

## TP : Échantillonnage.

L'utilisation de l'ordinateur impose de passer du traitement de signaux analogiques à celle de signaux numériques. L'obtention d'un signal numérique passe par son échantillonnage que nous allons étudier expérimentalement dans ce TP. Comme nous l'avons vu sur le plan théorique, l'échantillonnage consiste à multiplier le signal  $u(t)$  par une fonction peigne de DIRAC constituée d'impulsions très courtes se répétant périodiquement. Cette répétition est caractérisée par la fréquence d'échantillonnage  $f_e$ . Nous travaillerons avec une fréquence d'échantillonnage qui sera au maximum de quelques dizaines de kilohertz et en tout état de cause  $f_e \leq 100$  kHz. La durée de l'impulsion sera  $\tau = 1 \mu\text{s}$  de telle sorte que  $f_e \tau < 1$ , voire même  $f_e \tau \ll 1$ . La conversion du signal en binaire ne sera pas étudiée dans ce TP.

### 1 Objectifs

La musique d'un CD est traditionnellement échantillonnée à la fréquence  $f_e = 44,1$  kHz. En effet, le domaine des ondes sonores accessibles à notre oreille va de  $f_{min} = 20$  Hz à  $f_{max} = 20$  kHz. Pour respecter le critère de SHANNON, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure au double de la plus haute fréquence contenue dans le signal à échantillonner. On constate bien dans ce cas précis que  $f_e > 2f_{max}$ . L'objectif de ce TP est de constater que l'échantillonnage, comme toute opération de multiplication et plus généralement comme toute opération non linéaire, modifie le spectre du signal analogique initial. L'échantillonnage enrichit le spectre du signal, le terme *enrichir* n'est pas le plus adapté car les conséquences de l'échantillonnage sont plutôt néfastes pour l'utilisateur final ! Nous verrons les conséquences sur le spectre mais entendrons aussi celles-ci sur un signal audible. Nous verrons aussi les conséquences lorsque l'on travaille en dessous du critère de SHANNON  $f_e \leq 2f_0$  si  $f_0$  est la fréquence du signal.

Sur la photographie de la figure 1, vous pouvez le résultat de l'échantillonnage d'un signal sinusoïdal. Le second signal visualisé sur l'écran de l'oscilloscope est la fonction peigne de DIRAC.

