

# LIVRABLE COMPTE-RENDU N°2

## G4E – L'équipe H-tech

Thomas BOURGEOIS

Paul CHU

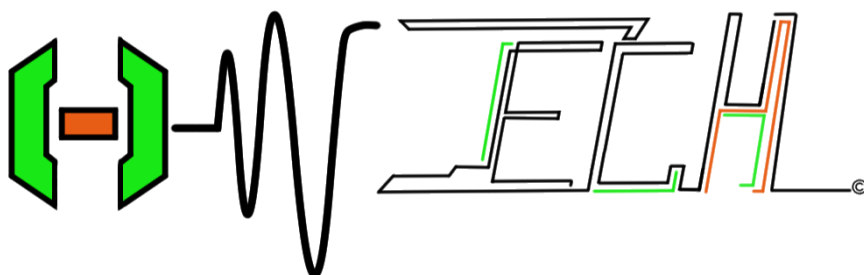
Nicolas DELMAS

Dimitri PEDINIELLI

Tancrède PETIT DE SERVINS

Kang YANG

## Numérisation d'un signal Rapport sur le problème III



### Rédacteurs :

**M Thomas BOURGEOIS**

**M Paul CHU**

**M Nicolas DELMAS**

**M Dimitri PEDINIELLI**

**M Tancrede PETIT DE SERVINS**

**M Kang YANG**

*Chefs de Projet*

## Table des matières

<b>I. MISE EN SITUATION .....</b>	<b>5</b>
1. Introduction .....	5
2. Notre méthode .....	7
<b>II. DETERMINATION DES PARAMETRES .....</b>	<b>9</b>
1. Fréquence d'échantillonnage .....	9
2. Quantification .....	9
3. Débit du signal numérique (voir le calcul en annexe [5]) .....	11
4. Capacité de stockage (voir le calcul en annexe [6]) .....	11
5. Compatibilité des paramètres sur un CD ? .....	11
<b>III. EXPERIMENTATIONS.....</b>	<b>12</b>
1. Rappel de la problématique.....	12
2. Notre réponse .....	13
a. Solution théorique.....	13
b. Solution pratique.....	15
<b>IV. CONCLUSION .....</b>	<b>17</b>
<b>V. ANNEXE.....</b>	<b>19</b>
1. Calcul de $P_s$ .....	19
2. Calcul de $SNR_{dB}$ .....	19
3. Calcul de $q$ .....	20
4. Calcul de $b$ .....	20
5. Calcul du débit du signal numérique .....	21
6. Capacité de stockage .....	21
7. Mode d'emploi.....	22
<b>VI. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>23</b>
<b>VII. TABLE DES FIGURES .....</b>	<b>24</b>

## CONTEXTE

Nous avons travaillé directement sur des signaux échantillonnés. Mais comme on le connaît, la plupart des capteurs délivrent des signaux analogiques. C'est ce que nous demande désormais la société Infinite Measure, on nous demande d'étudier la méthode de numérisation des signaux. Au cours de cette deuxième mission, nous sommes amenés à déterminer les paramètres de numérisation afin de respecter les conditions qui nous sont imposées dans l'énoncé.

Pour cela, nous comptons dans un premier temps illustrer le concept de numérisation d'un signal sous forme de schéma fonctionnel. Puis de déterminer l'ensemble des paramètres de ce dernier avant de nous intéresser aux différents indicateurs (débit du signal numérique, capacité de stockage pour une heure d'audio en stéréo).

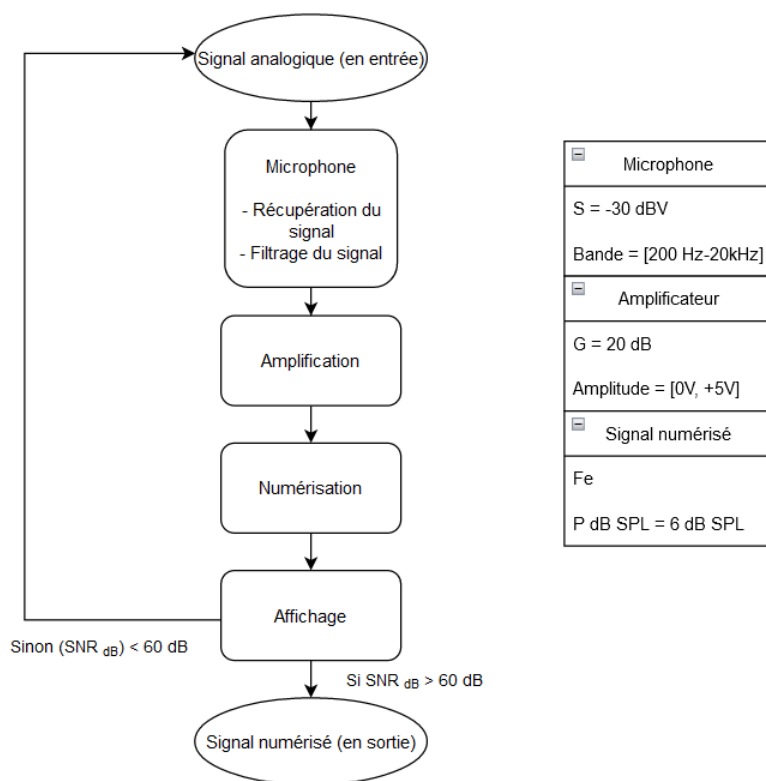
A l'issue de cette étude, nous vérifierons si les paramètres que nous avons soumis sont compatibles avec une qualité et un stockage sur CD. Et enfin de voir si ces derniers respectent le timbre des instruments d'un orchestre symphonique.

