Professeurs encadrants : M. Rémi BARDUCA
M. Sylvain GROLLAU

Elèves participants : M. Florian ALLOUCHE
M. David CORIAT
M. Hadrien BENSE

Sujet :

COMMENT LES TUYAUX RESONNENT-ILS?

Remerciements

Pour la réalisation de notre projet, tous nos plus sincères remerciements vont :

- A nos professeurs, qui ont su nous encadrer et nous guider dans notre travail.
- Au laboratoire de mécanique et d'acoustique du Centre National de Recherche Scientifique, et tout particulièrement à Philippe Guillemain pour nous avoir accueilli.
- A nos parents, qui nous ont permis de nous rendre à Marseille pour aller au Centre National de Recherche Scientifique.
- A tous les membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Résumé de notre travail.

Notre TPE de classe première portait sur le nombre d'or, phi, dans la musique, notre but dans ces Olympiades était de poursuivre ce travail. Nous avons donc cherché un projet à la fois intéressant et qui nous était abordable. Après plusieurs séances infructueuses, nous avons abandonné l'idée d'étudier le nombre d'or. Cependant, au travers de nos recherches, nous avions découvert le logiciel Scilab, permettant notamment de modéliser des sons, de là nous est venu l'idée de modéliser un instrument de musique virtuel. Nous avons évidemment choisis des "outils" très accessibles: des tuyaux. Pour modéliser ce son, il nous fallait apprendre comment résonnent les tuyaux, ce qui a été notre principal travail.

Nous nous sommes tout d'abord renseignés sur les instruments de musique, de là nous avons appris que nos tuyaux étaient des résonateurs.

La première chose que nous avons observé est que la hauteur du son semblait varier avec la longueur du tuyau. De la même façon, celle ci variait aussi suivant la manière de frapper le tuyau (en laissant ou en enlevant la main). Cela a donc été le but de notre première expérience: déterminer s'il existait, une relation entre la longueur du tuyau et la hauteur du son; et s'il existait un lien entre la façon de frapper le tuyau et la hauteur du son.
Connaissant maintenant ces relations, on désirait savoir si les tuyaux résonnaient suivant des fréquences spécifiques ou non. Après avoir effectué différentes expériences, nous connaissions les réponses.

Il nous restait une dernière chose à déterminer: le temps caractéristiques des fréquences de résonances que nous avions trouvé précédemment. Ceux ci connus, nous avions toutes les données nécessaires pour modéliser un son, cela a donc été la dernière partie de notre travail.

Nous avons construit un programme, sur le logiciel scilab, contenant les différentes caractéristiques découvertes au fil de notre travail. La modélisation ressemblait beaucoup à ce que nous entendions en frappant sur les tuyaux.
Puis, nous avons modifié quelques caractéristiques sur scilab, afin de voir leurs influences sur le son produit.

En dernier lieu, nous avons crée un "instrument de musique virtuel", c'est à dire que nous avons produits différentes notes, grâce au logiciel. Puis nous les avons mises bout à bout afin de former une comptine. Nous avons fait cela avec chacune des modifications faites précédemment.

Table des matières

A) Les instruments de musique.

1) Ondes sonores et pression acoustique.

2) Les instruments.
    a) Les instruments a cordes.
    b) Les instruments a vents.
    c) Le résonateur.

B) Etude détaillée d'une cavité résonnante.

1) Relation entre la longueur du tuyau et la fréquence du fondamental.
    a) Cas ouvert fermé.
    b) Cas ouvert ouvert.

2) Mise en évidence des modes propres (ou harmoniques, ou partiels).
    a) Régime forcé.
    b) Régime libre.

3) Temps de relaxation des modes propres.
    a) Cas ouvert fermé.
    b) Cas ouvert ouvert.
    c) Commentaires des résultats expérimentaux.

C) Simulation numérique du son produit par un tuyau.

1) Modification de l'amplitude initiale des harmoniques.

2) Modification des temps de relaxation.

3) Modification de la fréquence du fondamental.

D) Simulation d'un instrument de musique.

1) Cas d'un instrument à percussion.

2) Cas d'un instrument à cordes.

3) Cas d'un instrument à vent.

Annexe

Bibliographie

A) Les instruments de musique.

1) Ondes sonores et pression acoustique.

Le son est une onde sonore, c'est une perturbation du milieu qui se propage de proche en proche. Les ondes sonores se propagent dans un milieu et notamment dans l'air, qui est un milieu élastique, en faisant vibrer les tranches d'air. Lorsqu'une tranche d'air vibre, sa pression est modifiée, c'est ce que l'on nomme la pression acoustique, c'est-à-dire que chaque tranche d'air se met à osciller avec une certaine vitesse.

2) Les instruments.

Dans un instrument acoustique, le son est produit par un système mécanique vibrant; on distingue deux types d'instruments:

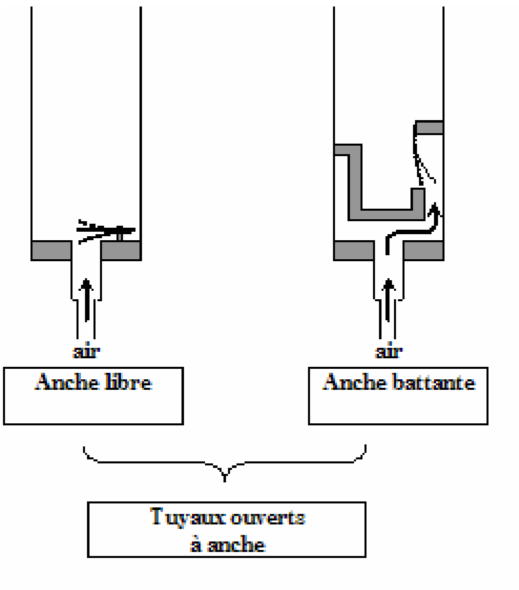
a) Les instruments à corde.

Dans ce cas, le système mécanique est une corde tendue vibrant entre deux points fixes. Cette vibration peut être obtenue de différentes manières par l'action du musicien, il peut pincer la corde avec ses doigts (guitare), la frotter avec un archet (violon) ou encore la frapper avec des marteaux (piano). La fréquence du son est imposée par ce système mécanique vibrant. Ce système se nomme excitateur.

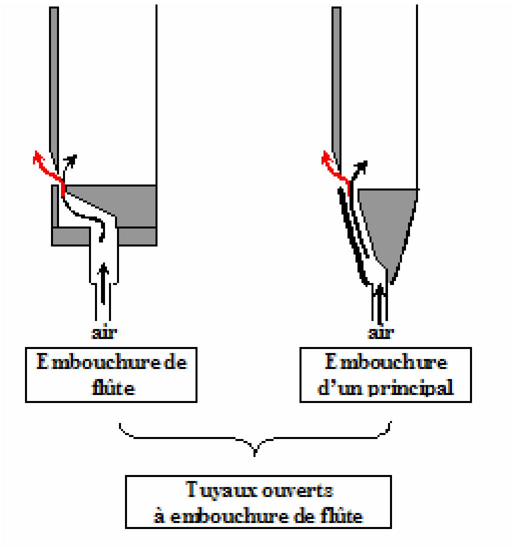
b) Les instruments à vent.

Ceux-ci possèdent différents types de système mécanique vibrant:

-Les instruments à anche simple tels que le saxophone sont pourvus d'une mince lame fixée à leur bec. Le son est alors produit par la lame qui vibre grâce au souffle du musicien.



-Les instruments tels que l'orgue acoustique, la flûte à bec possèdent un biseau servant à former un jet d'air plat qui sort par un orifice, appelé lumière, et entre dans le corps de l'instrument.



-Les instruments à percussions produisent un son qui résulte de la frappe ou d'un grattage d'une membrane ou d'un matériau résonnant. Par exemple, dans le cas d'un tambour, la frappe d'une peau tendue sur un fût, avec les mains, entraînent la vibration des tranches d'air, c'est-à-dire un son, qui est ensuite amplifié par une caisse de résonance.

c) Le résonateur.

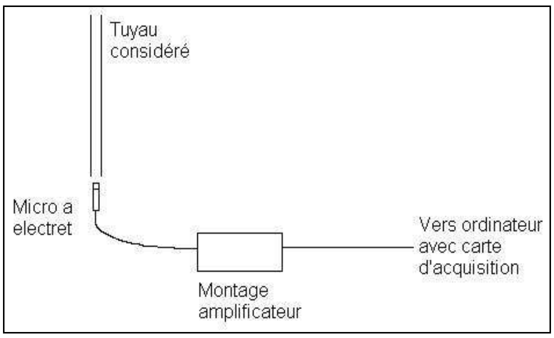
Cependant la corde vibrante n'est pas suffisante pour produire un son audible. En effet, ses vibrations ne sont pas en mesure de donner une amplitude suffisante aux vibrations de l'air, c'est pourquoi il faut une caisse de résonance pour la guitare et le violon par exemple.
Pour les instruments à vent c'est le corps de l'instrument qui sert de caisse de résonance, la colonne d'air qui se trouve à l'intérieur est mise en vibration par le système mécanique décrit plus haut.

Le couplage caisse de résonance/air ambiant permet alors d'obtenir un son audible. Ainsi les couplages systèmes mécaniques vibrant/caisse de résonance puis caisse de résonance/air ambiant permettent à un instrument de musique de produire un son audible. Dans la suite de notre travail, nous ne nous intéresserons qu'au résonateur, à savoir, le tuyau.

B) Etude détaillée d'une cavité résonnante.

