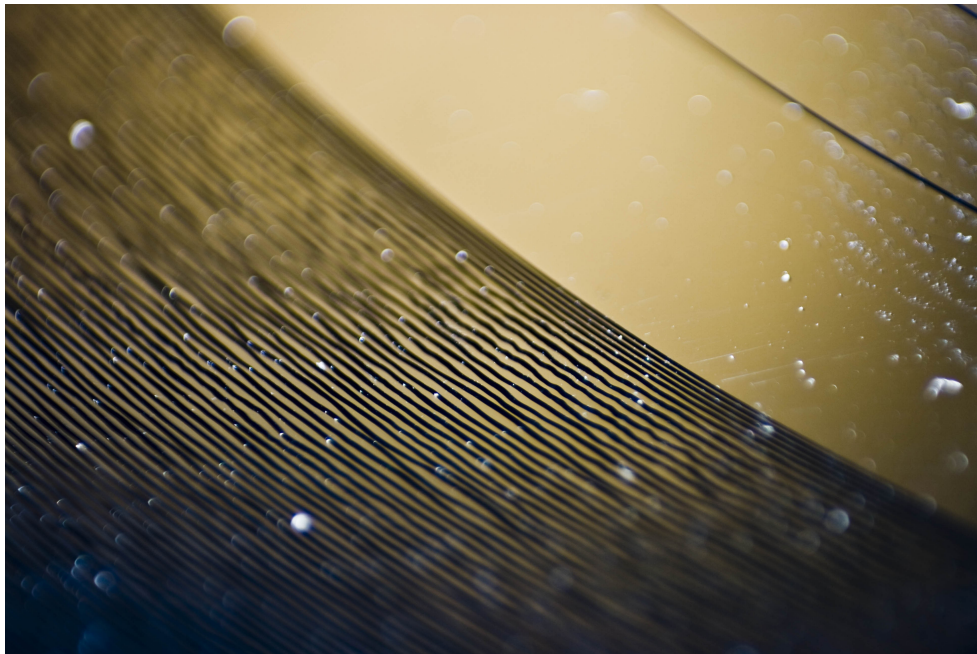


LES DISQUES VINYLES ET LA RESTITUTION DU SON



Maxime VINZIO

Index

Introduction.....3

I. Les disques vinyles

Caractéristiques.....3
Obtention.....5
Agencement de la matière.....6

II. La restitution du son

RIAA.....8
Capteurs phonographiques.....9
Modélisation d'un système et problèmes lors de la lecture.....11

III. Expériences

Reproduction du diagramme de Bode d'une platine piézoélectrique.....17
Mise en évidence de l'erreur de trajectoire : est elle audible ?.....19

Conclusion.....21

Sources et Références.....21

Annexes.....

Introduction

Les disques phonographiques ont longtemps été le seul moyen de sauvegarder des documents sonores. Durant cette période, les technologies d'enregistrement ainsi que les matériaux utilisés ont beaucoup évolué. Ces supports ont presque disparu quelques années après l'arrivée du disque compact en France dans la fin des années 80. Ils refont pourtant surface, pour satisfaire les collectionneurs et les audiophiles. Aujourd'hui, le format CD audio a 30 ans : alors pourquoi est-il délaissé pour une invention qui prend ses origines au début du siècle dernier avec le phonographe de Thomas Edison ? Beaucoup d'arguments sont avancés : la galette noir rendrait un son plus chaud, analogique, alors que certains considèrent l'échantillonnage des CD trop faible.

Il est difficile de définir quel support est le meilleur chacun présentant ses défauts et ses avantages.

Plusieurs question se posent donc : comment est stocké le signal de manière analogique ? Comment transforme-t-on alors l'information physique ? N'y a t-il pas des problèmes lors de la lecture ?

I. Les disques vinyles

Communément appelés galette noire, les disques microsillons actuels ont été inventé en 1947 (au format 33 tours) après trois années de recherche, leur première utilisation commerciale date de 1948, et c'est un an plus tard que les 45 tours font leur apparition.

Nous choisirons d'étudier les disques microsillons 33 tours, 45 tours, et maxi 45 tours (un disque 45 tour au format 33 tours), étant similaires, les plus répandus et surtout toujours en fabrication.

À l'origine la fréquence de rotation définissant chaque disque a été choisi afin de faciliter la conception et la fabrication des tourne disques.

Z roue menante	Z roue menée	Fréquence de rotation (tr/min)
60	46	78.2608695652...
60	108	33.333333333333...

Tableau de correspondance des fréquences de rotations/engrenages : le moteur électrique tourne à 60 Hz.

Il faut noter qu'à l'origine très peu de disques de types « 78 tours » étaient enregistrés à cette fréquence de rotation (chaque ingénieur du son avait ses préférences). La fréquence de rotation pouvait être réglée analogiquement sur la plupart des phonographes. Par la suite tout a été normalisé.