## I. MISE EN SITUATION

### 1. Introduction

Dans ce problème, nous souhaitons effectuer un enregistrement numérique en utilisant un micro de sensibilité  $S = -30$  dBV, et ayant une bande passante 200 Hz – 20 kHz. Mais la particularité de ce dernier c'est qu'il n'introduit aucune distorsion sur la bande considérée et aucun bruit. On précise que le signal analogique se retrouve par la suite amplifié avec un gain  $G = 20$  dB. La dynamique après amplification est  $[0V, +5V]$ . Ce signal est ensuite numérisé. On choisit des paramètres de numérisation afin de garantir un rapport signal à bruit d'au moins 60 dB pour un signal acoustique de  $P_{dB\ SPL} = 6$  dB SPL (2 fois le minimum de pression audible).

Nous pouvons visualiser la situation de façon plus claire en l'illustrant sous forme d'un premier schéma fonctionnel :



**Figure 1 : Schéma fonctionnel (initial)**

Cependant, après réflexion approfondie concernant la bonne compréhension de la procédure de notre cas d'étude. Nous avons en effet remarqué une certaine imprécision voire un oubli concernant les précisions des bruits. Puisque lors de la récupération du signal, il faut bien admettre ces paramètres qui peuvent influencer sur l'affichage final de notre signal

en sortie. Ainsi nous reprenons le schéma précédent en le complétant avec ces indications, et nous obtenons le schéma suivant :

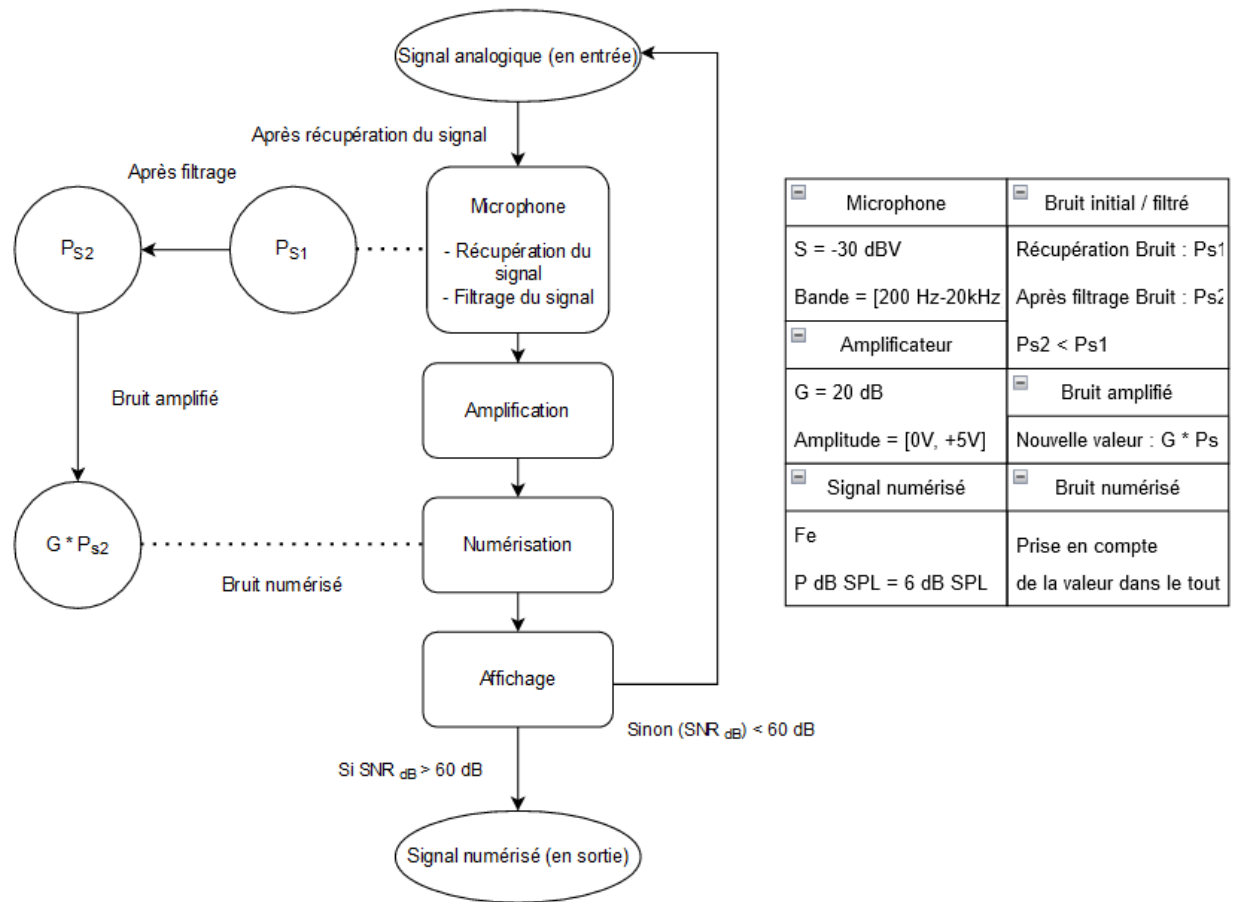


Figure 2 : Schéma fonctionnel du problème (final)