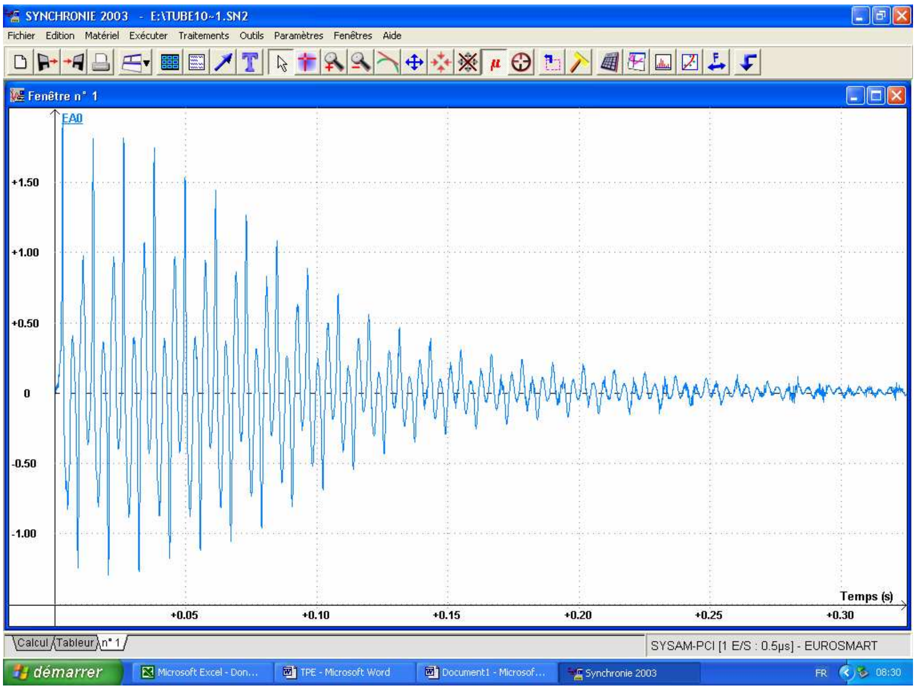
1) Relation entre la longueur du tuyau et la fréquence du fondamental.

Lorsque l'on frappe sur un tuyau, on s'aperçoit que la hauteur du son dépend de la longueur du tuyau. Plus le tuyau est long, plus le son est grave.
Pour un même tuyau, on s'aperçoit également que la hauteur du son dépend de la façon dont on frappe. Si on frappe le tuyau en laissant la main sur l'ouverture, le son produit sera plus grave que si on le frappe en l'enlevant immédiatement.
Le montage expérimental est le suivant :



a) Cas ouvert fermé.

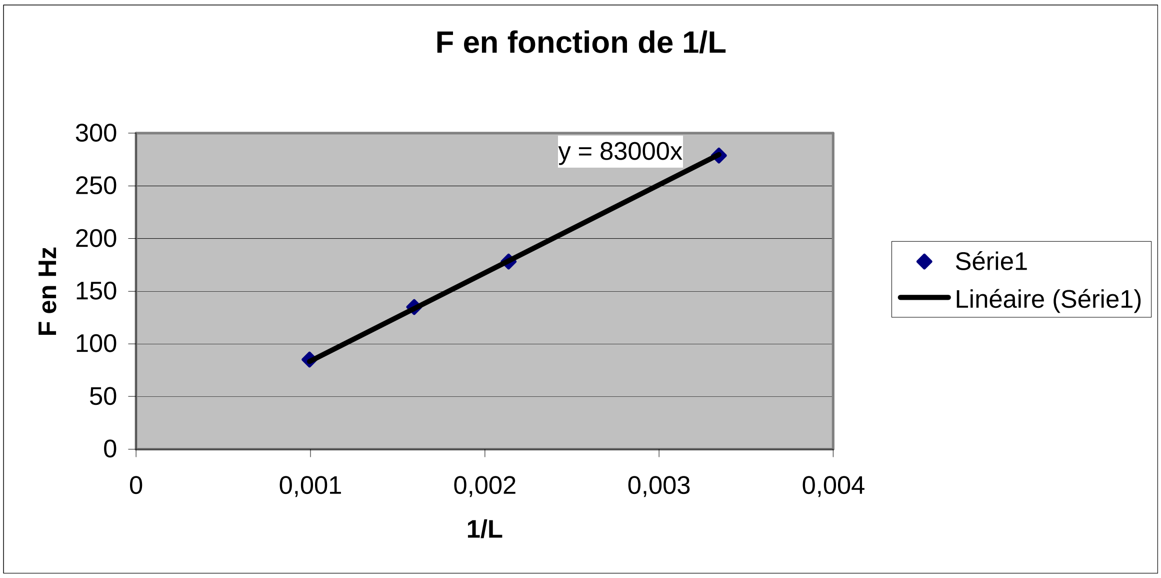
Dans le cas d'un tuyau de 1005mm, l'enregistrement est le suivant :



On mesure une fréquence F= 85 Hz pour un tuyau de longueur L=1005mm.
Les autres résultats sont portés dans le tableau suivant:

Longueur du tuyau L en mm.	1005	627	468	299
Fréquence F en Hz.	85	135,76	178,66	279,32

La représentation de F en fonction de 1/L est une droite d'équation F = 83658*1/L. Le coefficient directeur de cette droite est donc 83658mm/s.

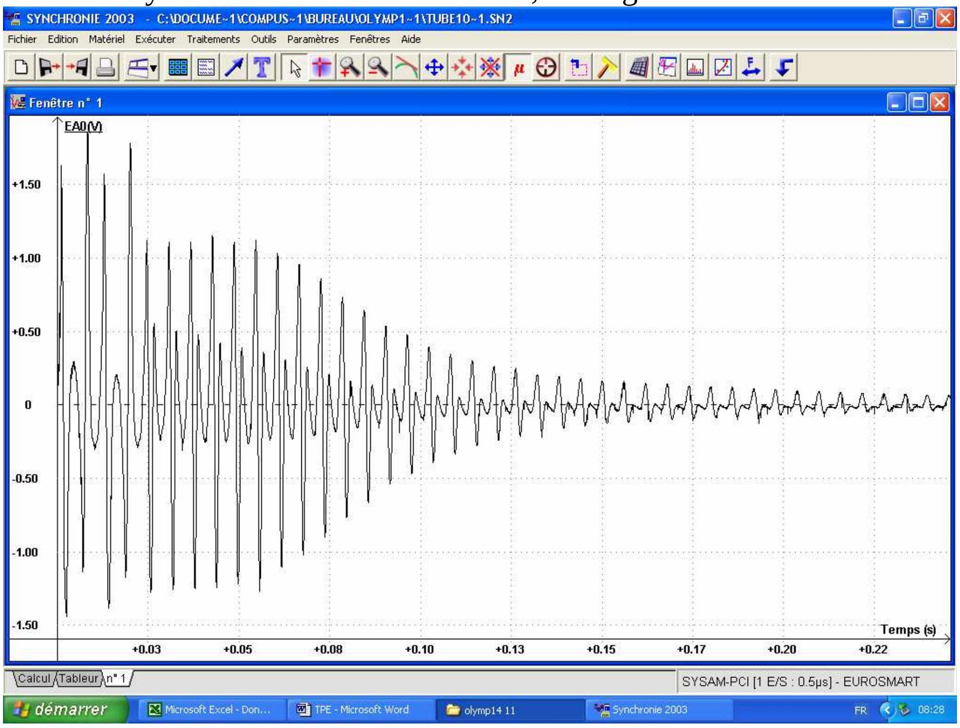


La théorie montre que F=v/(4L) où v est la vitesse du son et L la longueur du tuyau.
L'unité du coefficient directeur correspond à des Hz divisés par des mm^(-1), c'est-à-dire à une vitesse en mm/s.
Le coefficient directeur vaut donc : v/4=83658mm/s=83.7m/s donc v=335m/s. Or l'expression théorique de la vitesse est $v=(1.4*R*T/M)^{1/2}$. Et ce jour la, nous avons mesuré un température T=25°C=298K, la vitesse théorique est donc v=346m/s.
L'écart relatif à la valeur théorique est de (346-335)/346=0.03.

Dans le cas d'un tuyau ouvert/fermé, la relation liant la longueur L du tube et la longueur d'onde lambda de l'onde est:$L=(2n+1)*\lambda_n/4$ soit: $L=(2n+1)v*T_n/4$ avec v la vitesse de l'onde et T_n sa période.
On a donc : $T_n=4L/(2n+1)v= (2n+1)T_1$.
Soit F la fréquence de l'onde on a: $F_n= (2n+1)v/4L=F_1*(2n+1)$ ainsi on trouve que $F_n=(2n+1)F_1$
On peut déduire de cette relation que lorsque le tuyau est fermé à une extrémité et ouvert à l'autre, il ne résonne que pour des harmoniques de rangs impairs.
Et on retrouve bien l'équation de la droite linéaire ci-dessus : $F=F_1=v/(4L)$.

b) Cas ouvert ouvert.

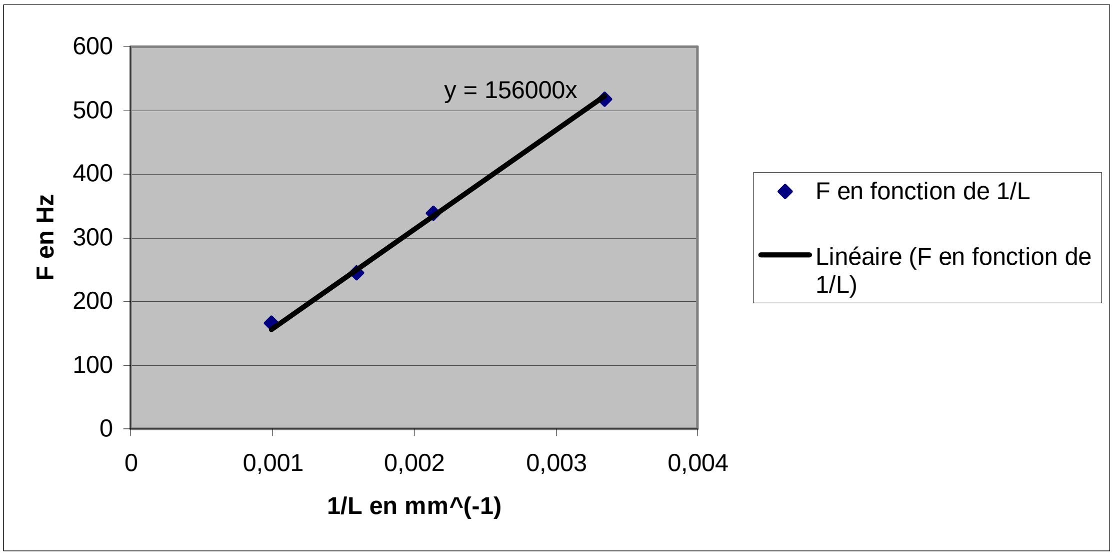
Dans le cas d'un tuyau ouvert/ouvert de 1005mm, l'enregistrement est le suivant :



