

# Décodage d'un clavier téléphonique à numérotation à fréquences vocales par analyse spectrale numérique

par C. CANCE et G. LEFÈVRE  
Groupe ÉVARISTE

---

## 1. INTRODUCTION

L'analyse spectrale d'un son musical, en classe de seconde, peut être effectuée à partir du son produit par un clavier téléphonique courant, lors de la numérotation.

Les avantages de ce choix sont les suivants :

- caractère banal et quotidien de l'instrument,
- application concrètement utilisable de la notion de spectre (c'est bien grâce au spectre que le central téléphonique reconnaît les codes),
- possibilité de présenter la manipulation sous forme ludique (découverte d'un code),
- approfondir la notion de décomposition en série de Fourier,
- ...

Le matériel à réunir consiste essentiellement en un combiné téléphonique fonctionnant en fréquences vocales, micro-ordinateur compatible PC, un interface d'acquisition de données. Celui-ci peut être Orphy-GTS, Candibus, ou ESAO 3, pour ces deux derniers, l'acquisition est faite via le logiciel d'usage général correspondant. Dans tous les cas, l'analyse spectrale est effectuée par le logiciel Spector, développé par l'un des auteurs de l'article, pour le groupe EVARISTE (CNAM (Paris)-DLC15).

Dans le cas d'une adaptation en travaux pratiques, le problème le plus important sera de réunir un nombre suffisant de téléphones.

## 2. DE LA TÉLÉPHONIE...

L'apparition des centraux téléphoniques électroniques a permis le remplacement des combinés mécaniques par des combinés effectuant une numérotation électronique.

Rappelons qu'une ligne téléphonique n'est formée que de deux conducteurs reliant l'appareil du particulier au central (paire téléphonique).

Les combinés mécaniques anciens effectuent un codage des numéros téléphoniques par fermetures et ouvertures d'une boucle de courant. Combiné raccroché, la ligne doit être parcourue par un courant inférieur à 2 mA, la formation d'un numéro est obtenue en fermant la boucle ( $I \approx 40$  mA) pendant 33 ms puis en l'ouvrant pendant 66 ms, une fois pour le chiffre 1, deux fois pour le chiffre 2, etc... et 10 fois pour coder 0. Chaque chiffre d'un numéro est séparé d'un suivant par un intervalle de 350 ms.

Cette façon de faire, remarquablement efficace, est relativement lente.

Les combinés électroniques effectuent un codage fréquentiel de la touche enfoncée, à des fréquences audibles, et le signal est aussi envoyé dans l'écouteur ce qui se traduit, par une tonalité musicale changeant suivant la touche.

Le nom courant du procédé est «DTMF» pour Dual Tone Multi Frequencies, le codage complet du clavier est très simple.

Le clavier est organisé en quatre lignes et quatre colonnes, ce qui donne 16 touches : les chiffres de 0 à 9, les symboles \* et # ainsi que les lettres A, B, C, D (ces lettres sont provisoirement absentes du clavier et correspondent à des «applications futures»).

A chaque colonne correspond une fréquence basse  $F_b$ , inférieure à 1 kHz et à chaque ligne une fréquence haute  $F_h$  supérieure à 1 kHz, chaque touche est donc codée par un couple de fréquences  $\{F_b, F_h\}$ .

Deux signaux sinusoïdaux de même amplitude (environ) et de fréquences  $F_h$  et  $F_b$  sont engendrés et additionnés pour constituer le signal envoyé sur la ligne par le combiné.

On a le tableau :

| Fréquences basses (Hz) : | 697 | 770 | 852 | 941 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 1209                     | 1   | 4   | 7   | *   |
| Fréquences hautes (Hz) : |     |     |     |     |
| 1336                     | 2   | 5   | 8   | 0   |
| 1477                     | 3   | 6   | 9   | #   |
| 1633                     | A   | B   | C   | D   |

### 3. MANIPULATION

#### a - But

A partir d'une analyse spectrale des signaux envoyés sur la ligne retrouver le mode de codage du clavier c'est-à-dire le tableau ci-dessus.