Pour résoudre ce problème, voici notre proposition de résolution : Nous souhaitons dans un premier temps déterminer tous les paramètres en nous basant sur les données de l'énoncé. Suite à quoi, nous serons en mesure de proposer un algorithme qui pourra nous affirmer ou non si les paramètres sont adaptés pour le timbre des instruments d'un orchestre symphonique.

## 2. Notre méthode

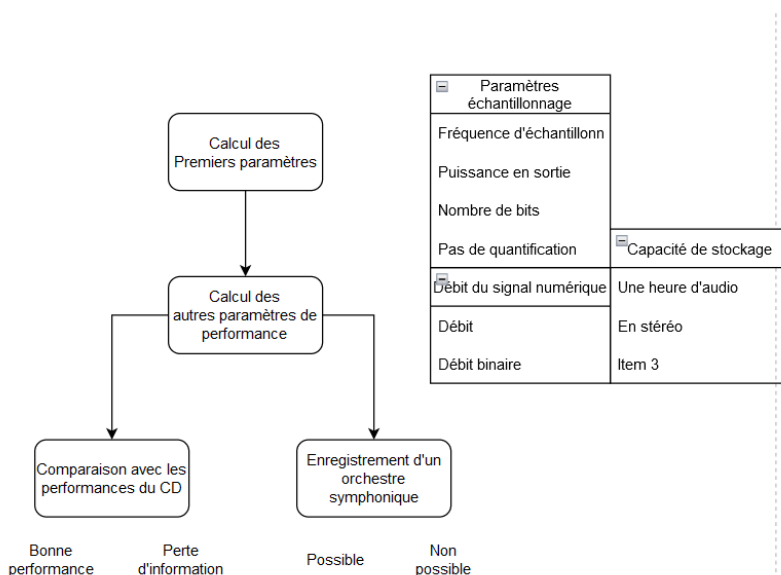
Comme dit précédemment, à partir des données de l'énoncé, nous allons déterminer l'ensemble des paramètres de notre cas d'étude. L'idée étant de reprendre les valeurs connues pour ensuite déterminer les paramètres manquants. Voici un aperçu des premiers paramètres que nous souhaiterions déterminer :

- Fréquence d'échantillonnage
- Puissance
- Nombre de bits pour le codage
- Pas de quantification

De ces paramètres, nous pourrons par la suite déduire d'autres indicateurs de performances propre au signal choisi :

- Le débit du signal numérique
- La capacité de stockage pour enregistrer une heure d'audio en stéréo

Enfin, nous pourrons ensuite nous interroger sur la compatibilité de nos paramètres avec un CD. Ainsi que de répondre à la fameuse problématique sur l'orchestre symphonique à travers un algorithme qui permettra de nous dire si les paramètres conviennent aux instruments d'orchestre et inversement. Notre raisonnement peut être résumé par le schéma fonctionnel suivant :



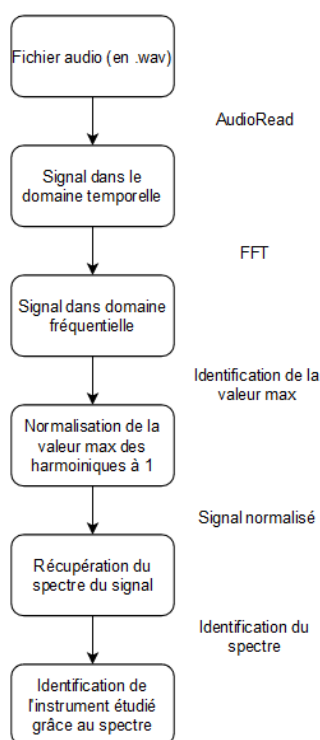
**Figure 3 : Synthèse de notre raisonnement pour le cas d'étude**

En effet, à l'issue des calculs des paramètres, nous pourrions ensuite nous interroger sur la question de l'enregistrement d'un orchestre symphonique.

Comme on sait que pour caractériser un instrument, il faut regarder non seulement le fondamental mais aussi d'étudier les harmoniques de ce signal.

L'idée étant que de faire l'étude sur le spectre obtenu et de s'interroger sur si nous avons bien obtenue toutes les informations nécessaires pour que restituer correctement le signal avec un minimum de pertes. De sorte que ces pertes n'impactent pas l'identification de l'instrument en question. Exemple : Prenons un fichier audio d'un piano ou d'un violon, puis avec notre programme, nous devrions être en mesure d'identifier l'instrument à l'issue de l'étude porté sur son spectre (et particulièrement sur les harmoniques).