La fréquence dans ce cas est 166Hz. Les autres résultats sont portés dans le tableau suivant :

Longueur du tuyau en mm.	1005	627	468	299
Fréquence F en Hz.	166	245	339	518

La représentation de F en fonction de 1/L est la suivante :



La théorie montre que F=v/(2L) où v est la vitesse du son et L la longueur du tuyau.
L'unité du coefficient directeur correspond à des Hz divisés par des mm^(-1), c'est-à-dire à une vitesse en mm/s.
Le coefficient directeur vaut donc : v/2=156221mm/s=156m/s donc v=342m/s. Or l'expression théorique de la vitesse est $v=(1.4*R*T/M)^{1/2}$. Or ce jour la, nous avons mesuré un température T=25°C=298K, la vitesse théorique est donc v=346m/s.
L'écart relatif à la valeur théorique est de (346-342)/346=0.01.
Lorsqu'une onde de célérité v se propage entre 2 points fixes, la longueur L entre les deux points fixes impose un caractère périodique de période T_1= (2L/v) aux allers retours de l'onde.
Lorsqu'une onde sinusoïdale de période T et de longueur d'onde lambda se réfléchit sur deux points fixes il s'établit une onde stationnaire pour laquelle les points fixes correspondent à des noeuds de vibration.
De plus certaines valeurs de la fréquence et donc de la période d'excitation permettent d'observer des fuseaux de grande amplitude. Expliquons ce phénomène :
D'après la relation précédente, chacun des points vibre avec une période de T_1=(2L)/v. En chacun de ces points, 2 ondes donneront la même élongation si le retard entre elles est un multiple de la période T de l'onde soit: $T_n.n=T_1=(2L)/v$
Cette relation peut s'écrire, en utilisant la définition de la longueur d'onde $\lambda_n=v.T_n$
L=n(v*T)/2 soit $L=n*\lambda_n/2$
D'après le paragraphe suivant, la longueur L de la corde impose des valeurs aux fréquences F_n des ondes stationnaires pouvant exister entre deux points fixes.
En effet la relation $T_1=2L/v=nT_n$ peut s'écrire $F_1=v/2L= F_n/n$. C'est cette relation que nous avons mis en évidence dans l'expérience précédente.
En notant $F_n=1/T$ on en déduit que $F_n=n*F_1$
Ainsi, nous voyons bien que lorsque le tuyau est ouvert, ou fermé à ses deux extrémités, celui ci vibre pour des harmoniques de n'importe quelle parité

Ainsi, dans les deux cas, on se rend compte que la représentation de F en fonction de 1/L est une droite linéaire d'équation F= k (1/L).
La hauteur du son dépend donc de la longueur du tuyau. Et comme nous l'avons précédemment dit, plus le tuyau est long, plus la fréquence est faible, donc plus le son est grave.

Pour un même tuyau, la fréquence sera plus élevée donc le son plus aigu dans le cas ouvert/ouvert.

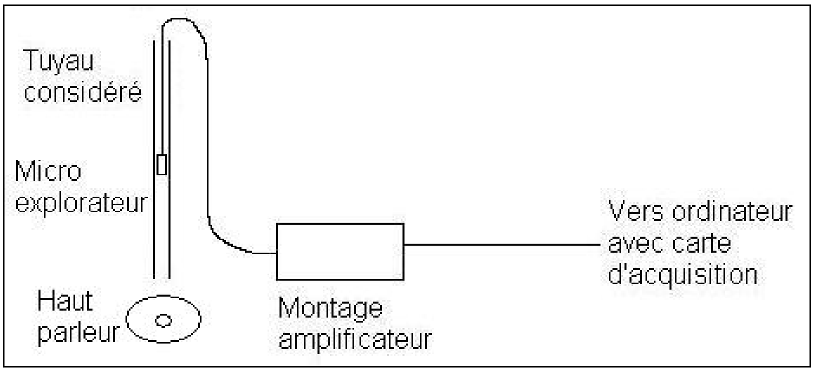
2) Mise en évidence des modes propres (ou harmoniques, ou partiels).

Un mode propre est une fréquence pour laquelle chaque point de la tranche d'air vibrante vibre sinusoïdalement; la colonne d'air à l'intérieur du tuyau résonne.
Sachant cela, nous avons cherché à voir si l'on pouvait en effet observer ces modes harmoniques et si leurs place étaient bien délimitées, et si ceux ci étaient les mêmes en régime libre et en régime forcé.

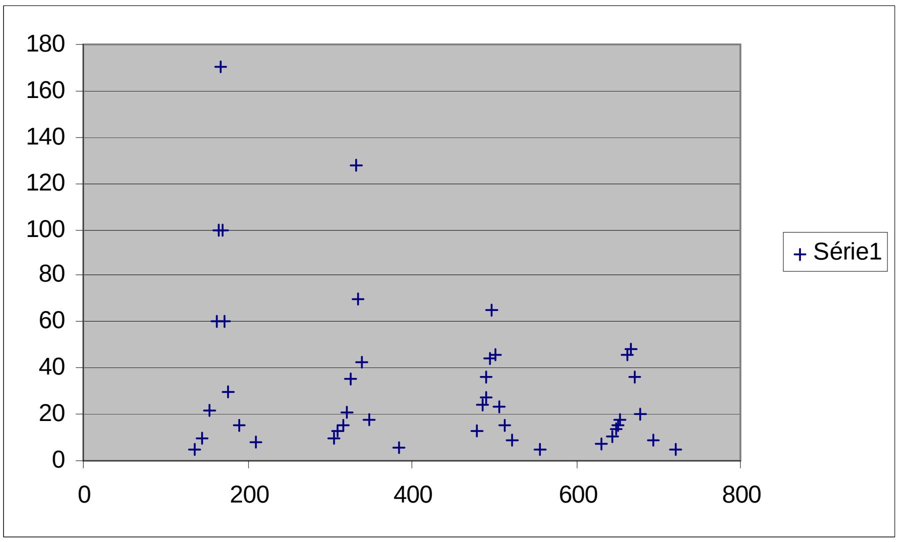
Sachant cela, nous avons cherché à voir si l'on pouvait en effet observer ces modes harmoniques et si leurs place étaient bien délimitées, et si ceux ci étaient les mêmes en régime libre et en régime forcé.

a) Régime forcé

Nous excitons sinusoïdalement l'air contenu dans un tuyau grâce à un haut parleur dont nous contrôlons la fréquence. A l'aide d'un micro explorateur nous sondons l'intérieur du tuyau et, avec un oscilloscope nous mesurons les amplitudes observées.
Le montage expérimental est le suivant :



Voici le graphique correspondant à l'évolution de l'amplitude en fonction de la fréquence :



On observe que pour les fréquences propres du tuyau, on passe par un pic où l'amplitude est maximale. Ainsi, la colonne d'air résonne pour certaines fréquences d'excitation. Ces fréquences sont des multiples entiers de la plus petite fréquence pour laquelle la colonne résonne.

Puis nous sondons le tuyau pour ses différentes fréquences propres :

Pour cette plus petite fréquence, appelée fréquence fondamentale, le micro explorateur permet de détecter un ventre de pression au centre et deux nœuds de pression aux extrémités des tuyaux.

Pour une fréquence égale à deux fois celle du fondamental, on observe deux ventres de pression et trois nœuds de pression.

Pour une fréquence égale à n fois celle du fondamental, on observe n ventres de pression et n+1 nœuds de pression.

A chacune des fréquences précédentes correspond un mode de vibration appelé aussi partiel.

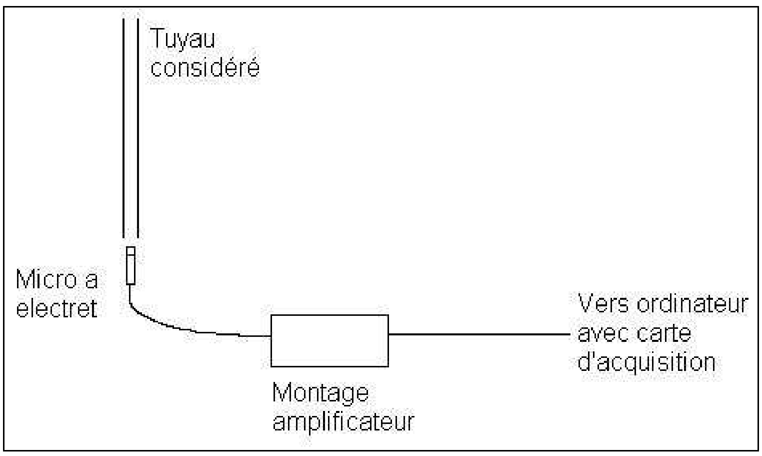
Dans le cas d'un tuyau ouvert/ouvert de longueur L=1005mm on trouve, pour le fondamental une fréquence F=166Hz et pour les harmonique de rang n, Fn=n*166Hz

Cette étude montre que lorsqu'on excite sinusoïdalement une colonne d'air à une fréquence égale à la fréquence d'un de ses modes propres, alors les points vibrent sinusoïdalement avec une amplitude dépendant de leurs positions, ainsi lorsqu'ils sont situés sur un ventre de pression l'amplitude de la pression acoustique est maximale. S'ils sont situés sur un noeud de pression, l'amplitude de la pression acoustique est nulle. On remarque aussi la présence de fuseaux de longueurs égales. L'extrémité d'un fuseau est le noeud de pression, le milieu est un ventre de pression. Pour l'harmonique n, la longueur du fuseau est égale à L/n avec L la longueur de la corde.