Les 45 tours, quant à eux, ont été défini par un cahier des charges demandant un disque microsillon de 7 pouces contenant une piste audio d'une durée de 5'30" par face.

Caractéristiques

Comme leur nom l'indique, ils sont formés de polychlorure de vinyle (PVC). Les premiers disques ou cylindres à sillons avaient une faible bande passante, (pour les 78 tours environ 5000 Hz le son devait être de mauvaise qualité comme par exemple les musique d'attente dans les téléphones qui ont une bande passante de 3100 Hz). Les fréquences réelles stockables sur un disque vinyle 33 tours sont comprises entre 50 Hz et 20000 Hz, certains s'évertuent à dire quelle est de 50 kHz ce qui est faux (cette fréquence peut par contre correspondre au bruit de surface) .

Ceci est étrange, on peut essayer de retrouver la bande passante d'un 33 tour :

On suppose qu'il n'y a pas de limitation physique pour les faibles fréquences.

On se place dans le cas le plus défavorable c'est à dire sur le sillon le plus proche du centre du disque (environ 60 mm). Il y a une dégradation croissante du niveau des aigus lors de la lecture. La vitesse étant la plus faible sur un 33 tours :

$$\left(33 + \frac{1}{3}\right) \times \frac{2\pi \times 60}{60} = 209 \text{ mm.s}^{-1}$$

On suppose que la plus faible période physique d'oscillation réalisable est d'environ 25 μm (valeur approximée en prenant la moitié de la largeur du sillon).

On obtient environ 10 kHz ce qui semble correct comparé au spectre des disques microsillons créés en 1931 qui est de 30-10000 Hz.

Largeur du sillon :	
33t mono	50-75 μm
33t stéréo	25-100 μm
« Pas du sillon » :	
33t	85 – 141 μm

On peut définir le pitch qui est le nombre de ligne par pouce, une sorte de densité radiale de sillon.

Ces données ont été vérifiées à l'aide d'un rugosimètre (voir l'annexe page 3).

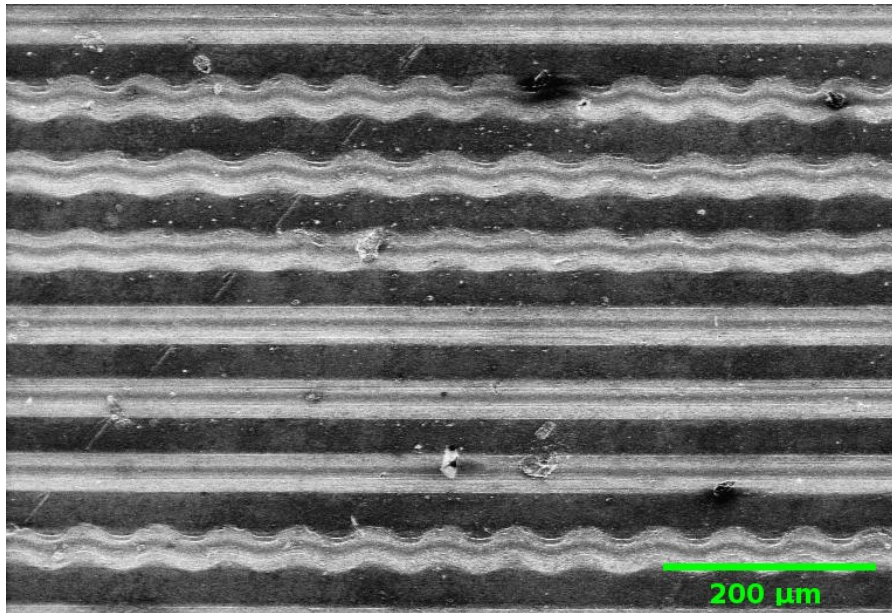


Illustration 1: Photo de la surface d'un 33 tours

Obtention

Voici les principales étapes¹ :

- Gravure du master sur un disque poli et laqué (seuls 50 % des supports laqués sont retenus lors de leur fabrication) à l'aide d'un burin chauffant commandé la plupart du temps numériquement. Le disque est maintenu par succion. Certains master sont gravés directement sur un disque de cuivre.

- La surface est recouverte d'une fine couche d'argent (le disque est lavé, aspergée de chlorure d'étain puis de solution d'argent).

- On peut alors procéder par galvanoplastie : le disque recouvert d'argent sert de cathode dans un bain d'ions de nickel alimenté par un courant d'une dizaine d'ampères, un dépôt de moins d'un millimètre est formé. Le disque père est ainsi formé, on le décolle, le perce et l'ébarbe.

- On remet le disque père dans un bain de nickel après avoir été traité pour éviter l'adhésion pour obtenir le disque mère identique au master.

- On recommence encore une fois l'opération pour obtenir la matrice (en nickel).

- Il ne reste plus qu'à presser le vinyle : une galette de vinyle molle est écrasée entre deux matrices et l'étiquette du vinyle (cette étape dure une trentaines de secondes).