Notre raisonnement pour le programme peut se résumer sous forme de cette illustration :



**Figure 4 : Schéma fonctionnel de l'intérêt de notre programme MatLab**



## II. DETERMINATION DES PARAMETRES

### 1. Fréquence d'échantillonnage

Connaissant la bande passante du micro, nous savons que cela se situe dans l'intervalle [200 Hz – 20 kHz]. Or pour rappel, la condition de Shannon énonce la condition d'inégalité suivante :

$$2f_{\max} \leq F_e$$

Ayant une fréquence égale au maximum possible de la bande passante actuelle, on obtiendrait :

$$f_{\max} = 20 \text{ kHz}$$

Ainsi, il serait raisonnable d'opter une fréquence d'échantillonnage supérieure au double de la valeur de celle-ci. Par exemple, posons  $F_e = 40,1 \text{ kHz}$ .

### 2. Quantification

En effet, avant de réaliser la numérisation, il est important de prendre en compte les paramètres de la quantification. Plus exactement, il s'agirait pour nous de déterminer le nombre de bits qu'il nous faut pour réaliser la numérisation. Or, d'après l'énoncé, on nous indique de façon claire que la quantification respecte un rapport signal à bruit de quantification d'au minimum 60 dB.

Par définition, on sait que :

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left( \frac{G * P_s}{P_b} \right)$$

$$\text{et } SNR_{dB} \geq 60$$

Nous comptons ainsi déterminer les autres paramètres en partant de ces informations et plus particulièrement de la relation reliant ce rapport signal à bruit de quantification ( $SNR_{dB}$ ) à la puissance du signal en sortie ( $P_s$ ) et le pas de quantification en l'exprimant à travers la puissance du bruit ( $P_b$ ).

a) Déterminons  $P_s$  (voir le calcul en annexe [1] )

Or, on sait que :

$$P_{dB SPL} = 10 * \log_{10} \left( \frac{P_s}{S_w} \right)$$

Donc :

$$P_s = 10^{\frac{P_{dB SPL}}{10}} * S_w$$

Après calculs, nous en déduisons que :

$$P_s = 10^{\frac{6-30}{10}} = 10^{-2,4}$$

$$P_s \approx 3,99 * 10^{-3} W$$

b) Déterminons  $SNR_{dB}$  (voir le calcul en annexe [2] )

D'après le résultat précédent, on obtient

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left( \frac{10^{\frac{g_{dB}}{20}} * 10^{\frac{P_{dB SPL} + S_{dB}}{10}}}{\frac{q^2}{12}} \right)$$

c) Déterminons  $q$  (voir le calcul en annexe [3] )

Comme

$$SNR_{dB} \geq 60$$

On en déduit

$$q \leq \sqrt{\frac{12 * 10^{\frac{20}{20}} * 10^{\frac{6+(-30)}{10}}}{10^6}}$$

Soit

$$q \leq 6.91 * 10^{-4}$$

d) Déterminons  $b$  (voir le calcul en annexe [4] )

Comme

$$2^{b-1} < \frac{A}{q} < 2^{b-1}$$

On obtient finalement

$$b = 13$$



### 3. Débit du signal numérique (voir le calcul en annexe [5])

Le débit du signal numérique étant relié à la fréquence d'échantillonnage et du pas de quantification. Nous partons ainsi de la formule suivante puisque les paramètres sont connus (grâce à nos précédents calculs)

$$D = Fe * b$$

Et nous déterminons finalement après calculs :

$$D = 521,3 \text{ kbits.s}^{-1}$$

**PS :** Les détails du calcul sont disponibles en annexe.

### 4. Capacité de stockage (voir le calcul en annexe [6])

On a un débit de 521 kbits/s. Ainsi pour enregistrer une heure d'audio (soit 3600 secondes) monophonique, il nous faut donc  $521 * 3600$  Kbits.

$$C = D * 3600 \quad (\text{en mono})$$

$$C = D * 3600 * 2 \quad (\text{en stéréo})$$

Pour un son stéréophonique (dit « son stéréo ») il faut multiplier cette capacité de stockage par 2. On trouve donc une capacité de stockage d'environ 3,75 Gbits pour ce dernier cas.

$$C = 1,875 \text{ Gbits} \quad (\text{en mono})$$

$$C = 3,75 \text{ Gbits} \quad (\text{en stéréo})$$

**PS :** Les détails du calcul sont disponibles en annexe.

### 5. Compatibilité des paramètres sur un CD ?

Pour un CD on a :

- une fréquence d'échantillonnage de  $F_e = 44,1 \text{ kHz}$
- un codage sur 16 bits
- débit de gravure de 0.35 Mo

Tout d'abord la fréquence d'échantillonnage du CD est supérieure à celle du signal numérique il n'y aura donc pas de perte de qualité. De plus on pourrait encore améliorer la qualité de l'enregistrement en améliorant le CD, (blu-ray). Les harmoniques chez un CD seront entendables de 20 Hz à 20 kHz, les valeurs de fréquences de l'enregistrement seront alors respectées. On a  $D = 521 \text{ kbits/s}$ . On est en stéréo donc le débit par définition selon les paramètres serait de :

$$2 * D / 8 = 2 * 521 / 8 = 130 \text{ ko/s}$$



Ce qui fait 0.130Mo/s de débit. Or,  $0,35 > 0,13$ .  
Ainsi les paramètres du CD permettent d'enregistrer le signal reçu par le microphone.