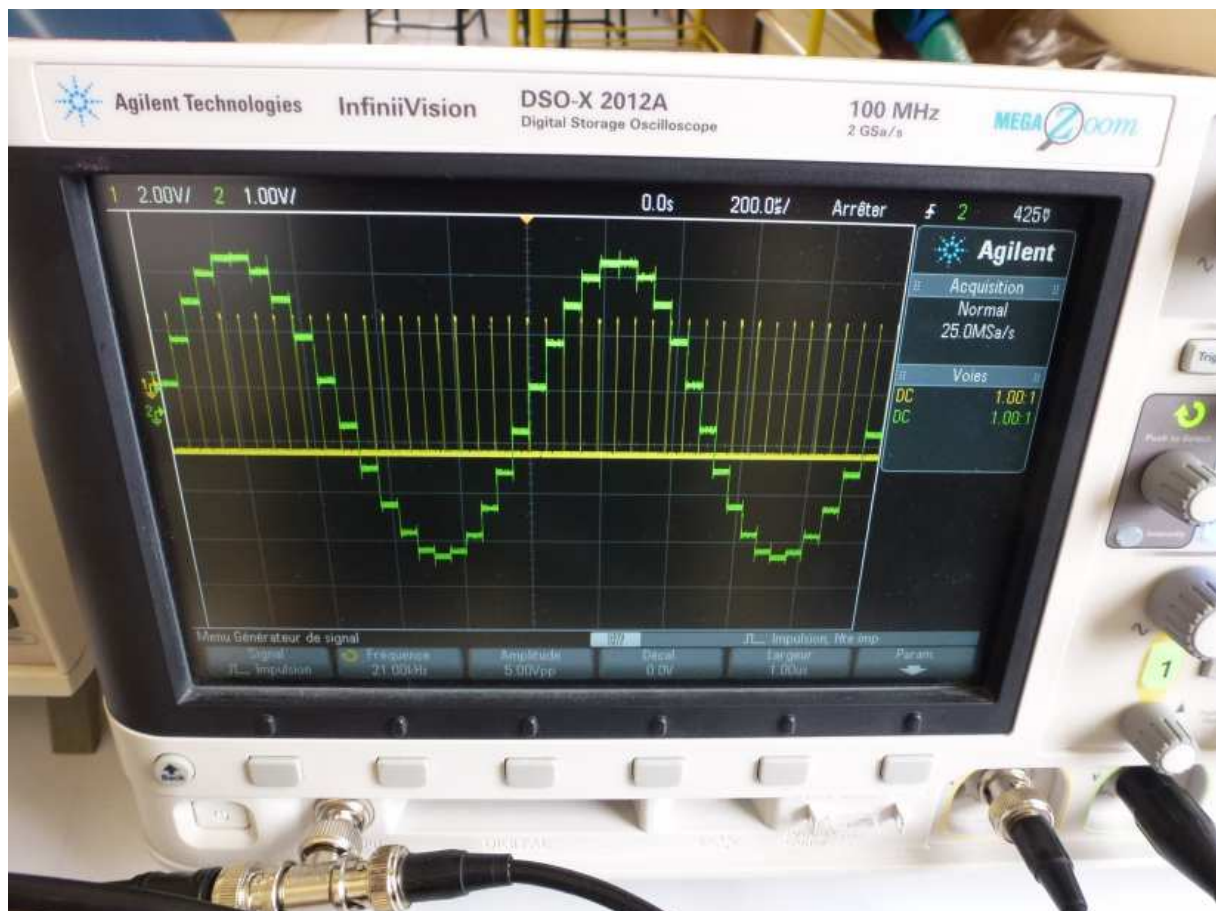


FIGURE 1 – Signal échantillonné

## 2 Matériel

Ce TP sera l'occasion d'utiliser le circuit d'échantillonnage réalisé sur un morceau de plaquette *Microlab*. Ce type de plaquette permet de faire aisément des circuits électroniques à partir des composants électroniques de base. Les circuits réalisés sont très rapidement évolutifs. Mais, évidemment, il est indispensable d'avoir déjà utilisé la plaquette pour être à l'aise. La plaquette est présentée sur la photographie de la figure 2. Sur la figure 3, on peut voir les lignes électriques qui correspondent à un seul et même point (nœud).



FIGURE 2 – Plaquette *Microlab*

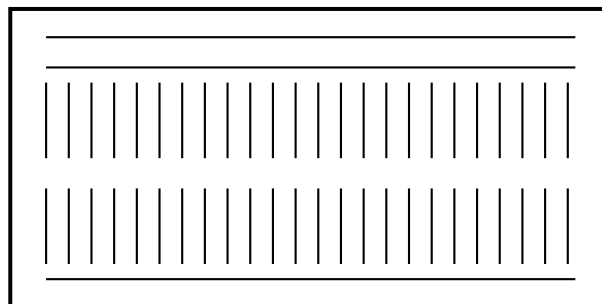


FIGURE 3 – Structure de la plaquette *Microlab*

Vous allez utiliser deux circuits intégrés dans le montage qui a été réalisé pour vous. Tout d'abord un circuit réalisant l'échantillonnage, il s'agit du Quad Bilateral Switch HCF4066BE. Ce circuit intégré comporte 4 dispositifs permettant d'échantillonner le signal, nous n'utiliserons que le premier. Ce circuit ne fonctionne pas sans apport énergétique, celui-ci sera réalisé par une alimentation  $\pm 10$  V par rapport à la masse. Les connexions utiles sont représentées sur le schéma de la figure 4. L'amplificateur opérationnel est alimenté en  $\pm 10$  V de la même façon que le switch.

Vous serez aussi amenés à utiliser un second circuit intégré, plus connu sous le nom d'amplificateur opérationnel (AO) ou encore amplificateur linéaire intégré (ALI) car, dans la plupart de ces utilisations, on réalise

