trouvée expérimentalement.

### 3.4. La deuxième note (figure 6)

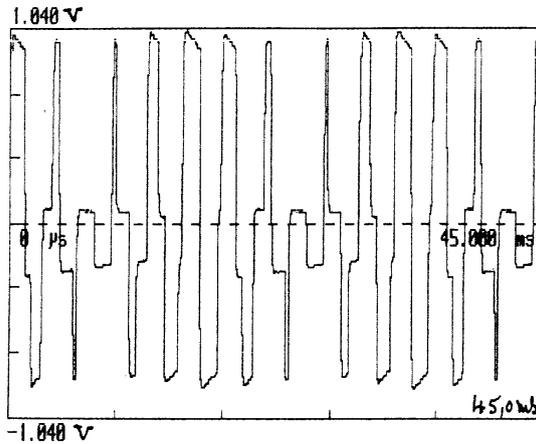


Figure 6 : La seconde note.

Nb = 750 mesures  $\Delta t = 70 \mu\text{s}$

Sur un intervalle de temps assez petit, le signal, de forme complexe, peut être considéré comme périodique de fréquence  $N_2 = 56,7 \text{ Hz}$ .

### 3.5. La troisième note (figure 7)

Nb = 900 mesures  $\Delta t = 50 \mu\text{s}$

Le signal de forme plus complexe que le précédent, est aussi pratiquement périodique sur un petit intervalle de temps ; sa fréquence, déterminée sur l'enregistrement, est  $N_3 = 56,2 \text{ Hz}$ , valeur très proche de  $N_2$ .

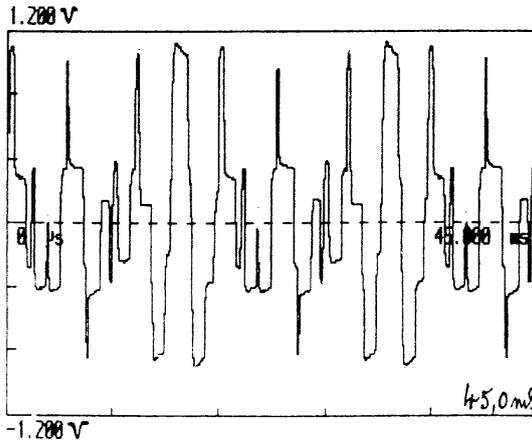


Figure 7 : La troisième note.

### 3.6. Égalité des fréquences $N_2$ et $N_3$ - Interprétation

Les diviseurs de fréquence qui se trouvent à l'intérieur du SAB 0600 délivrent des signaux de base, carrés, dont les fréquences sont  $N_1^0 = \frac{N_0}{20}$ ,  $N_2^0 = \frac{N_0}{24}$  et  $N_3^0 = \frac{N_0}{30}$ . La deuxième note est obtenue en ajoutant les deux signaux carrés de fréquences  $N_1^0$  et  $N_2^0$ . La période de cette note,  $T_2$  est donc le plus petit commun multiple des deux périodes  $T_1^0$  et  $T_2^0$  ;  $T_1^0 = 20 T_0$  ;  $T_2^0 = 24 T_0$ . Comme le P.P.C.M. des nombres 20 et 24 est 120, la valeur de  $T_2$  est donc  $T_2 = 120 T_0$  ; la fréquence  $N_2 = \frac{N_0}{120} = \frac{6820}{120} = 56,8 \text{ Hz}$ , valeur très proche de celle obtenue à partir de l'enregistrement.

La troisième note est obtenue en ajoutant des signaux carrés de fréquences  $N_1^0$ ,  $N_2^0$  et  $N_3^0$ . Comme le P.P.C.M. des nombres 20, 24 et 30 est aussi égal à 120, on a  $T_3 = T_2$ . L'écart relatif entre les valeurs expérimentales de  $N_3$  et  $N_2$  est de 0,9 %.

Les relations entre les fréquences  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$  ont donc été vérifiées avec une précision meilleure que 1 %.

#### 4. ANALYSE SPECTRALE DES SIGNAUX GÉNÉRÉS PAR LE SAB 0600

##### 4.1. Objectif

Obtenir les spectres de fréquences des trois notes, et montrer, en utilisant les informations contenues dans ces spectres, que les notes sont générées à partir de signaux carrés.

##### 4.2. Logiciel LABO

Il permet de faire l'analyse en fréquence d'un signal périodique par la méthode FFT (Fast Fourier Transform).