Par ailleurs, on peut également déterminer le temps nécessaire pour graver le disque serait :

$$(3,75 \times 100) / 8 = 469$$
$$469 / 0,35 = 1640 \text{ s} = \text{22 min}$$

Ainsi on obtient un temps total de 22 minutes pour graver le disque sur notre CD.

### III. EXPERIMENTATIONS

#### 1. Rappel de la problématique

Pour caractériser un instrument, il faut regarder non seulement le fondamental mais aussi d'étudier les harmoniques de ce signal. Puisque nous nous intéressons essentiellement aux harmoniques quel que soit la puissance prononcée par l'instrument. Ce sera donc le facteur clé qui fera la différence de l'identification dans notre programme.

L'idée étant que de faire l'étude sur le spectre obtenu et de s'interroger sur si nous avons bien obtenue toutes les informations nécessaires pour que restituer correctement le signal avec un minimum de pertes. De sorte que ces pertes n'impactent pas l'identification de l'instrument en question.

Prenons par exemple un fichier audio d'un piano ou d'un violon, puis avec notre programme, nous devrions être en mesure d'identifier l'instrument à l'issue de l'étude porté sur son spectre (et particulièrement sur les harmoniques).

Avant cela, nous souhaitons dans un premier temps répondre à la solution de façon théorique. En effet, nous nous baserons sur les données connues grâce aux recherches sur internet pour déterminer si l'enregistrement est possible ou non dans le cadre d'un orchestre symphonique. Puis nous procéderons à une double vérification par le biais de notre programme (dans la partie pratique). Ceci nous permettra d'assurer en quelque sorte notre résultat expérimental avec celui déterminé de façon théorique.

## 2. Notre réponse

### a. Solution théorique

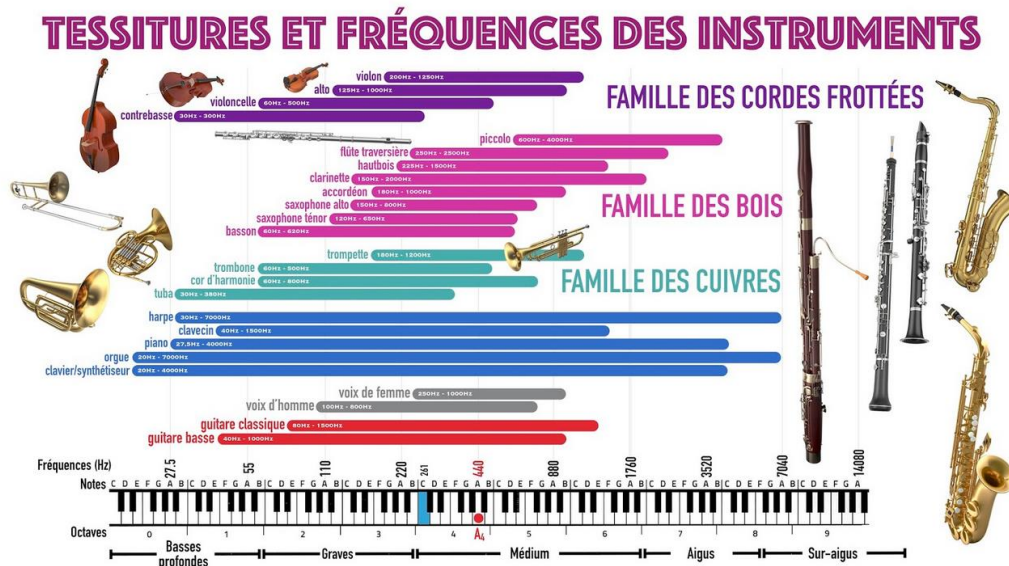


Figure 5 : Image illustrant les tessitures et fréquences des instruments

Pour rappel, nous aimerions savoir si le micro, réglé avec les paramètres détaillés précédemment, peut enregistrer un orchestre symphonique.

Sachant que la bande passante du micro est comprise entre 200 Hz et 20 kHz, nous savons que le micro peut enregistrer tous les sons aigus puisque les sons audibles sont inférieurs à 20 kHz.



Figure 6 : La famille des cordes frottées



Figure 7 : La famille des bois



Figure 8 : La famille des cuivres



Figure 9 : Les instruments autres

Cependant au niveau des sons graves, beaucoup d'instruments produisent des sons inférieurs à 200 Hz, comme la contrebasse qui peut aller jusqu'à 30 Hz ou alors l'orgue qui peut aller jusqu'à 20 Hz et donc le micro serait incapable d'enregistrer ces sons.

Ainsi, la bande passante du micro ne va pas assez loin au niveau des sons graves pour pouvoir enregistrer tous les instruments d'un orchestre symphonique.