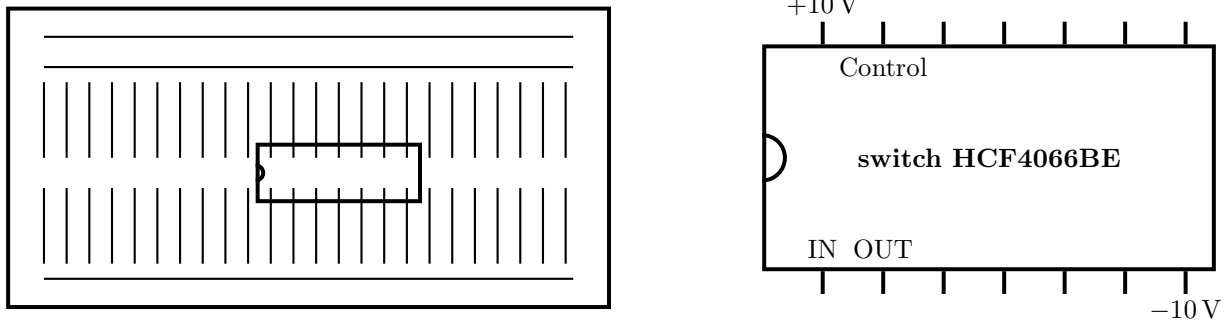
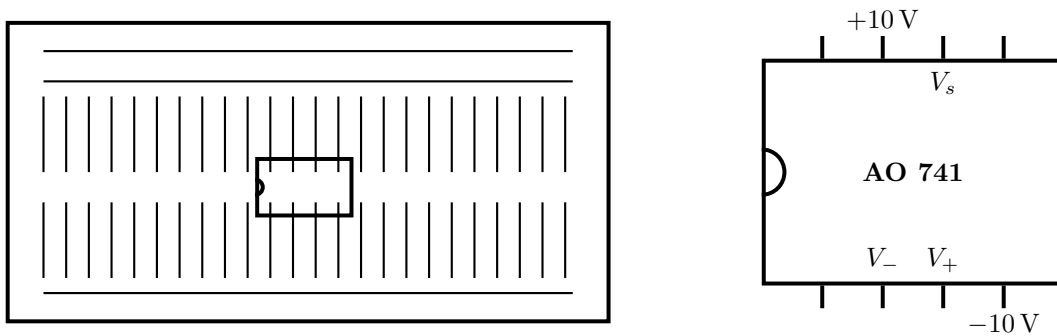


FIGURE 4 – Connexions du switch HCF4066BE

facilement des opérations mathématiques classiques comme la multiplication par un facteur supérieur à 1 (amplification), comme l'addition, la soustraction, la dérivation, l'intégration. Soit dit en passant, on peut regretter que ce circuit ne figure plus au programme à étudier cette année tant son utilisation est intéressante. Comme pour le Switch précédent, il faut connaître ses connexions, voir le schéma de la figure 5.

FIGURE 5 – Connexions de l'AO 741 et son installation sur la plaquette *Microlab*

L'oscilloscope *Agilent* sera utilisé pour visualiser les tensions intéressantes du montage mais aussi pour produire le signal d'échantillonnage. Le matériel sera complété par un condensateur de capacité  $C = 1 \text{ nF}$ , une résistance  $R = 300 \Omega$  et un haut-parleur.

### 3 Aspects théoriques

#### 3.1 Produit de deux tensions sinusoïdales

On considère les tensions  $u(t) = E_0 \cos 2\pi f_0 t$  et  $e(t) = E_e \cos 2\pi f_e t$ . Un circuit multiplieur a pour fonction de produire une tension de sortie correspondant au produit des deux tensions mises en entrée :

$$u_e(t) = k u(t) e(t)$$

où  $k$  est un coefficient constant en  $\text{V}^{-1}$ .

1. Sachant que  $\cos p \cos q = \frac{1}{2} (\cos(p+q) + \cos(p-q))$ , préciser l'expression de la tension  $u_e(t)$  et donner les fréquences présentes dans le spectre de la tension de sortie du circuit multiplieur.

#### 3.2 Effet de l'échantillonnage sur le spectre du signal

2. Rappeler - sans démonstration - quelles sont les fréquences présentes dans le spectre du signal d'échantillonnage de fréquence  $f_e$  constitué d'impulsions courtes et périodiques.

3. On considère maintenant le signal de sortie du switch qui résulte de la multiplication du signal d'échantillonnage et d'une tension d'entrée  $u(t) = E_0 \cos 2\pi f_0 t$  dans le cas où le critère de SHANNON est respecté à savoir  $f_e > 2f_0$ . Donner la liste des fréquences présentes dans le signal de sortie du switch.

4. On se place maintenant dans le cas où le critère de SHANNON n'est pas respecté, par exemple avec  $f_e = 3f_0/2$ . Représenter le spectre du signal de sortie dans ce cas. Qu'est-ce que le phénomène de repliement du spectre ?