#### b - Montage (figure 1)

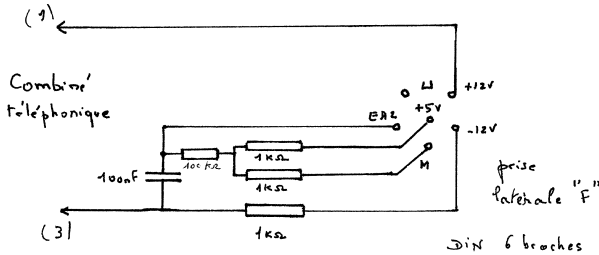
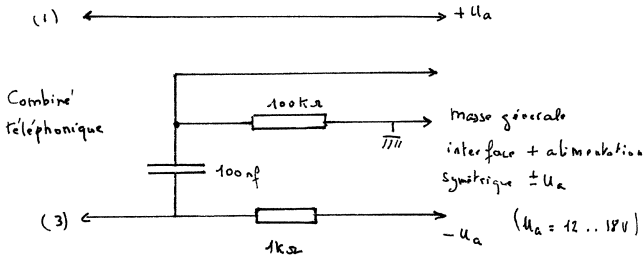


Figure 1 : Branchements pour Orphy-GTS.



Branchements pour Candibus ou ESAO3.

Lorsque le combiné est raccroché il existe entre les deux fils de la ligne une tension continue voisine de 48 V.

Il faut donc dans un premier temps simuler l'alimentation de la ligne et dans un second prélever le signal à l'aide d'un condensateur et d'une résistance en parallèle sur l'entrée de l'interface.

– Si le système d'acquisition est Orphy-GTS les tensions d'alimentation seront prises sur l'interface. Deux résistances de l'ordre de 1 k $\Omega$  permettent de recréer une référence sur la prise «F» d'Orphy. Dans le cas où le signal serait un peu faible pour la voie 2 (calibre  $\pm 2.5$  V) relier les voies 2 et 7 en parallèle, par un fil en face avant d'Orphy et travailler sur la voie 7 (calibre  $\pm 1$  V).

– Si le système d'acquisition est Candibus ou ESAO 3, il faut utiliser une alimentation annexe.

La tension de 48 V est vraiment très approximative, toute alimentation  $\pm 12$  V,  $\pm 15$  V,  $\pm 18$  V convient.

On peut aussi envoyer simultanément le signal sur un amplificateur pour le rendre audible par toute la classe.

Pour que le combiné fonctionne en DTMF, appuyer préalablement une fois sur la touche «\*» ou suivant, le matériel, sur la touche FV, attention tous les téléphones à clavier ne fonctionnent pas en DTMF !

#### 4. ACQUISITION AVEC ORPHY-GTS

(On utilise directement Spector V3 pour l'acquisition).

##### 4.1. Analyse pour une touche

##### **a - Paramétrage de l'acquisition**

Nombre d'échantillon : 512.

Fréquence d'échantillonnage : 19 207 Hz.

Voie : Voie 7.

##### **b - Acquisition**

Appuyer sur une touche du clavier téléphonique puis lancer l'acquisition.

On pourra observer le signal et remarquer qu'il n'est pas strictement périodique (figure 2).

##### **c - Traitement**

Calculer le spectre avec fenêtre de Hamming.

**d - Visualiser le spectre d'amplitude** avec un lissage de PARSEVAL égal à 3, une loupe égale à 2. Il est préférable de visualiser le spectre de puissance, qui atténue fortement les raies dues au bruit (figure 3).

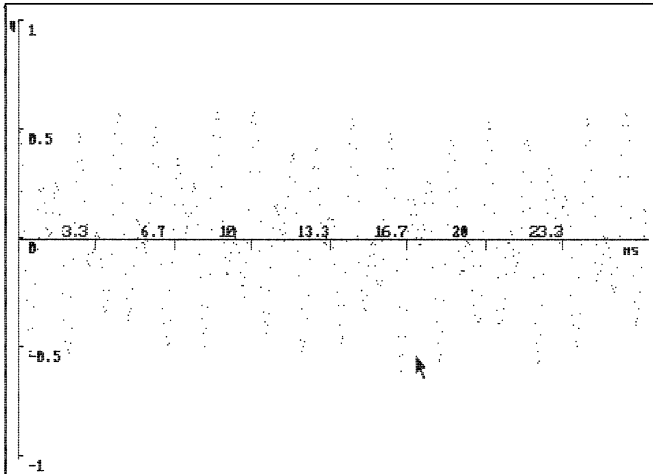
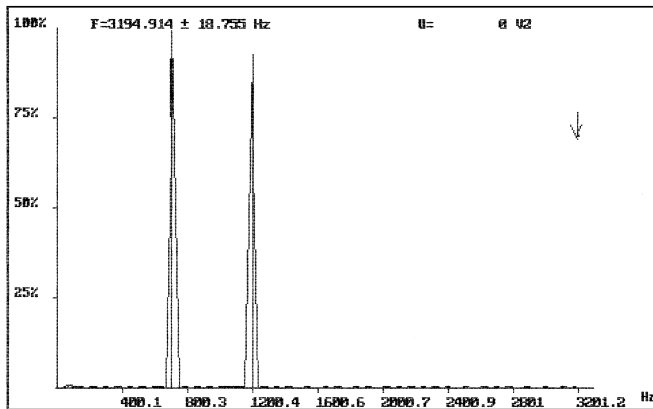