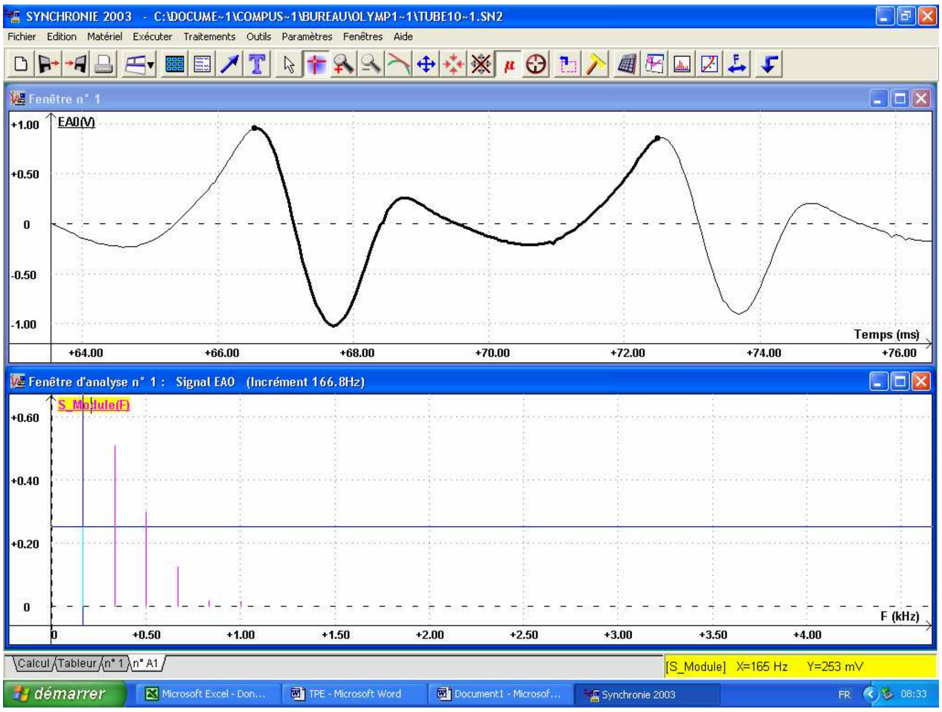
b) Régime libre

En régime libre, nous frappons sur le même tuyau en enlevant rapidement la main, afin d'avoir encore un tuyau ouvert/ouvert. Nous avons enregistré le son obtenu, puis, à l'aide de synchronie nous avons étudié le spectre de quelques alternances.

Le montage expérimental est le suivant :



Pour un tuyau de 1005mm, on obtient l'enregistrement suivant :



Sur le document ci-dessus, le spectre fait bien apparaître les différents modes propres de la colonne d'air. Dans ce cas, la fréquence du fondamental est 166Hz et celle de l'harmonique de rang n Fn=n*166Hz

L'analyse de Fourier permet donc de mettre en évidence les modes propres de vibration en régime libre Il apparaît que les partiels en régime forcé et en régime libre dans le cas d'un tuyau ouvert/ouvert sont les mêmes.

Dans le cas ouvert/fermé, nous n'avons fait que la deuxième expérience plus simple. D'après ce qui précède elle donne les mêmes résultats que l'expérience 1.

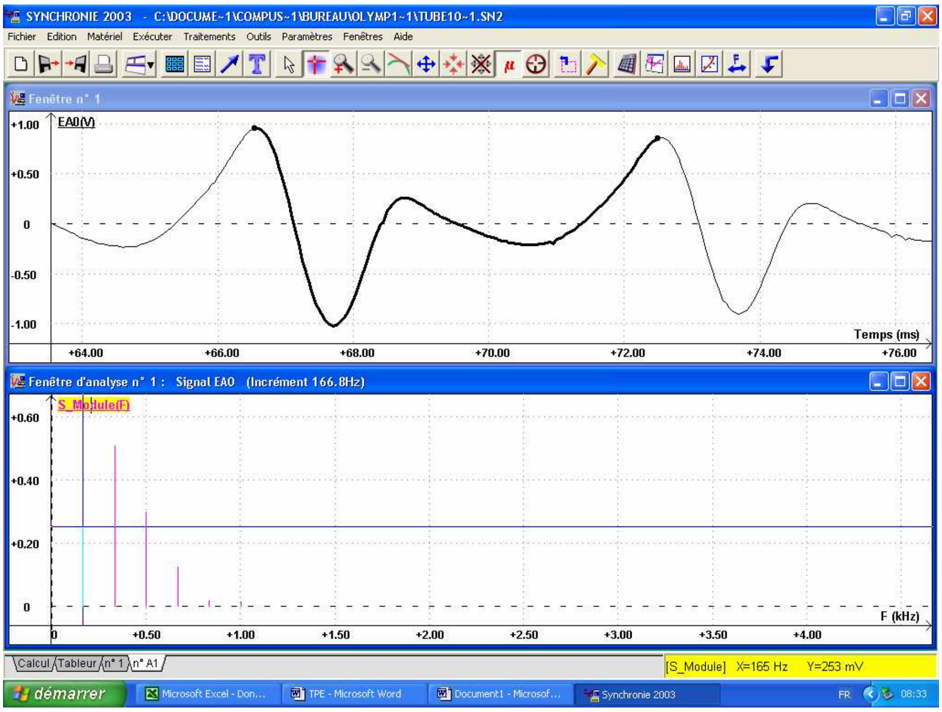
Dans le cas d'un tuyau ouvert/fermé, seuls les harmoniques de rang impairs sont observés.

3) Temps de relaxation des modes propres.

Le temps de relaxation est le temps caractéristique de retourne à l'équilibre d'un système. Dans ce cas, c'est le temps nécessaire pour que l'amplitude de chacun des modes redevienne nulle.
Connaissant maintenant l'existence de ces modes partiels, il nous fallait voir comment ils évoluaient au fil du temps.
Quand on frappe sur le tuyau, le son ne dure pas plus que quelques fractions de secondes. Les partiels s'amortissent donc rapidement dans le temps. On se propose dans la suite de mesurer le temps caractéristique d'amortissement des partiels.
On se place dans le cas particulier de longueur 1005mm que l'on excite dans les deux cas.

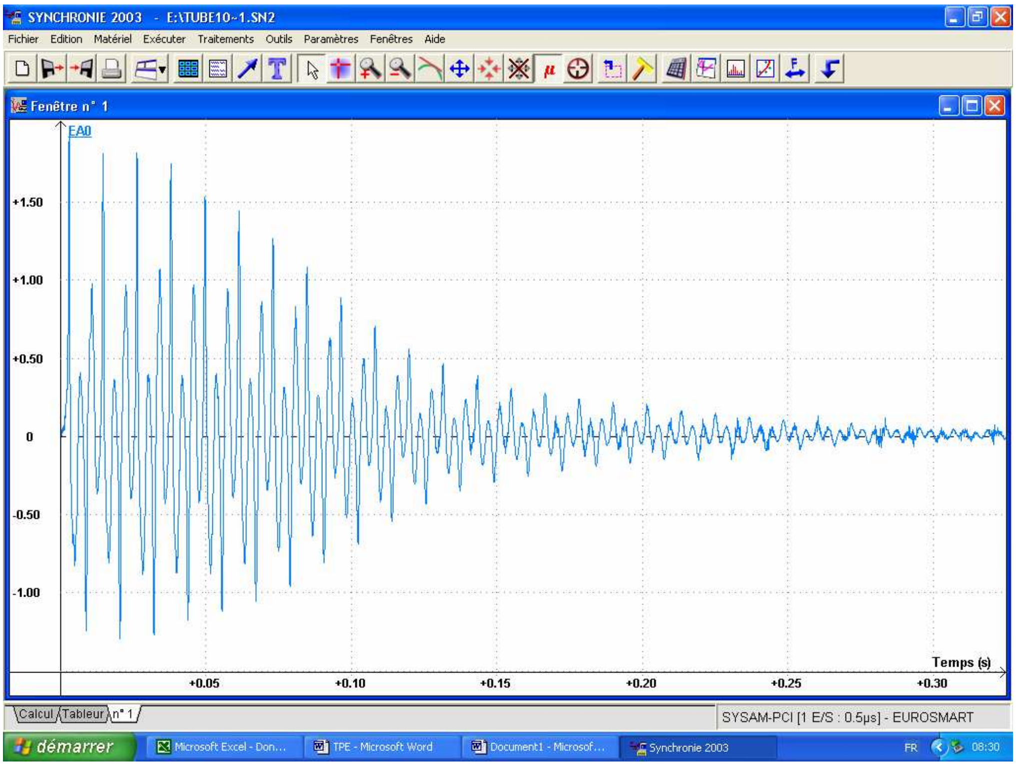
Pour ce faire, que ce soit dans le cas ouvert/ouvert ou ouvert/fermé, nous avons procédé à une décomposition en série de Fourier de chaque alternance du signal, afin d'obtenir les fréquences de chaque mode et l'évolution temporelle de l'amplitude de chaque mode.