## 4 Présentation du montage expérimental

Le montage réalisé est visible sur la photographie de la figure 6. Il correspond à l'échantillonnage par l'action du switch, le signal échantillonné est obtenu en sortie du circuit intégré HCF4066BE. Afin de permettre la suite du traitement du signal, on stabilise la tension de sortie du switch grâce à un condensateur  $C = 1 \text{ nF}$  que l'on peut voir. On constitue alors un circuit qualifié d'échantillonneur-bloqueur. C'est grâce à ce condensateur que l'on peut obtenir une tension stable entre deux impulsions du signal d'échantillonnage.

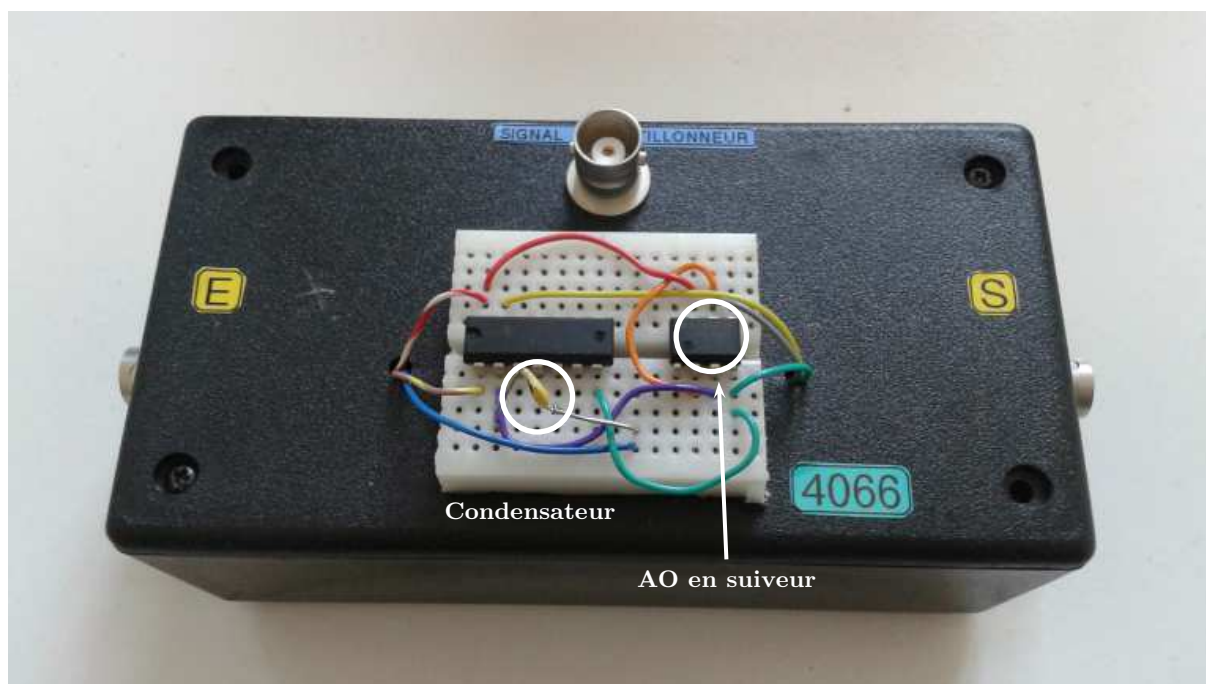


FIGURE 6 – Montage échantillonneur-bloqueur avec suiveur

Pour visualiser la tension aux bornes du condensateur, il n'est pas possible de le relier directement à l'oscilloscope. En effet, le condensateur se décharge dans l'impédance d'entrée de l'oscilloscope ce qui nuit à la stabilisation de la tension entre deux impulsions du peigne de DIRAC. C'est pourquoi on utilise l'amplificateur opérationnel en suiveur. En effet, l'AO possède une très forte impédance d'entrée, beaucoup plus forte que celle de l'oscilloscope. Le condensateur ne se décharge quasiment pas. Le montage suiveur est très simple à réaliser, il suffit de mettre sur l'entrée non-inverseuse  $V_+$  la tension que l'on veut faire suivre si l'on peut dire. On relie ensuite l'entrée inverseuse  $V_-$  à la sortie du montage avec un simple fil conducteur. On profite alors d'une propriété de l'amplificateur opérationnel à savoir  $\varepsilon = V_+ - V_- = 0$  - propriété valable lorsque le régime de fonctionnement de l'AO est linéaire, ce qui est le cas ici - pour obtenir  $V_s = V_+$ . C'est cette relation qui donne le nom de suiveur au montage, voir le schéma de la figure 7.