Figure 2 : Signal analogique envoyé sur la ligne lorsqu'on appui sur la touche «1».



Recherche des 2 raies principales. Résolution 37.51 Hz. Fen. de Hanning

Amplitude A= 0.2832 V Fréquence F= 712.69 Hz Ordre K=19

Amplitude A= 0.2723 V Fréquence F= 1200.32 Hz Ordre K=32

Figure 3 : Spectre de puissance (carré de l'amplitude) du signal précédent. On a tracé l'enveloppe spectrale qui montre deux grandes raies.

Les fréquences trouvées sont proches des valeurs attendues dans la limite de la résolution spectrale de 38 Hz environ.

On observe deux grandes raies, noter leurs fréquences.

**Remarque :** Les fréquences mesurées peuvent différer de celles attendues puisque la résolution est de l'ordre de 40 Hz (rapport entre la fréquence d'échantillonnage et le nombre de points) ne pas chercher à ce stade une précision illusoire.

#### 4.2. Analyse du clavier

##### *a - Paramétrage*

– **Nombre d'échantillons** : 256.

– **Fréquence d'échantillonnage** : 4 800 Hz.

On se sert du Théorème de Shannon : puisque la fréquence la plus grande est inférieure à 2 kHz, et que la fréquence d'échantillonnage doit être au moins le double de cette valeur, 4 800 Hz est une valeur suffisante.

On gagne en résolution spectrale :  $F_e/N = 4\,800 / 256 \approx 20$  Hz).

– **Nombre de spectres** : 4 (8 si la taille mémoire de votre ordinateur le permet).

– **Synchro** : clavier (4 touches peuvent être analysées simultanément).

– **Mode** : comparaison (et non moyennage qui donnerait le spectre moyen).

##### *b - Acquisition*

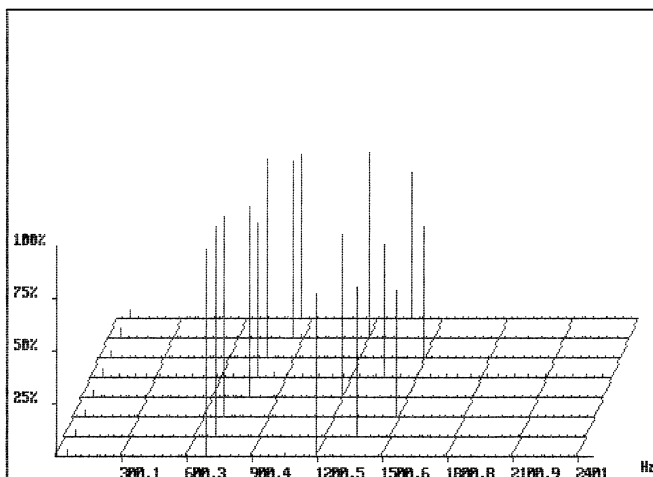
On peut choisir les touches «1», «2», «3» qui sont sur la même ligne et «4» qui est sur la colonne de la touche «1». Si le libre choix est laissé aux élèves, il leur faudra élaborer une stratégie.