L'acquisition du signal doit être faite avec un nombre de mesures égal à une puissance de 2 (...64, 128, 256, ...) sinon le message «FFT impossible» apparaît ; avant de faire l'acquisition de données, les paramètres Nb et  $\Delta t$  doivent être choisis de manière à obtenir  $Nb \times \Delta t = T$ , T étant la période du signal que l'on veut analyser. Le calcul de l'amplitude des harmoniques du signal en fonction de leur fréquence se fait après avoir sélectionnée dans le menu «CALCUL» le sous-menu «FFT» et son sous-menu «DIRECTE» (figure 8).

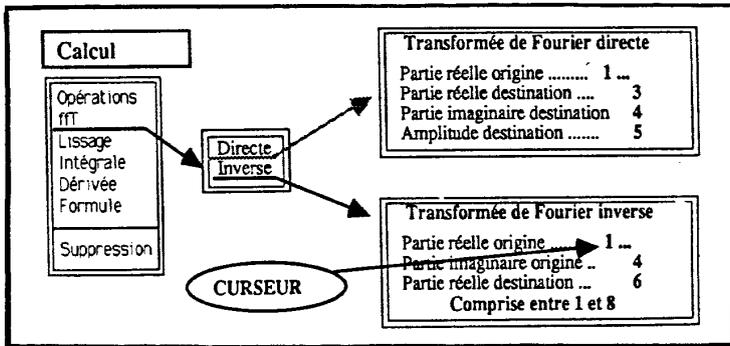


Figure 8

Dans la fenêtre «Transformée de Fourier directe» on sélectionne l'option «5».

Le tracé du spectre est obtenu après avoir activé le sous-menu «COURBES» du menu «DESSIN», et demandé la représentation d'une seule courbe, la courbe n° 5. Comme le spectre doit être présenté sous forme de segments verticaux il faut choisir le style «segment vertical» dans le sous-menu «COURBE» du menu «PARAMÈTRES».

Le spectre de fréquences apparaît alors sur l'écran de l'ordinateur. En fait, le calcul FFT donne un spectre symétrique, mais seule la première moitié est significative par rapport à la décomposition ; pour agrandir cette moitié de spectre il faut activer le sous-menu «2D» du menu «Dessin» et choisir convenablement la valeur maximale de X.

L'intervalle unitaire de fréquence, sur l'axe des X, correspond à un nombre de hertz égal à  $\frac{1}{Nb \times \Delta t} = \frac{1}{T}$ , T période du signal.

Les spectres de fréquences des signaux visualisés sur les figures 5, 6 et 7 sont représentés respectivement sur les figures 9, 10 et 11.

#### 4.3. Spectre de fréquences de la première note $N_1 = 340,4$ Hz (figure 9)

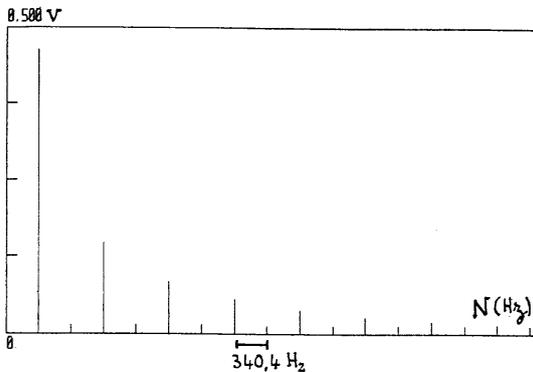


Figure 9 : Première note (340,4 Hz).

Il n'est formé que d'harmoniques impaires de fréquences  $N_1^0$  et  $3 N_1^0, \dots (2n + 1) N_1^0, \dots$  telles que  $N_1^0 = 340,4$  Hz.

En mesurant la longueur des segments verticaux on peut vérifier que l'amplitude des harmoniques décroît approximativement comme  $\frac{1}{2n + 1}$ . Ce spectre est caractéristique d'un signal carré.

#### 4.4. Spectre de fréquences de la seconde note $N_2 = 56,7$ Hz (figure 10)

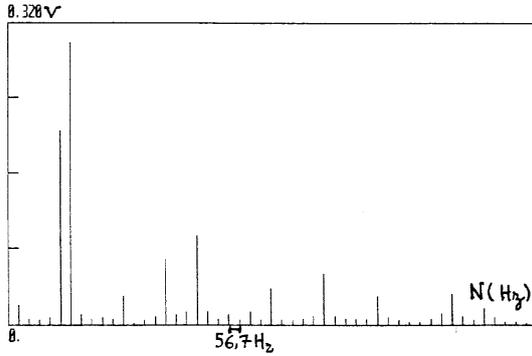


Figure 10 : Deuxième note (56,7 Hz).