Le montage complet est représenté sur le schéma de la figure 8. On peut y voir l'ensemble des éléments du montage à savoir le circuit switch réalisant l'échantillonnage, puis l'ensemble condensateur-suiveur et enfin l'utilisation qui sera dans ce TP soit l'oscilloscope, soit un montage en série de la résistance  $R = 300 \Omega$  et d'un haut-parleur. Dans ce dernier cas, on notera que la résistance en série a pour objectif de limiter le courant car l'amplificateur opérationnel ne peut que délivrer des courants en sortie de l'ordre de la dizaine de milliampères. Cette limitation sera aussi très utile pour limiter l'intensité sonore fournie par le haut-parleur.

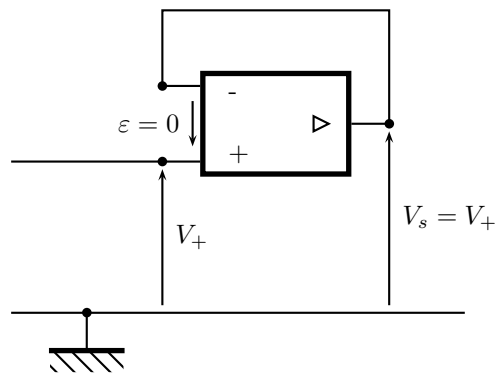


FIGURE 7 – Montage suiveur à AO

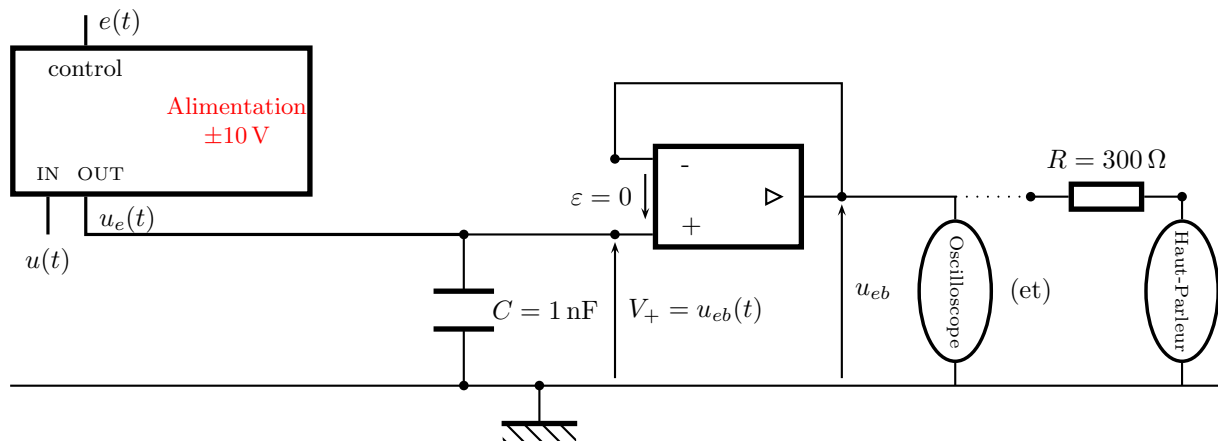


FIGURE 8 – Schéma complet du montage échantillonneur-bloqueur avec suiveur

## 5 Expériences

### 5.1 Consignes

Lors de vos activités expérimentales en TP, vous devrez systématiquement :

- \* Élaborer un protocole et m'appeler pour que je le valide.
- \* Mettre en œuvre ce protocole et m'appeler pour que j'évalue vos activités.
- \* Communiquer les résultats dans le compte rendu sous forme de descriptions, de tableaux de mesures, de graphiques...
- \* Valider les résultats en comparant les développements théoriques et les résultats expérimentaux en ayant le souci permanent de présenter de façon rigoureuse les résultats avec leur incertitude.
- \* Remettre en fin de séance votre compte-rendu.

Vous serez évalué sur l'ensemble de ces exigences.