##### *c. Traitement avec fenêtre de HAMMING*

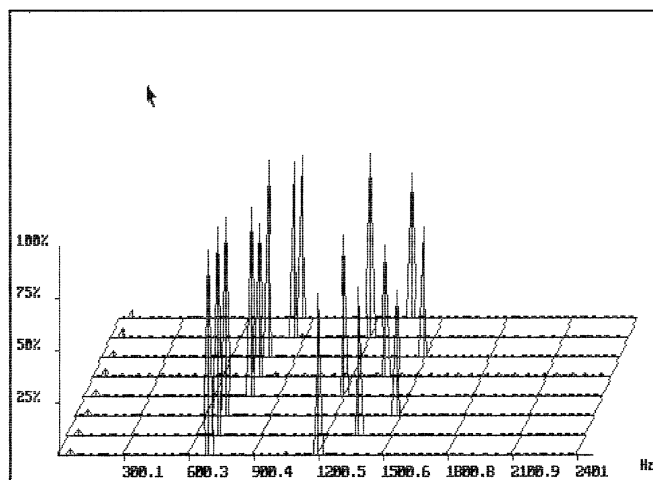
*d - Visualisation du Spectre d'amplitude*, avec lissage de Parseval égal à 3.

Les 4 ou 8 spectres sont tracés en pseudo-3 dimensions, le premier acquis en premier plan.

On obtient la figure 4.



**Figure 4 :** Comparaison des spectres des signaux correspondants au huit premières touches, dans l'ordre naturel «1», «2»,... de l'avant de la figure vers l'arrière. Spectre de puissance obtenu avec fenêtre de Hamming, et un paramètre de Parseval égal à 3. Représentation «baton».



**Figure 4 bis :** Analogue à la figure 4, mais tracé de l'enveloppe spectrale. Cette représentation a une allure plus familière mais est moins aisée à interpréter.

On constate instantanément que les 3 premières touches sont caractérisées par la même fréquence basse, la fréquence haute augmentant avec le numéro de colonne.

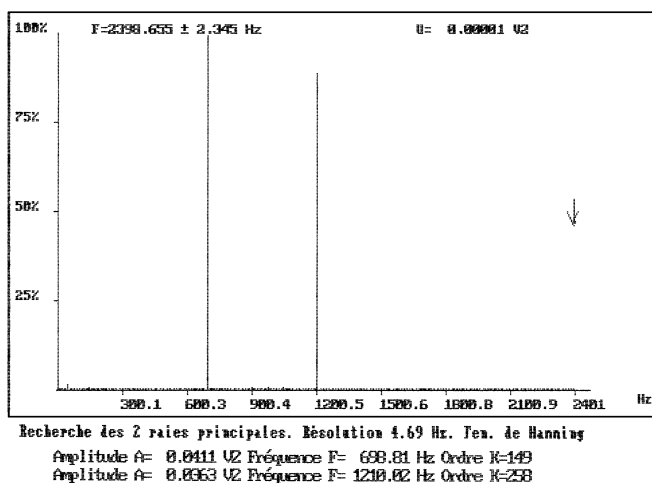
On constate également que les touches «1» et «4» ont la même fréquence haute.

#### 4.3. Détermination précise de deux fréquences

On cherchera ensuite à vérifier la concordance des valeurs des fréquences obtenues avec celles attendues.

Reprendre l'acquisition comme en 1., mais en affinant la résolution ; on prendra une fréquence d'échantillonnage égale à 4 800 Hz et un nombre de points égal à 1 024 (2 048 si votre ordinateur le permet), la résolution avoisine 5 Hz.

Les fréquences de la norme sont trouvées à la résolution près (Figure 5).



**Figure 5 :** Fréquences de la touche «1», avec une résolution de 4,7 Hz.  
Avec une bonne résolution on retrouve les valeurs théoriques exactes.

## 5. RÉALISER UNE ACQUISITION AVEC CANDIBUS ET LE LOGICIEL LABO OU AVEC ESAO 3 ET LE LOGICIEL ACTILAB

### *a - Candibus*

L'acquisition sera faite sur la voie 1, il faut impérativement paramétrer l'acquisition de façon à avoir 512 points (ou 256 ou en général une puissance entière de 2) pour que le calcul de transformée de Fourier puisse être effectué.

Les données sont ensuite stockées dans un fichier de type ASCII (que Labo crée avec l'extension .CD2).

### *b - ESAO 3*

On utilise un adaptateur voltmètre sur le calibre 2,5 V. Le nombre de points sera pris égal à 500, valeur maximale autorisée par le logiciel, au moment du chargement des données par Spector, 512 échantillons seront reconstruits à partir de ces 500 points par interpolation barycentrique (traitement automatique).

Les données seront stockées dans un fichier ASCII (passer par Fichiers... Tableurs).