Fréquences des notes (en hertz) dans la gamme tempérée

Note/octave	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
do ou si <sup>b</sup>	16,35	32,70	65,41	130,81	261,63	523,25	1046,50	2093,00	4186,01	8 372,02	16 744,04
do <sup>♯</sup> ou ré <sup>b</sup>	17,33	34,65	69,30	138,59	277,18	554,37	1108,73	2217,46	4434,92	8 869,84	17 739,68
ré	18,36	36,71	73,42	146,83	293,66	587,33	1174,66	2349,32	4698,64	9 397,28	18 794,56
ré <sup>♯</sup> ou mi <sup>b</sup>	19,45	38,89	77,78	155,56	311,13	622,25	1244,51	2489,02	4978,03	9 956,06	19 912,12
mi ou fa <sup>b</sup>	20,60	41,20	82,41	164,81	329,63	659,26	1318,51	2637,02	5274,04	10 548,08	21 096,16
fa ou mi <sup>♯</sup>	21,83	43,65	87,31	174,61	349,23	698,46	1396,91	2793,83	5587,65	11 175,30	22 350,60
fa <sup>♯</sup> ou sol <sup>b</sup>	23,13	46,25	92,50	185,00	369,99	739,99	1479,98	2959,96	5919,91	11 839,82	23 679,64
sol	24,50	49,00	98,00	196,00	392,00	783,99	1567,98	3135,96	6271,93	12 543,86	25 087,72
sol <sup>♯</sup> ou la <sup>b</sup>	25,96	51,91	103,83	207,65	415,30	830,61	1661,22	3322,44	6644,88	13 289,76	26 579,52
la	27,50	55,00	110,00	220,00	440,00	880,00	1760,00	3520,00	7040,00	14 080,00	28 160,00
la <sup>♯</sup> ou si <sup>b</sup>	29,14	58,27	116,54	233,08	466,16	932,33	1864,66	3729,31	7458,62	14 917,24	29 834,48
si ou do <sup>♯</sup>	30,87	61,74	123,47	246,94	493,88	987,77	1975,53	3951,07	7902,13	15 804,26	31 608,52

Figure 10 : Tableau de fréquence des notes (en Hz)

Par ailleurs, on remarque que pour toutes les notes dont la fréquence ne rentrant pas dans l'intervalle de la bande passante imposée par la consigne, ne seront donc pas prise en compte par le microphone.

## b. Solution pratique

Au départ, nous n'avons pas bien compris l'objectif de cette partie, puisque nous comptons initialement différencier deux instruments par l'intermédiaire de l'étude sur seulement la première harmonique. Mais grâce aux bons conseils de notre professeur, nous avons compris que cette seule étude ne suffisait pas et qu'il fallait vraiment porter l'étude sur tout le spectre en général et essentiellement sur les harmoniques de ce signal.

D'où la raison pour laquelle notre programme MatLab comme évoqué précédemment a pour but de mettre en évidence les valeurs de calcul. Et permet l'affichage de spectre après normalisation du spectre en faisant en sorte que l'harmonique dont la valeur est la plus importante soit égale à 1. Dans l'objectif de pouvoir comparer toutes les autres harmoniques entre elles afin d'identifier l'instrument. Autrement dit montrer que le timbre du signal audio donné, soit identifiable et que l'on puisse donner le nom de l'instrument en question.