Il est composé de deux séries d'harmoniques. La première série de fréquences  $N_1^0$  et  $3N_1^0, \dots (2n+1)N_1^0$ , telles que  $N_1^0 = 56,7 \times 6 = 340,2$  Hz est le spectre d'un signal carré d'amplitude  $A_1$  et de fréquence  $N_1^0$ . La seconde série d'harmoniques de fréquences  $N_2^0, 3N_2^0, \dots (2n+1)N_2^0, \dots$  telles que  $N_2^0 = 56,7 \times 5 = 283,5$  Hz est le spectre d'un signal carré d'amplitude  $A_2$  et de fréquence  $N_2^0$ . Le rapport des amplitudes de ces signaux carrés  $\frac{A_2}{A_1}$  est égal au rapport des longueurs des segments verticaux correspondant à la fréquence fondamentale de chaque série d'harmoniques ;  $\frac{A_2}{A_1} = 0,682$ .

#### 4.5. Spectre de fréquences de la troisième note $N_3 = 56,2$ Hz (figure 11)

Il comprend trois séries d'harmoniques. La première série de fréquences  $N_1^0, 3N_1^0, \dots (2n+1)N_1^0, \dots$  telles que  $N_1^0 = 56,2 \times 6 = 337,2$  Hz caractérise un signal carré de fréquence  $N_1^0$  et d'amplitude  $A_1$ .

La seconde série d'harmoniques, de fréquences  $N_2^0, 3N_2^0, \dots (2n+1)N_2^0, \dots$  telles que  $N_2^0 = 56,2 \times 5 = 281$  Hz est le spectre d'un signal carré de fréquence  $N_2^0$  et d'amplitude  $A_2$ .

La troisième série de fréquences  $N_3^0, 3 N_3^0, \dots (2n + 1) N_3^0, \dots$  telles que  $N_3^0 = 56,2 \times 4 = 224,8 \text{ Hz}$  caractérise un signal carré de fréquence  $N_3^0$  et d'amplitude  $A_3$ . Les rapports des amplitudes des signaux carrés sont  $\frac{A_2}{A_1} = 0,917$  et  $\frac{A_3}{A_1} = 1,25$ .

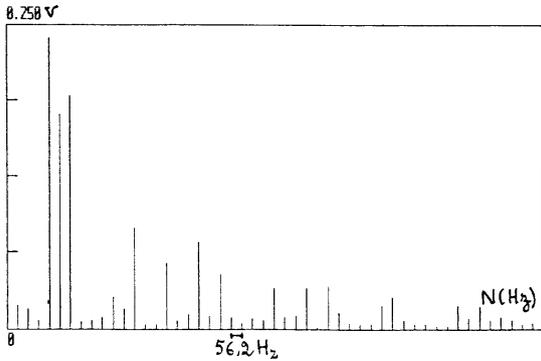


Figure 11 : Troisième note (56,2 Hz).

#### 4.6. Exploitation pédagogique

Un document sur lequel est représenté le spectre de fréquences d'un signal carré et distribué aux élèves. Ce document va leur permettre d'identifier les séries d'harmoniques présentes dans le son généré par le SAB 0600.

L'analyse spectrale étant réalisée, on peut mettre en évidence le fait que la simulation de certains sons, comme par exemple le son du carillon à trois tons que nous avons manipulé se réalise en superposant des signaux carrés, les signaux carrés étant faciles à produire en électronique.

### 5. SYNTHÈSE MATHÉMATIQUE DES SIGNAUX ÉLABORÉS PAR LE SAB 0600

#### 5.1. Objectif

Montrer que la synthèse d'un signal périodique est réalisable si on connaît les fréquences et les amplitudes des composantes harmoniques de ce signal.

5.2. Le logiciel MATH (Microlambda)

Il permet, grâce à des opérateurs booléens, d'établir l'équation de signaux divers (carré, triangulaire, marches d'escaliers, salves, ...) à partir de l'équation de signaux sinusoidaux par exemple.