### 5.2 Utilisation du montage complet

5. Sur la plaquette *Microlab*, le circuit complet de la figure 8 est utilisé avec l'oscilloscope comme utilisation. Comme pour tous les circuits intégrés, il est indispensable de commencer brancher le switch à l'alimentation  $\pm 10$  V.

6. Utiliser le générateur intégré à l'oscilloscope pour élaborer, au départ, un signal d'échantillonnage  $e(t)$  de fréquence  $f_e = 10$  kHz constituée d'impulsions de durée  $1 \mu\text{s}$ , on choisira une amplitude de 5 V par exemple ainsi qu'une tension de décalage de 2,5 V. En pratiquant ainsi, on envoie un signal échantillonneur positif toujours compris entre 0 V et 5 V. Brancher ce signal à la borne prévue sur le boîtier.

7. Grâce au générateur BF *Centrad*, mettre sur la borne d'entrée un signal sinusoïdal d'amplitude 3 V et de fréquence 200 Hz.

8. Observer sur l'oscilloscope à la fois le signal  $e(t)$  servant à l'échantillonnage et le signal échantillonné-bloqué  $u_{eb}(t)$ . Vous devriez obtenir quelque chose de ressemblant aux oscillogrammes de la figure 1.

### 5.3 Conséquences de l'échantillonnage

9. En lien avec la partie théorique, élaborer un protocole permettant de bien illustrer l'influence de l'échantillonnage sur le spectre du signal  $u_{eb}(t)$ . L'oscilloscope présente dans son module *math* la possibilité de calculer le spectre d'un signal (FFT). Demander des explications sur le menu de la FFT proposée par l'oscilloscope.

Vous pourrez utiliser votre téléphone portable ou une petite webcam pour prendre des photographies de l'écran de l'oscilloscope, photographies qui permettront d'illustrer votre compte-rendu.

10. Abaisser progressivement la fréquence d'échantillonnage et observer le signal  $u_{eb}(t)$  mais aussi son spectre.

11. Mettre en évidence les conséquences du non-respect du critère de SHANNON.

### 5.4 Confirmation auditive

12. Vous disposez d'un haut-parleur dont vous limiterez le niveau sonore en l'utilisant avec une résistance  $R$  comprise entre  $100\ \Omega$  et  $300\ \Omega$  en série. Écouter successivement le signal sinusoïdal de 200 Hz délivré par le générateur BF et le signal  $u_{eb}(t)$ . Faire part de vos constatations.

13. Faire varier la fréquence d'échantillonnage et écouter en même temps.

14. Franchir la limite du critère de SHANNON.

### 5.5 Filtrage numérique

15. Vous allez réaliser l'acquisition d'une tension crête de fréquence 100 Hz. L'acquisition sera effectuée par la carte *Sysam SP5* pilotée par le programme *Acquisition\_SP5\_FiltNumElev*, puis en complétant le programme *Filt\_Num\_PBas\_Ordre\_1Elev*, vous effectuerez un filtrage numérique passe-bas sur le signal. N'hésitez pas à faire varier les conditions de votre expérience d'acquisition et de filtrage.

16. Refaire le même travail pour un signal triangulaire.

17. Vous allez observer l'effet d'un filtre numérique de BUTTERWORTH sur un fichier son superposant du piano et le chant d'un oiseau. Le fichier de travail sera *Chopin+pinson*. Il peut être lu par VLC par exemple. Au départ, le filtre de BUTTERWORTH est un filtre analogique passe-bas d'ordre  $n$  qui possède un module donné par l'expression :

$$|H(jf)| = \frac{H_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2n}}}$$

On peut en réaliser classiquement jusqu'à l'ordre 8. Ce filtre est très efficace car il possède une asymptote à  $-160\ \text{dB/dec}$ . On peut réaliser un filtre passe-bande en faisant agir successivement un filtre passe-bas, puis un filtre passe-haut. En effet, il existe aussi des formes passe-haut du filtre de BUTTERWORTH. Ces filtres très efficaces possèdent aussi une version numérique que l'on va mettre en œuvre en traitant le fichier son par le programme *Musique\_Filt\_Num\_Butterworth*.

Faire fonctionner le programme et écouter le résultat grâce aux fichiers son produits. Commenter.

### 5.6 Initiative personnelle

18. S'il vous reste du temps, vous pouvez prendre des initiatives illustrant la question du filtrage numérique.