Exemple dans le cas ouvert ouvert :



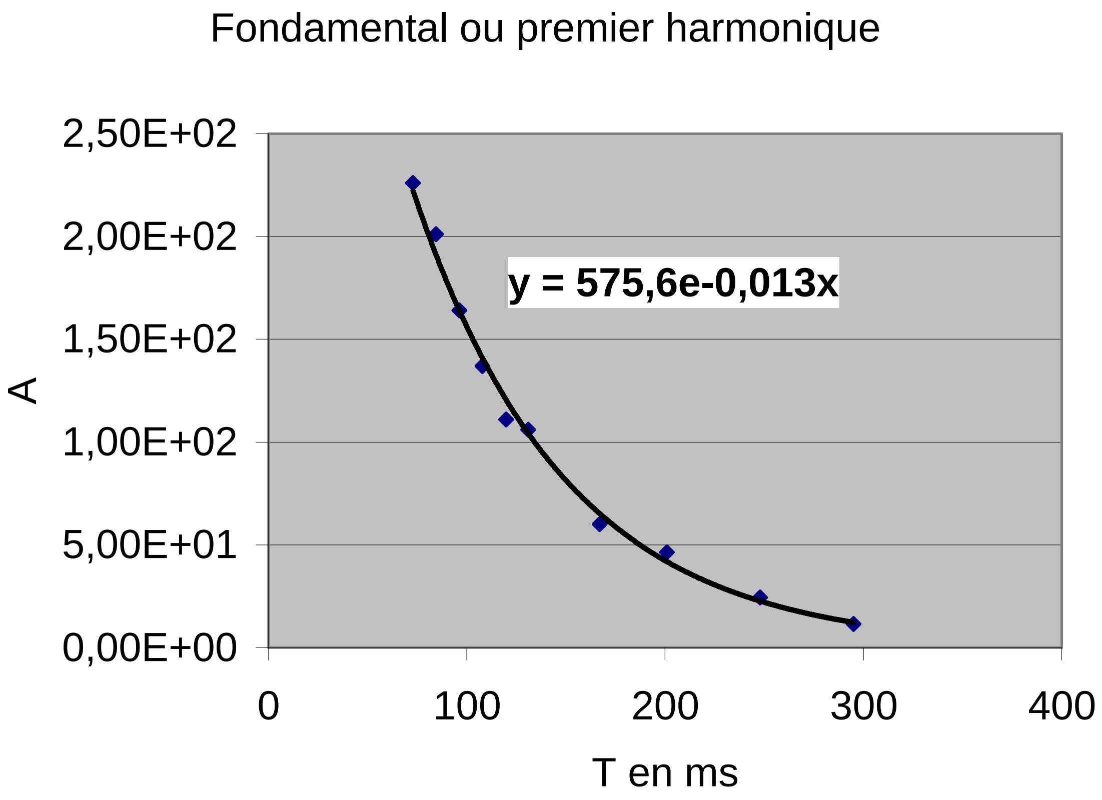
a) Cas ouvert/fermé :

Signal :

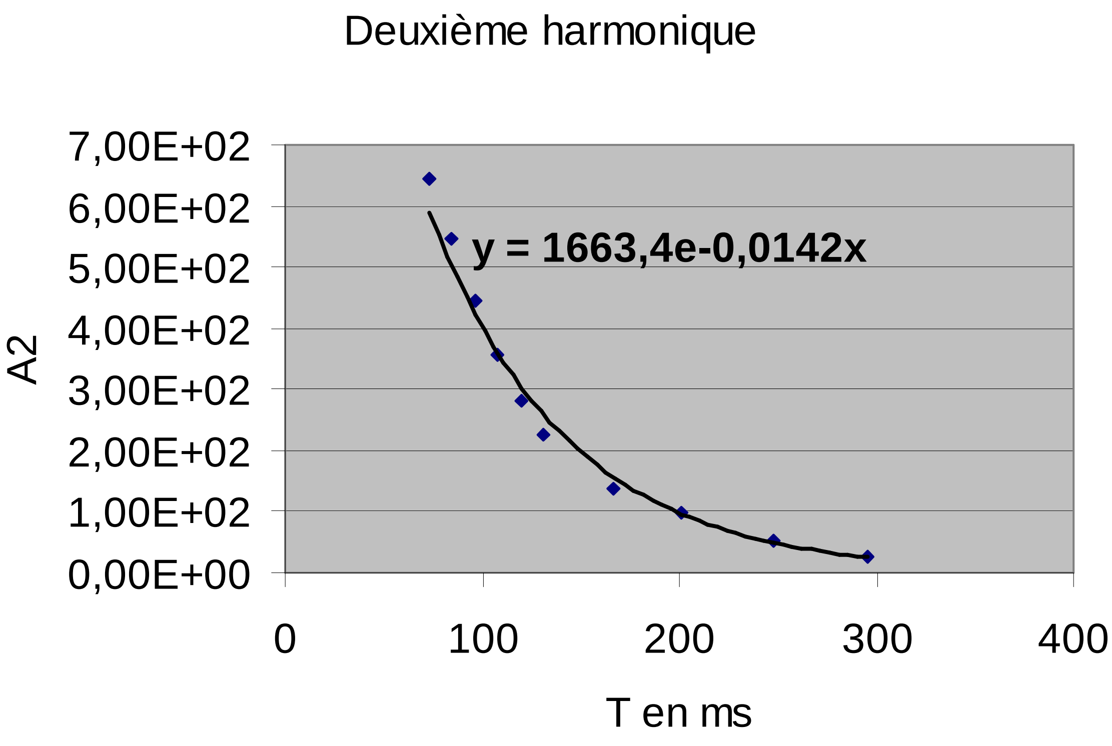


Voici les résultats obtenus.

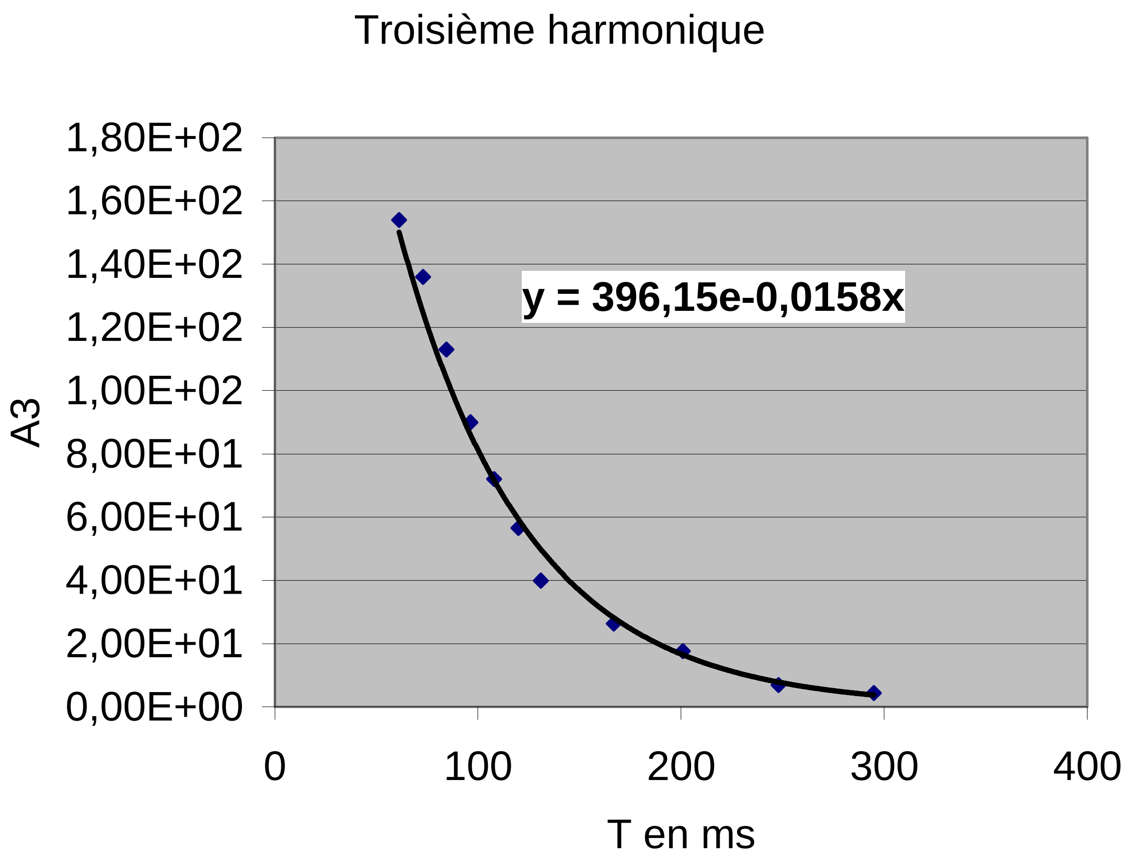
Evolution temporelle de l'amplitude du premier harmonique:



Evolution temporelle de l'amplitude du deuxième harmonique:



Evolution temporelle de l’amplitude du troisième harmonique :



Ce qui nous a donc permis de tracer une courbe de chaque amplitude en fonction du temps, c'est-à-dire d’obtenir une exponentielle décroissante représentant l’évolution temporelle de chaque amplitude. Ainsi, nous avons donc pu calculer les temps de relaxation.

Voici les résultats obtenus :

τ (A1)= 1/0.013= 76.9ms

τ (A2)= 1/1.0142= 70.4ms

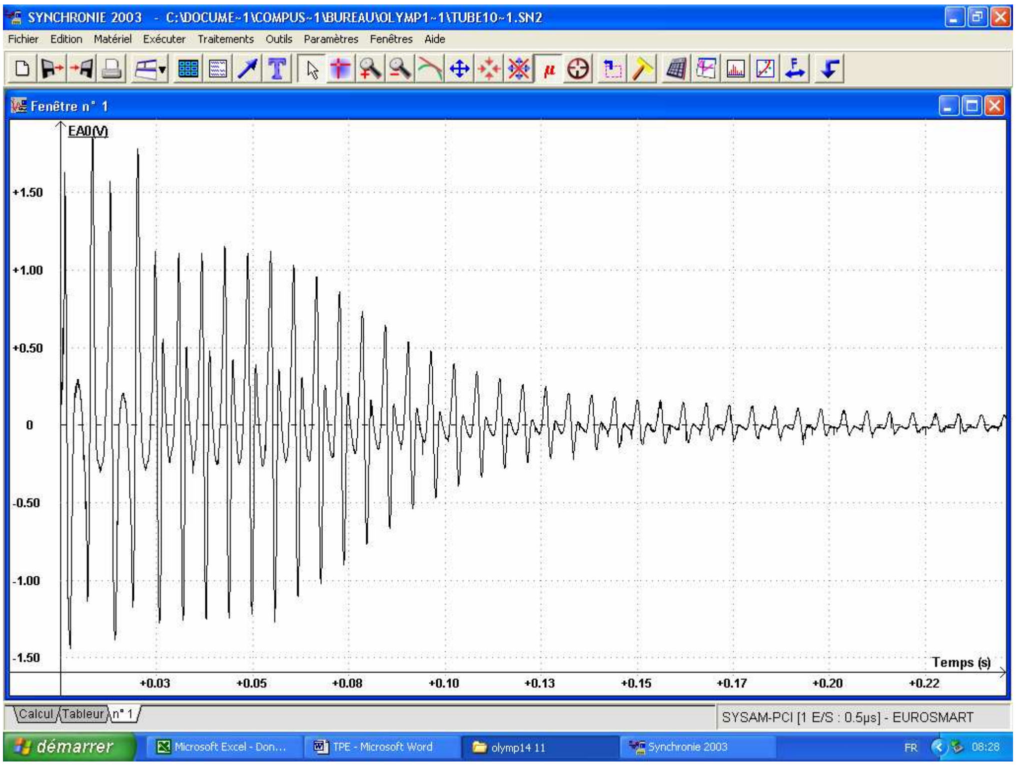
τ (A3)= 1/0.0158= 63.3ms

τ (A4)= 1/0.219= 45.7ms

b) Cas ouvert ouvert :