Soit  $y_1 = 1 + \cos x$  l'équation d'une sinusoïde. En utilisant l'opérateur «>>» l'équation d'un signal carré d'amplitude 1 s'écrit :  $y_2 = y_1 > 1$  soit  $y_2 = (1 + \cos x) > 1$  ; ainsi  $y_2 = 1$  si  $y_1 \geq 1$  et  $y_2 = 0$  si  $y_1 < 1$ .

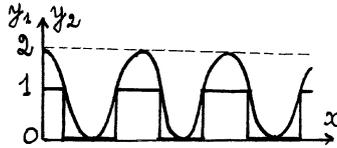


Figure 12

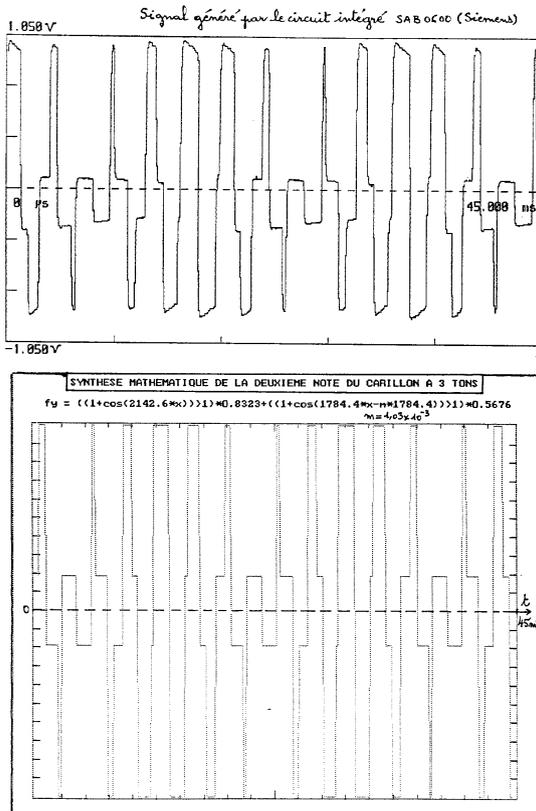


Figure 13

### 5.3. Synthèse de la deuxième note (figure 13)

Le spectre de fréquences a montré que la deuxième note est obtenue en ajoutant deux signaux carrés de fréquences  $N_1 = 341$  Hz et  $N_2 = 284$  Hz et d'amplitudes  $A_1$  et  $A_2$  telles que  $A_2 = 0,682 A_1$ . Les équations des deux signaux carrés s'écrivent, en désignant par  $m$  le décalage temporel entre ces signaux :

$$y_1 = A_1 * \left( (1 + \cos(2 * \text{PI} * N_1 * x)) > 1 \right) ; \quad x \leftrightarrow t$$

$$y_2 = A_2 * \left( (1 + \cos(2 * \text{PI} * N_2 * x - 2 * \text{PI} * N_2 * m)) > 1 \right).$$

La deuxième note est représentée par l'équation  $y = y_1 + y_2$ . Il faut trouver la valeur de  $m$  qui permette d'obtenir un signal de même forme que celui qui a été enregistré. La valeur de  $m$  est évidemment inférieure à  $T_2$  soit  $17,6 \times 10^{-3}$  s. Après plusieurs essais, la valeur de  $m$  qui semble convenir est  $1,03 \times 10^{-3}$  s ; le signal synthétisé à une forme très proche de celle du signal réel, seule l'inclinaison des paliers hauts et bas n'est pas la même.

L'inclinaison des paliers hauts et bas du signal réel est due aux imperfections de la structure interne du SAB 0600 ; en effet, l'addition de signaux carrés donne nécessairement un signal présentant des paliers horizontaux.

### 5.4. Synthèse de la troisième note (figure 14)

Le spectre de fréquences de la troisième note montre qu'elle est obtenue en ajoutant trois signaux carrés de fréquences  $N_1 = 341$  Hz,  $N_2 = 284$  Hz et  $N_3 = 227$  Hz, les valeurs de ces fréquences étant les valeurs «exactes» déduites de la fréquence  $N_0$  du signal d'horloge ; l'écart relatif entre les fréquences «exactes» et les valeurs expérimentales est légèrement supérieur à 1 %.