Attention : les nombres sont stockés dans ces fichiers avec le nombre de décimales choisi pour les affichages écran, donc si l'on veut sauvegarder des valeurs utilisables il faut imposer un nombre maximal de chiffres après la virgule (utiliser Affichages... Personnalisation).

Ces logiciels ne permettent pas l'acquisition simultanée de plusieurs spectres, il faudra donc adapter la partie 2. ci-dessus.

## 6. MISE EN GARDE VIS-À-VIS D'UN A PRIORI CONCERNANT LES SÉRIES DE FOURIER

On établit d'habitude entre les sons supposés périodiques (donc de longue durée) et les séries de Fourier le rapport suivant :

Un son de fréquence  $f$ , d'amplitude en fonction du temps  $A(t)$ , peut s'écrire :

$$A(t) = a_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_1) + a_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot f \cdot t + \Phi_2) + \\ a_3 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 3 \cdot f \cdot t + \Phi_3) + a_4 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot f \cdot t + \Phi_4) + \dots$$

Certains partiels  $a_n$  pouvant être éventuellement nuls.

La fréquence  $f$  du fondamental d'amplitude  $a_1$  donne la hauteur du son, les  $a_n$  ( $n > 1$ ), harmoniques, son timbre.

Dans le cas des touches téléphoniques, pour l'une quelconque d'entre elles :

$$A(t) = ab \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot Fb \cdot t + \Phi b) + ah \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot Fh \cdot t + \Phi h) \quad (1)$$

Comme la condition  $Fh = k \cdot Fb$  ( $k$  entier) n'est pas vérifiée,  $Fh$  et  $Fb$  sont les harmoniques d'un fondamental calculable :

La période  $\tau$  du signal est un multiple entier à la fois de la période  $Th$  de la fréquence haute et la période  $Tb$  de la fréquence basse.

Calculons  $\tau$  pour la touche 7 du clavier, on doit avoir :

$$nh \cdot Th = nb \cdot Tb \quad \text{avec } nh \text{ et } nb \text{ entiers}$$

$$\text{soit : } Th/Tb = nb/nh \quad \text{soit encore : } Fb/Fh = nb/nh.$$

$$\text{Pour la touche 7 on a en Hz} \quad Fh = 1209 = 3 \times 13 \times 31$$

$$Fb = 852 = 2^2 \times 3 \times 71$$

Le rapport  $nb/nh = 284/403$  n'est pas plus réductible.

Les solutions minimales  $nb = 284$  et  $nh = 403$  conduisent à  $\tau = 0.3$  s et à une fréquence  $Fo$  du signal :

$$\mathbf{Fo = 3 \text{ Hz} !}$$

La cohérence du point de vue demande d'annoncer à la personne qui écoute le son de la touche 7 : «Vous entendez un son de fréquence 3 Hz...» ! (hors de la bande passante de l'oreille ?).

D'autre part, pour trouver le spectre d'un signal de fréquence  $Fo$  il faut l'échantillonner pendant une durée au moins égale à une période : ici l'échantillonnage devrait durer 0,3 s ce qui n'est tout simplement pas vrai.

La série de Fourier de son est :

$$A(t) = a_1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \Phi_1) + a_{284} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 284 \cdot f \cdot t + \Phi_{284}) + \\ a_{403} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 403 \cdot f \cdot t + \Phi_{403})$$

Avec un fondamental d'amplitude nulle.

(Un manuel de parution récente pour la classe de seconde propose un exercice du même type : analyse d'un spectre sur lequel «le fondamental n'est pas visible»... et dont la fréquence doit être calculée, que l'on trouve une valeur audible ne change pas le fait que la fréquence trouvée n'est pas celle du son).

En conclusion nous recommandons la prudence dans l'association d'une série de Fourier à un son musical, il est plus logique d'admettre que certains signaux n'ont pas de série de Fourier. Dans cette perspective on remarquera également qu'il est erroné de considérer un analyseur de spectre comme un appareil qui effectue des décompositions en série de Fourier, puisqu'il trouve le spectre de signaux qui n'en ont pas.

## **BIBLIOGRAPHIE**

### **Sur l'analyse spectrale :**

C. CANCE - *Mise en œuvre pratique de l'analyse spectrale numérique* (voir article précédent).

### **Sur la D.T.M.F. :**

C. TAVERNIER - *Confort et téléphone* - Revue «Le Haut-Parleur» - n° 1812 - Mai 1993.