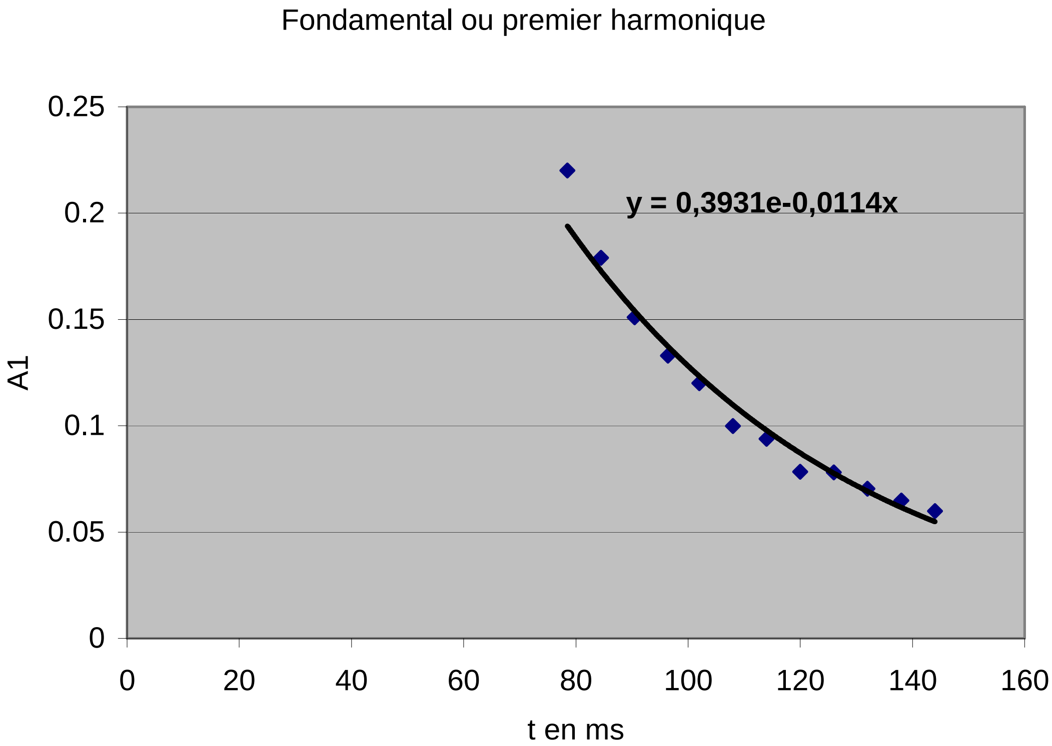
Dans ce cas là, on se heurte aux problèmes liés aux premières alternances pendant laquelle la main est encore posée sur l’extrémité du tuyau. C’est pourquoi on commence la décomposition en série de Fourier à partir de la cinquième alternance.

Signal :

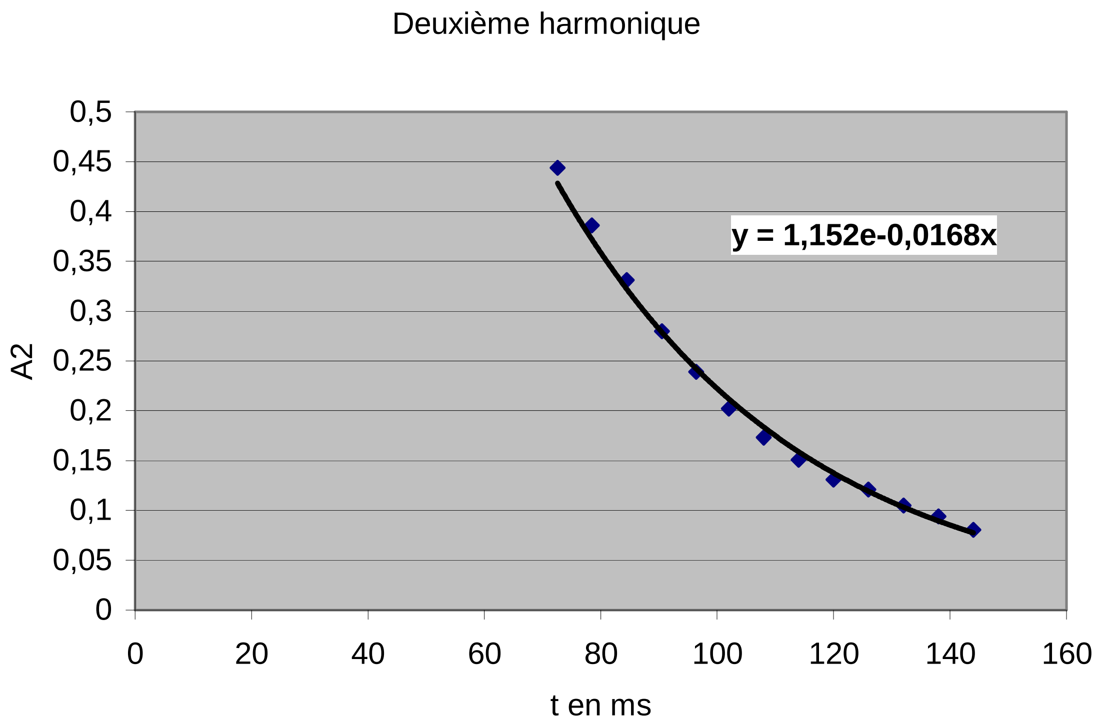


Voici les résultats obtenus.

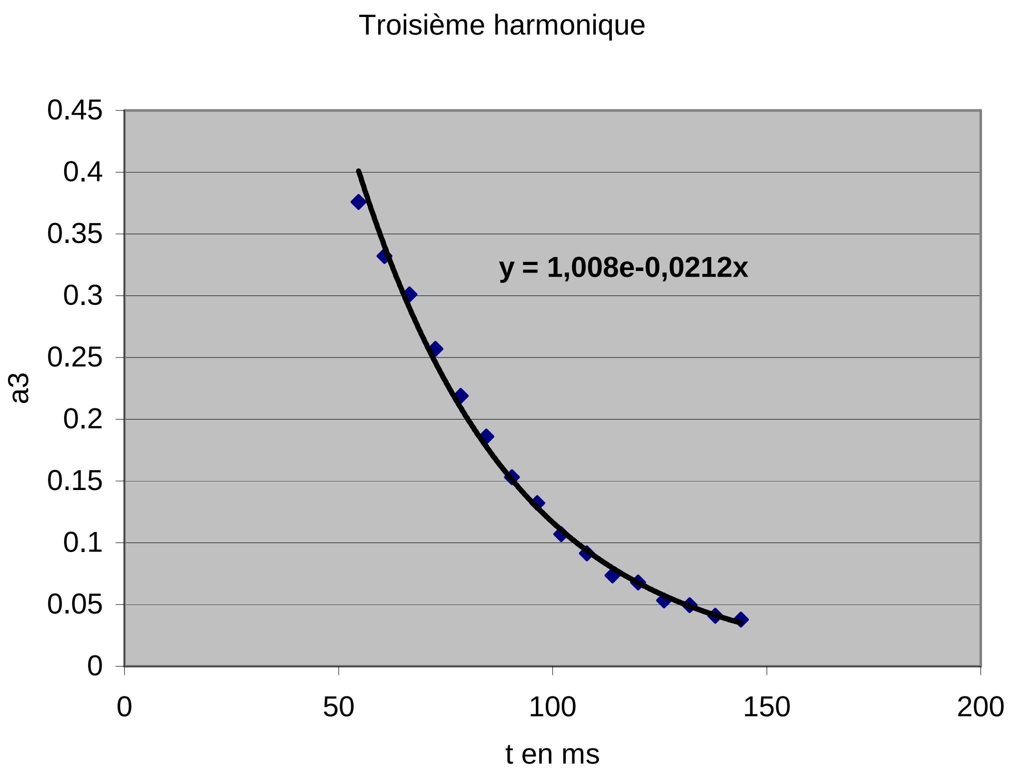
Evolution temporelle de l'amplitude du premier harmonique :



Evolution temporelle de l'amplitude du deuxième harmonique :



Evolution temporelle de l'amplitude du troisième harmonique :



Ce qui nous a donc permis de tracer une courbe de chaque amplitude en fonction du temps, c'est-à-dire d’obtenir une exponentielle décroissante représentant l’évolution temporelle de chaque amplitude. Ainsi, nous avons donc pu calculer les temps de relaxation.

Voici les résultats obtenus
Cas ouvert/ouvert :

τ (A1)= 1/0.0114= 87.8ms

τ (A2)= 1/0.0168= 59.5ms

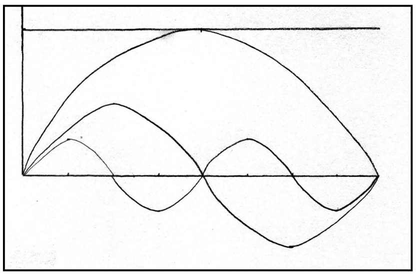
τ (A3)= 1/0.0212= 47.2ms

τ (A4)= 1/0.3= 33.3ms

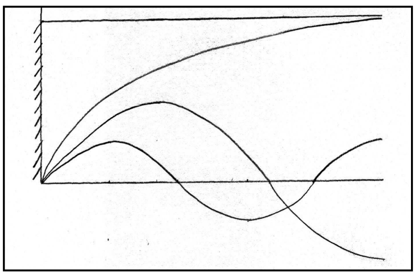
c) Commentaires des résultats expérimentaux.