Les équations des trois signaux carrés de fréquences  $N_1$ ,  $N_2$  et  $N_3$  sont respectivement :

$$y_1 = A_1 * \left( (1 + \cos(2 * \text{PI} * N_1 * x - 2 * \text{PI} * N_2 * p)) > 1 \right) ; \quad x \leftrightarrow t,$$

$$y_2 = A_2 * \left( (1 + \cos(2 * \text{PI} * N_2 * x - 2 * \text{PI} * N_2 * m)) > 1 \right),$$

$$y_3 = A_3 * \left( (1 + \cos(2 * \text{PI} * N_3 * x - 2 * \text{PI} * N_3 * n)) > 1 \right).$$

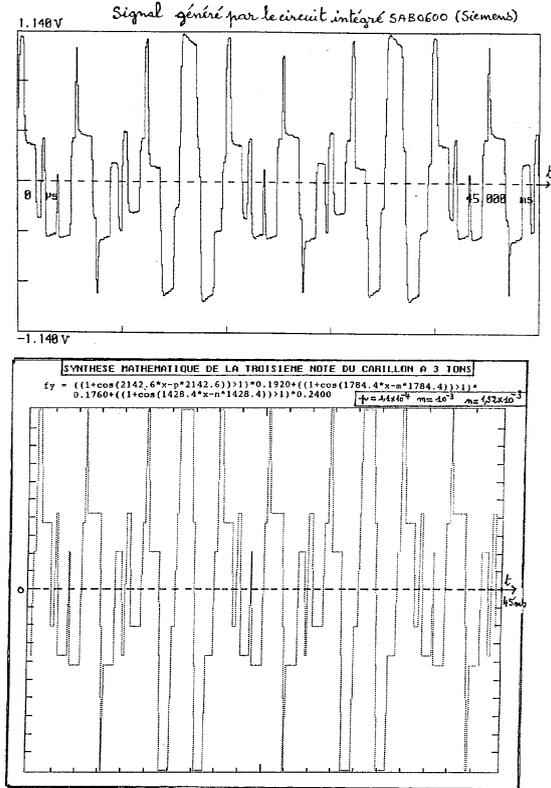


Figure 14

Les décalages temporels p, m et n sont tels que  $p < T_1$  soit  $p < 2,94 \times 10^{-3}$  s,  $m < T_2$  soit  $m < 17,6 \times 10^{-3}$  s et  $n < T_3$  soit  $n < 17,8 \times 10^{-3}$  s. Les valeurs de p, m et n qui permettent d'obtenir un signal de forme très proche de celle du signal réel sont :

$$p = 1,1 \times 10^{-4} \quad m = 10^{-3} \quad n = 1,52 \times 10^{-3}.$$

Le signal réel ne diffère du signal synthétisé que par l'inclinaison des paliers, l'interprétation de ce phénomène ayant été donnée dans le paragraphe précédent.

### 5.5. Exploitation pédagogique

La simulation par le professeur, du signal complexe comme celui que peut délivrer le SAB 0600 permet de :

- faire prendre conscience aux élèves qu'avant de synthétiser un son il faut en faire une analyse spectrale qui va apporter les informations indispensables : les fréquences et les amplitudes des composants du son,
- montrer qu'en superposant des signaux de forme simple comme les signaux carrés, on peut simuler des sons complexes,
- montrer que des signaux de même composition spectrale, synthétisés à partir de signaux de même composition spectrale, synthétisés à partir de signaux carrés par exemple, peuvent avoir des formes différentes qui dépendent des décalages temporels entre ces signaux carrés.

## 6. CONCLUSION

Grâce au générateur de sons, SAB 0600, et à l'outil informatique, nous avons pu illustrer le principe de quelques techniques fréquemment mises en œuvre en acoustique : visualisation du signal, analyse spectrale, synthèse à partir des informations fournies par l'analyse spectrale, et étude de l'influence des caractéristiques du haut-parleur et du lieu d'écoute sur le timbre du son.

L'outil informatique permet également l'élaboration, par le professeur, de documents en vue d'une exploitation par les élèves.

## 7. RENSEIGNEMENTS DIVERS

On trouve facilement le circuit intégré SAB 0600 dont le prix est de l'ordre de 30 F.

## BIBLIOGRAPHIE

Documentation Siemens et articles décrivant la réalisation d'un carillon électronique dans diverses revues (Elektor, Électronique Pratique, ...).

B.U.P. n° 734 - mai 1991 - Oscillations libres et forcées de l'équipage mobile d'un haut-parleur.