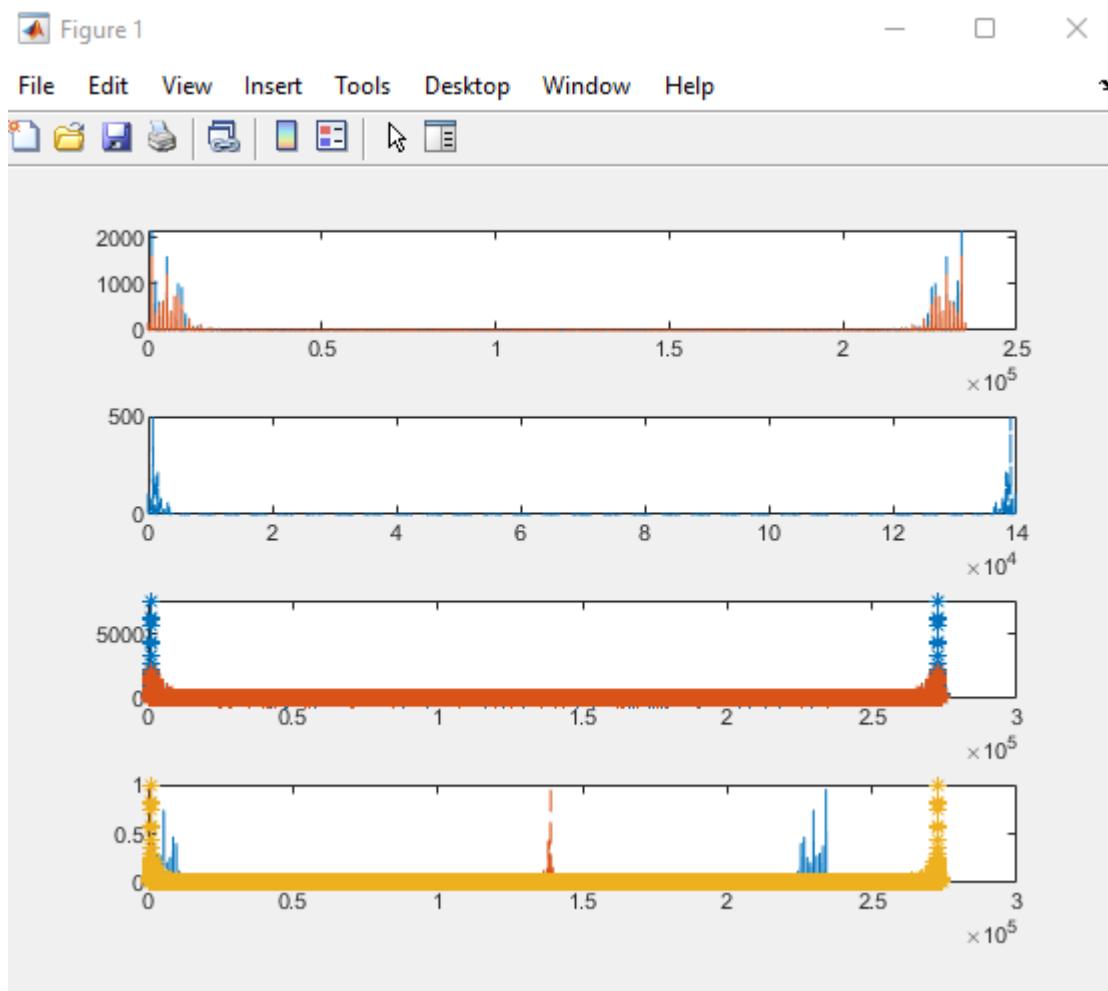


Figure 11 : Graphe du spectre des signaux audios

- Le 1<sup>er</sup> signal correspond à une note de Violon
- Le 2<sup>ème</sup> signal correspond à une note de Guitare



- Le 3<sup>ème</sup> signal correspond à une note de Piano

On remarque bien que ces 3 spectres sont différents, ceci se traduit par le fait que les harmoniques sont propres aux différents instruments cités précédemment.

Ainsi nous avons pu dissocier grâce aux harmoniques que ces 3 signaux ne sont pas réalisés par le même instrument.



## IV. CONCLUSION

Pour conclure, à partir des données de l'énoncé, nous avons réussi à déterminer l'ensemble des paramètres de notre cas d'étude.

- Fréquence d'échantillonnage
- Puissance
- Pas de quantification
- Nombre de bits pour le codage

Le paramètre qui nous aurait pu porter défaut / problème serait la précision portée sur le pas de quantification. Puisque nous nous sommes contentés de prendre seulement la valeur maximale de ce paramètre. Ce qui nous a permis de déduire les autres indicateurs de performances propres au signal choisi suivants :

- Le débit du signal numérique
- La capacité de stockage pour enregistrer une heure d'audio en stéréo

De ces résultats, nous avons pu bénéficier d'une idée plus claire sur les paramètres qu'on a déterminé pour les indicateurs de performance :

- Aussi bien sur la compatibilité de nos paramètres avec un CD
- Et puis de la question sur l'enregistrement de l'orchestre symphonique

Nous avons eu quelques incompréhensions vis-à-vis de la consigne au départ, mais grâce aux bons conseils de notre professeur, nous avons su « retrouver le bon chemin » et proposer cette solution (cf notre code).

Ainsi, nous avons également pu nous pencher davantage sur cette dernière problématique en visualisant la situation de manière théorique grâce aux données connus sur le web. Puis en le mettant en évidence à travers notre algorithme (code MatLab) : en différenciant les spectres d'une note provenant d'instrument tous différents (Violon, Guitare, puis Piano).

En effet, à l'issue de l'obtention des résultats, nous remarquons bien cette différence exprimée par l'aspect du spectre de chaque note, et plus particulièrement des harmoniques normalisées.

Voici un aperçu de notre raisonnement complet qui sera illustré sous forme de schéma fonctionnel :



## V. ANNEXE

### 1. Calcul de $P_s$

On sait que :

$$P_{dB SPL} = 10 * \log_{10} \left( \frac{P_s}{S_w} \right)$$

Donc :

$$P_s = 10^{\frac{P_{dB SPL}}{10}} * S_w$$

Soit :

$$P_s = 10^{\frac{P_{dB SPL}}{10}} * 10^{\frac{S_{dB}}{10}}$$

Et enfin :

$$P_s = 10^{\frac{P_{dB SPL} + S_{dB}}{10}}$$

En remplaçant par les valeurs numériques données par l'énoncé, nous trouvons :

$$P_s = 10^{\frac{6-30}{10}} = 10^{-2,4}$$

$$P_s \approx 3,99 * 10^{-3} \text{ W}$$

### 2. Calcul de $SNR_{dB}$

On part de cette formule :

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left( \frac{G * P_s}{P_b} \right)$$

D'après le résultat précédent on a :

$$P_s = 10^{\frac{P_{dB SPL} + S_{dB}}{10}} \text{ et } P_b = \frac{q^2}{12}$$

De plus,

$$G = 10^{\frac{g_{dB}}{20}}$$

Ainsi en insérant les précédentes expressions, nous en déduisons l'égalité suivante :