On peut donc aisément se rendre compte que les harmoniques de rangs élevés s’amortissent plus vite. Ce qui explique qu’à la fin du signal, le spectre ressemble fortement à une sinusoïde. Cela représente en fait le fondamental qui lui met donc bien plus de temps à s’amortir. D’autre part, le nombre se situant avant la fonction exponentielle décroissante correspond à l’amplitude initiale.

Cependant, il faut préciser, que dans le cas ouvert ouvert, on retrouve tous les modes propres. Cela s’explique du fait que la surpression aux deux extrémités du tuyau est nulle car elle est imposée par la Pression Atmosphérique.



Par contre, dans le cas ouvert fermé, on retrouve seulement les modes propres de rang impair. En effet, à l’extrémité où le tuyau est fermé les tranches d’air sont immobiles à cause de la paroi. Mais à l’extrémité où le tuyau est ouvert, on retrouve forcément un nœud de pression, correspondant à un ventre de vitesse.



Pour conclure, on peut dire qu'un tuyau est une cavité résonante qui résonne suivant ses modes propres (dépendant des conditions aux limites ouvert/ouvert ou ouvert/fermé) et dont les modes propres s'amortissent en régime libre avec une constante de temps τ.

C) Simulation numérique du son produit par un tuyau

On simule à l'aide du logiciel Scilab le son produit lorsque l'on frappe sur un tuyau ; on utilise pour cela l'évolution temporelle des modes propres mis en évidence précédemment.

Cette simulation nous permet d'étudier l'influence de divers paramètres sur le son produit : amplitude initiale, temps de relaxation et fréquences.

1. Modification de l'amplitude initiale des harmoniques

Nous modifions l'amplitude initiale des harmoniques, de différentes manières. Nous essayons de toutes les augmenter, ou au contraire, nous faisons en sortes qu'elles soient toutes égales. Dans tout les cas nous n'observons pas de modification majeure de la perception: on entend toujours un tuyau. On en conclut donc que les amplitudes initiales ne sont pas des paramètres caractéristiques du tuyau (ils dépendent de l'attaque avec la main).

2. Modification des temps de relaxation.

Lorsqu'on augmente le temps de relaxation, le son obtenu se rapproche de celui d'une corde vibrante. Ces temps caractérisent donc le son produit par un tuyau

3. Modification de la fréquence du fondamental

Lorsqu'on modifie la fréquence du fondamental tout ce passe comme si on prenait un tuyau plus long ou plus court. Ceci est évidemment lié au fait que la fréquence du fondamental dépend de la longueur du tuyau.

D) Simulation d'un instrument de musique

1. Cas d'un instrument « à percussion »

Dans cette partie, notre objectif est de recréer numériquement un instrument complet afin d'obtenir un résultat similaire à un instrument de percussion fait de tuyaux juxtaposés. Tout d'abord, il faut savoir que le rapport entre la fréquence d'une note et son octave est de deux. (Par exemple, l'octave du La dont la fréquence est 440Hz est La2 = 2*440= 880Hz). Ensuite, la gamme temperée est constituée de 12 notes. Ainsi, pour que le rapport de fréquence entre une note et son octave soit conservé, il faut que le rapport entre la fréquence d'une note et celle qui "suit" soit de 2^(1/12).
Alors, la fréquence du La étant, par convention, de 440Hz nous pouvons calculer la fréquence de chacune des notes de la gamme.
Pour ce faire, nous avons modélisé à l'aide du logiciel Scilab le son produit par des tuyaux de fréquences 261.62Hz, 293.66Hz et 329.62Hz qui correspondent respectivement aux fréquences des notes Do, Ré et Mi. Ces modélisations furent ensuite juxtaposées, toujours à l'aide de Scilab afin de former la mélodie principale de la célèbre comptine « Au clair de la lune ».

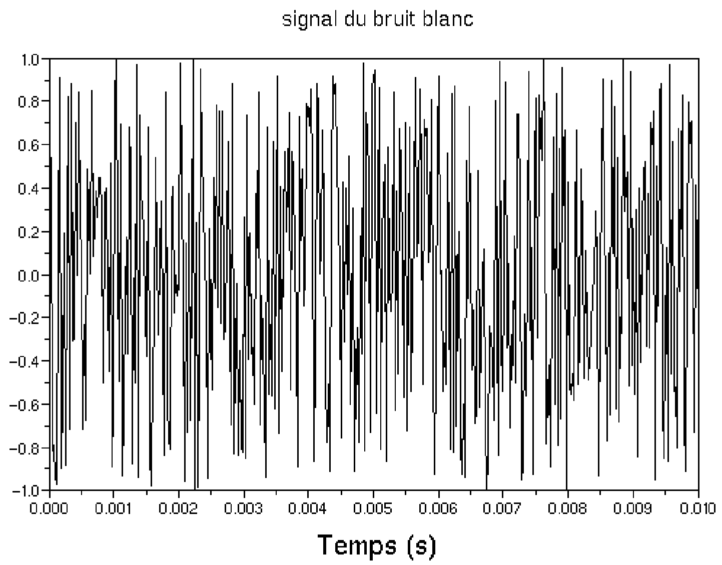
2. Cas d'un instrument « à corde »

Rappelons maintenant qu'un son est principalement caractérisé par sa fréquence et son temps caractéristique tau. Nous avons donc décidé de faire varier ce temps caractéristique et l'avons multiplié par 5 pour chacune des notes dans l'idée de recréer la comptine. Il s'avère que le son ne ressemble plus à celui d'un tuyau frappé, mais a celui d'une corde pincée (telle une corde de guitare).

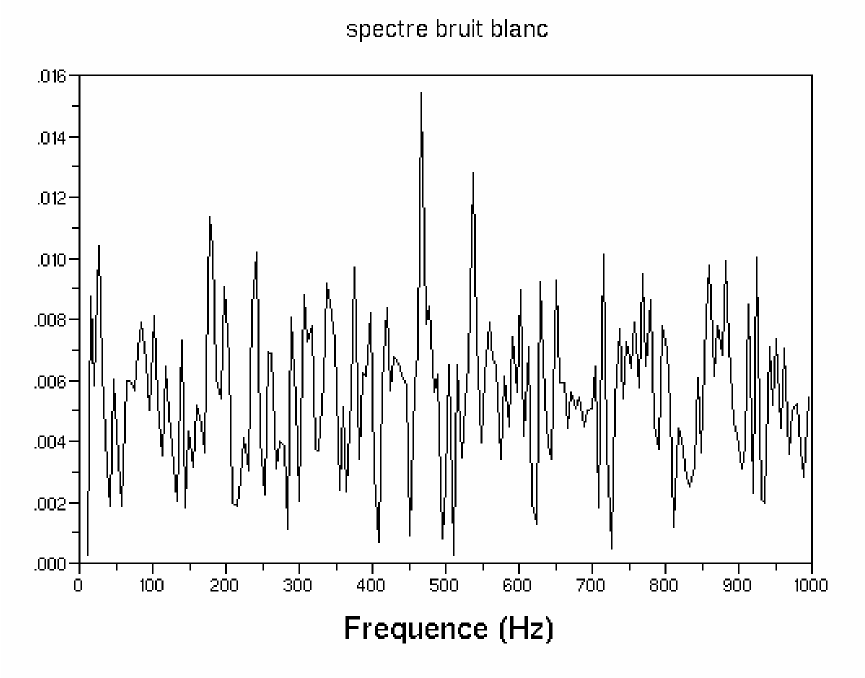
3. Cas d'un instrument « à vent »

Toujours dans l'optique de recréer la comptine en question, nous avons cette fois généré un bruit blanc a partir du logiciel Audacity (un bruit blanc étant un son contenant toutes les fréquences audibles auxquelles sont attribuées des amplitudes aléatoires).

Le signal du bruit blanc est le suivant :

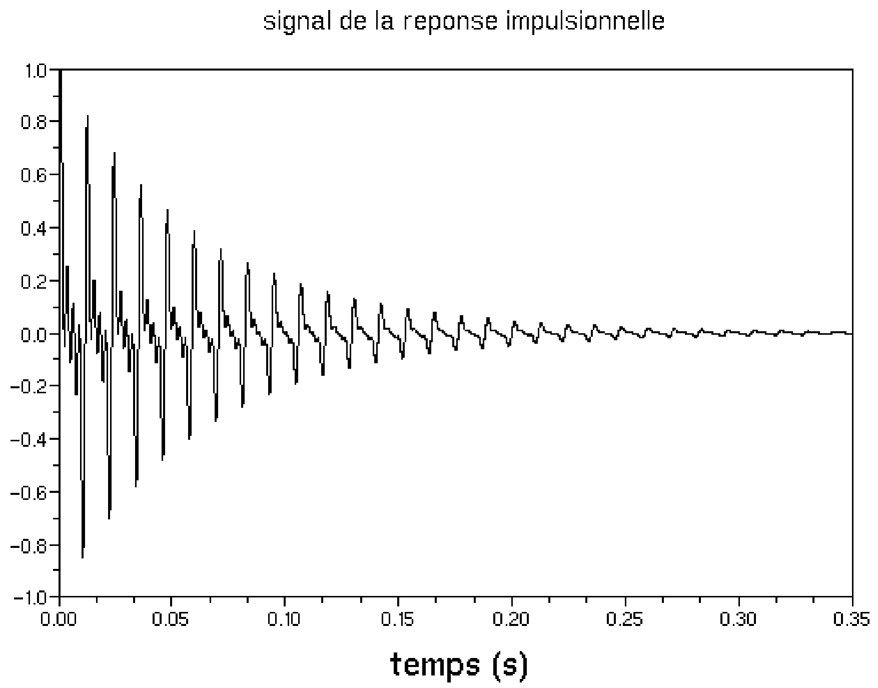


Puis grâce à une Transformée de Fourier, on obtient le spectre du bruit blanc, qui est le suivant :