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left( \frac{10^{\frac{g_{dB}}{20}} * 10^{\frac{P_{dB SPL} + S_{dB}}{10}}}{\frac{q^2}{12}} \right)$$



### 3. Calcul de q

Nous savons que

$$SNR_{dB} = 10 * \log_{10} \left( \frac{10^{\frac{G}{20}} * 10^{\frac{P_{dB SPL} + S_{dB}}{10}}}{\frac{q^2}{12}} \right)$$

Or, d'après l'énoncé :

$$SNR_{dB} \geq 60$$

Donc en reprenant l'égalité précédente,

$$10^6 \leq \frac{12 * 10^{\frac{G}{20}} * 10^{\frac{P_{dB SPL} + S_{dB}}{10}}}{q^2}$$

$$q \leq \sqrt{\frac{12 * 10^{\frac{20}{20}} * 10^{\frac{6 + (-30)}{10}}}{10^6}}$$

Enfin,

$$q \leq 6.91 * 10^{-4}$$

### 4. Calcul de b

D'après le cours,

$$2^{b-1} < \frac{A}{q} < 2^{b-1}$$

Comme la dynamique après amplification est de [0-5V], on en déduit que les échantillons seront répartis entre 0V et 5V. Cette amplitude A est égale à 5V. En reprenant ainsi la valeur max de q, trouvé précédemment, ainsi que la valeur de A dans l'expression de l'inégalité. Nous en déduisons l'encadrement suivant :

$$2^{b-1} < 7233 < 2^b$$

Or, seule cette possibilité semble respecter la condition d'inégalité :

$$2^{12} = 4096 \quad \text{et} \quad 2^{13} = 8192$$

Ainsi, on en déduit que b = 13 par identification.

Autrement, dit, cela est codé sur 13 bits.



## 5. Calcul du débit du signal numérique

On sait que :

$$D = Fe * b$$

En remplaçant par les valeurs numériques on obtient

$$D = 40,1 * 10^3 * 13$$

Après calculs,

$$D = 521\,300 \text{ bits.s}^{-1}$$

$$\text{soit } D = 521,3 \text{ kbits.s}^{-1}$$

## 6. Capacité de stockage

On sait précédemment que

$$D = 521,3 * 10^3 \text{ bits.s}^{-1}$$

Or, on sait que

$$C = D * 3600 \quad (\text{en mono})$$

$$C = D * 3600 * 2 \quad (\text{en stéréo})$$

Ainsi, on en déduit les valeurs suivantes :

$$C = 521,3 * 10^3 * 36000 (* 2)$$

On obtient finalement :

$$C = 1,875 \text{ Gbits (en mono)}$$

$$C = 3,75 \text{ Gbits (en stéréo)}$$

## 7. Mode d'emploi

(Mode d'emploi de notre code sur le logiciel MatLab)

### PS :

- Il est nécessaire de bien vérifier que nos fichiers d'audio soient dans le même répertoire (même dossier).
  - Nous avons également déposé quelques commentaires sur le code pour vous guider de manière optimale. Vous pourrez donc suivre les consignes indiquées.
- 
1. Ouvrir le fichier « Problem3CodeFinal.m » sous le logiciel MatLab.
  2. Changer la source du fichier (voir ci-dessous pour l'emplacement indiqué en vert), insérer le nom complet du signal audio que l'utilisateur souhaite étudier.
  3. Exécuter le code
  4. Changer les valeurs numériques des différents paramètres pour tester le programme

## VI. BIBLIOGRAPHIE

[1] : Moodle ISEP : <https://moodle.isep.fr/moodle/my/>

[2] : Principe de la numérisation : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Num%C3%A9risation>

[3] : Image des tessitures & fréquences des instruments : <https://www.bertet-musique.com/lecons-musique/251-tessiture-frequences-instruments>

[4] : Information sur le CD : <https://fr.wikipedia.org/wiki/CD-ROM>

## VII. TABLE DES FIGURES

### Table des figures

FIGURE 1 : SCHEMA FONCTIONNEL (INITIAL) .....	5
FIGURE 2 : SCHEMA FONCTIONNEL DU PROBLEME (FINAL) .....	6
FIGURE 3 : SYNTHESE DE NOTRE RAISONNEMENT POUR LE CAS D'ÉTUDE .....	7
FIGURE 4 : SCHEMA FONCTIONNEL DE L'INTERET DE NOTRE PROGRAMME MATLAB .....	8
FIGURE 5 : IMAGE ILLUSTRANT LES TESSITURES ET FREQUENCES DES INSTRUMENTS .....	13
FIGURE 6 : LA FAMILLE DES CORDES FROTTES .....	13
FIGURE 7 : LA FAMILLE DES BOIS .....	13
FIGURE 8 : LA FAMILLE DES CUIVRES .....	14
FIGURE 9 : LES INSTRUMENTS AUTRES .....	14
FIGURE 10 : TABLEAU DE FREQUENCE DES NOTES (EN Hz) .....	14
FIGURE 11 : GRAPHE DU SPECTRE DES SIGNAUX AUDIOS .....	15
FIGURE 12 : SCHEMA BILAN DE NOTRE ÉTUDE .....	18

---