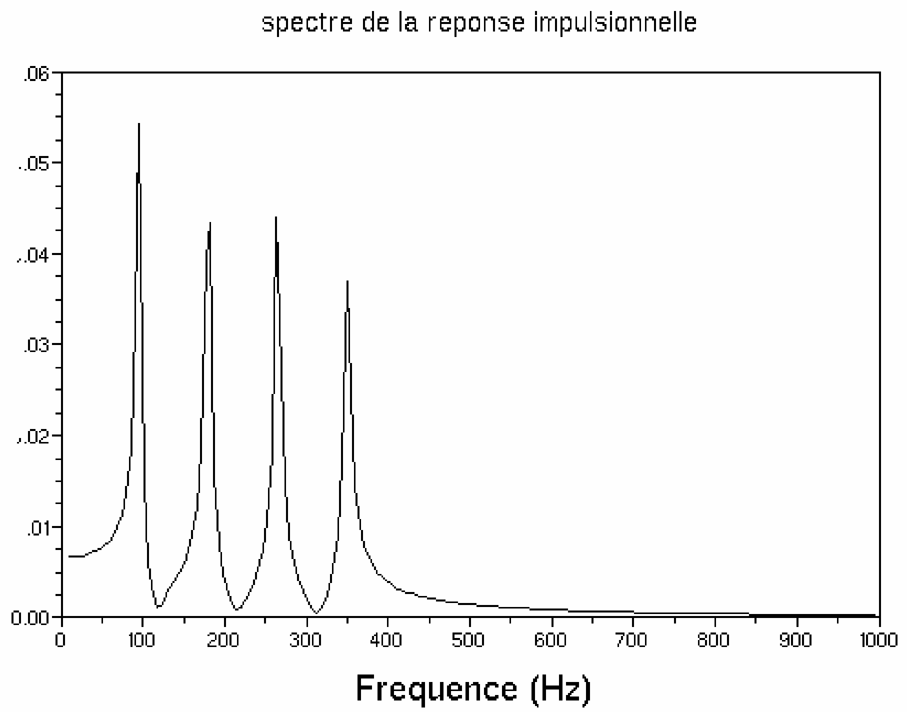


Puis nous avons modélisé trois nouveaux sons, ces sons étant les réponses impulsionelles correspondant aux fréquences des trois notes citées auparavant (la réponse impulsionelle étant la réponse que fournit un tuyau lorsque l'on frappe dessus avec toutes les amplitudes des modes propres égales a 1).

Voici le signal d’une réponse impulsionnelle :

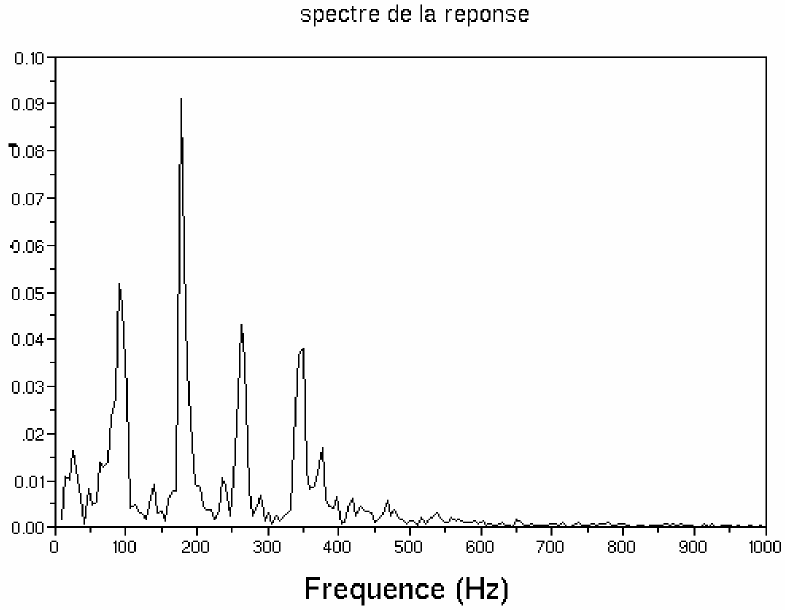


On obtient ensuite le spectre de cette réponse impulsionnelle grâce à une transformée de Fourier :

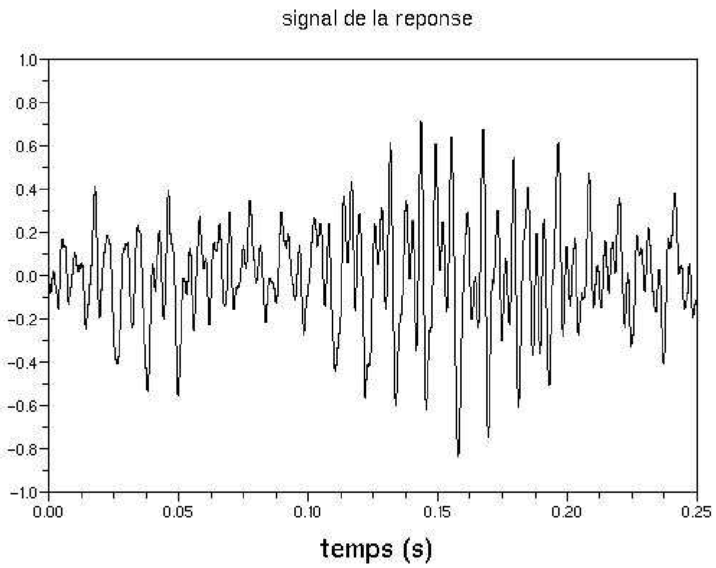


Ensuite le logiciel Scilab nous a permis d’effectuer la multiplication entre le spectre de chaque réponse impulsionnelle et le spectre du bruit blanc, ce qui correspond à un produit de convolution entre le signal de chaque réponse impulsionnelle et le signal du bruit blanc.

On obtient ainsi le spectre suivant :



On remarque ici que les pics correspondant aux différents modes ont été favorisés lors de la multiplication puisqu'ils correspondent à des valeurs où l'amplitude est élevée.
Puis, on a soumis ce spectre à une transformée de Fourier inverse afin d'obtenir le signal suivant :



Le résultat obtenu correspondrait en pratique au même son que l'on obtiendrait si l'on soufflait dans un tuyau dont le mode fondamental correspond à la fréquence d'un Do, d'un Ré ou d'un Mi selon le cas. Les trois sons obtenus sont, encore une fois juxtaposés afin de recréer la mélodie.

Les trois enregistrements obtenus permettent d'illustrer chacun des types d'instruments : le premier correspond aux percussions, le second aux instruments à cordes et le dernier aux instruments a vent.

Annexe

Présentons le code utilisé dans scilab pour modéliser le son produit par un tuyau :

```
stacksize(10000000);
Fech=44100;
Tech=1/Fech;
//construit un vecteur ligne de 0 à  3s avec un pas de Tech seconde
t=0:Tech:7;
//fréquence du fondamental = hauteur de la note
F=Fréquence choisie;
//matrice de 3 colonnes
//chaque colonnes est une des trois  composantes du signal
//(sans tenir compte de l'amplitude des harmoniques)
composantes=[sin(2*%pi*F*t') sin(4*%pi*F*t') sin(6*%pi*F*t') sin(8*%pi*F*t')];
//Amplitudes des composantes du spectre
tau1=0.0769;
amp1=0.346 ;
a1=amp1*exp(-t'/tau1);
tau2=0.0704;
amp2=1;
a2=amp2*exp(-t'/tau2);
tau3=0.0633;
amp3=0.238;
a3=amp3*exp(-t'/tau3);
tau4=0.0457;
amp4=0.288;
a4=amp4*exp(-t'/tau4);
spectre=[a1 a2 a3 a4];
// signal comporte une colonne par composante spectrale
signal=composantes.*spectre;
//signalf comporte une seule colonne qui est la somme des trois précédentes
signalf=signal*[1;1;1;1];
//normalisation du signal dans l'intervalle [-1 1]
norm1=max(abs(signalf));
signalf=signalf/norm1;
//modifier le chemin d'accès pour écrire le son et le lire avec audacity par exemple
wavwrite(signalf',44100,'Chemin d'accès/nom du fichier.wav)
```

Ensuite le code utilisé pour juxtaposer les sons obtenus :

```
Do=wavread('Chemin d'accès/nom du fichier.wav');
re=wavread('Chemin d'accès/nom du fichier.wav');
mi=wavread('Chemin d'accès/nom du fichier.wav');

//Ecriture de la partition
chanson=[Do Do Do re mi re Do mi re re Do];
wavwrite(chanson,44100, 'Chemin d'accès/nom du fichier.wav');
```

Puis le code utilisé pour modéliser le son dit «de flûte» :

```
stacksize(40000000);
Fech=44100;
Tech=1/Fech;
//construit un vecteur ligne de 0 à  3s avec un pas de Tech seconde
t=0:Tech:1;
//fréquence du fondamental = hauteur de la note
F=Fréquence choisie;
//matrice de 3 colonnes
//chaque colonnes est une des trois  composantes du signal
//(sans tenir compte de l'amplitude des harmoniques)
composantes=[sin(2*%pi*F*t') sin(4*%pi*F*t') sin(6*%pi*F*t') sin(8*%pi*F*t')];
//Amplitudes des composantes du spectre
tau1=0.0769;
a1=exp(-t'/tau1);
tau2=0.0704;
a2=exp(-t'/tau2);
tau3=0.0633;
a3=exp(-t'/tau3);
tau4=0.0457;
a4=exp(-t'/tau4);
spectre=[a1 a2 a3 a4];
// signal comporte une colonne par composante spectrale
signal=composantes.*spectre;
//signaf comporte une seule colonne qui est la somme des trois précédentes
signalf=signal*[1;1;1;1];
//normalisation du signal dans l'intervalle [-1 1]
norm1=max(abs(signalf));
reponse_imp=signalf/norm1;
//modifier le chemin d'accès pour écrire le son et le lire avec audacity par exemple
wavwrite(reponse_imp',44100, ‘Chemin d’accès/nom du fichier.wav’)
bruit_blanc=wavread(‘Chemin d’accès/nom du fichier.wav’);
reponse=convol(reponse_imp,bruit_blanc);
reponse=reponse/max(abs(reponse));
wavwrite(reponse,44100, ‘Chemin d’accès/nom du fichier.wav’)
```

Bibliographie

Livre de spécialité Physique chimie collection Sirius aux éditions Nathan

Logiciels:

Audacity
Synchronie
Excel
Word
Scilab