- Le disque sera finalement ébavuré et conditionné pour être livré.



Illustration 2: Système de gravure du disque ici en cuivre. On peut remarquer le stroboscope sur l'épaisseur du plateau permettant de surveiller la vitesse de rotation.

Agencement de la matière

La forme générale du sillon est une spirale d'Archimède sur laquelle on rajoute les variations correspondant au signal. La variation due au pas de la spirale en un tour est inaudible.

On peut stocker le son de plusieurs manières sur le disque :

- verticalement : le sillon s'élargit au fur et à mesure que l'on va plus profondément (c'était le cas pour le phonographe à cylindres d'Edison) ;
- radialement comme la majorité des disques monos, la spirale décrite par le sillon représente une distorsion du signal original mais elle est inaudible car la spirale est assez régulière (le pas du sillon varie) ;
- Les deux pour les disques stéréophonique ;

Il existe deux manières d'utiliser la combinaison des deux lors de la gravure.

- Une en séparant les signaux verticalement et horizontalement : cette solution a pour défaut la différence de qualité sonore entre les deux signaux (la distorsion du signal est plus grande verticalement) et la difficulté de construire une cellule phonographique.
- Une dite 45°x45° (procédé de Westrex), chaque face du sillon porte les modulations du signal gauche et droite. Il a donc pour avantage la même qualité pour les deux composantes, et présente une compatibilité entre les systèmes mono et stéréo.

Les disques stéréophonique sont donc de qualité inférieure à celle des disques mono.

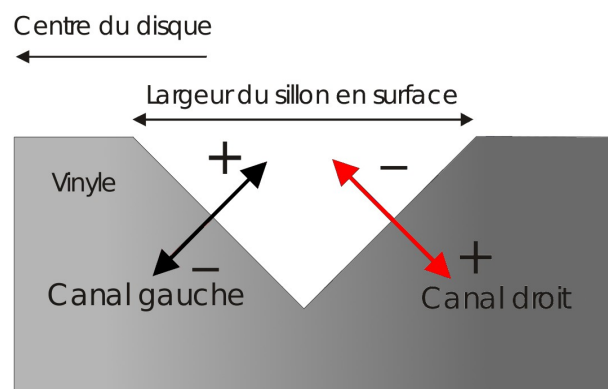


Illustration 3: Mode 45°x45°

La variation radiale du sillon (a) représente la sortie mono et la variation verticale (b) représente la différence entre les deux composantes audio.

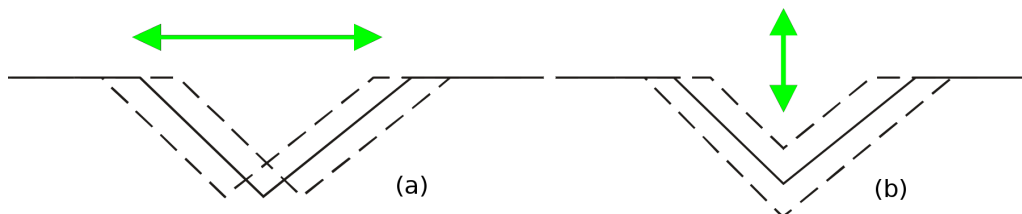


Illustration 4: (a) Lorsque que les canaux sont en phase

(b) Lorsque les canaux sont en opposition de phase

II. La restitution du son

RIAA

Le problème est le suivant: pour un même niveau sonore, une basse fréquence nécessite une amplitude du sillon plus grande. De plus, apparaissent deux inconvénients, qui sont :

- la réduction du temps d'enregistrement (dépendant du pas du sillon)
- la difficulté pour la cellule de suivre le sillon, créant ainsi plus de distorsion

A l'autre bout du spectre, le contact entre le diamant et le sillon produit un bruit composé de hautes fréquences, appelé « souffle ».

C'est pour cela que la RIAA² a développé pendant les années 60 un filtre appliqué lors de la gravure du disque : c'est l'égalisation RIAA. Lors de la gravure on réduit le niveau des basses fréquences et augmente celui des hautes fréquences. En augmentant le niveau des aigus (treble pre-emphasis) durant la gravure on obtient un meilleur rapport signal/bruit et une meilleur dynamique du fait que les aigus et le bruit sont réduits lors de la reproduction. Il faut donc appliquer un autre filtre en sortie de la platine afin de restituer le son original. D'autres filtres existent, en effet avant la

normalisation RIAA chaque ingénieur du son appliquait son propre filtre. Plus tardivement (en 1976) le filtre RIAA/IEC a été développé : il filtre les fréquences très basses qui peuvent être créés par l'alimentation du tourne disque mais il ne s'est pas imposé.

Pour allonger la durée des enregistrements, les systèmes de gravures actuelles ont leur pas de sillon variable : grâce à une pré-lecture du son à graver on prévoit les variations d'amplitude.

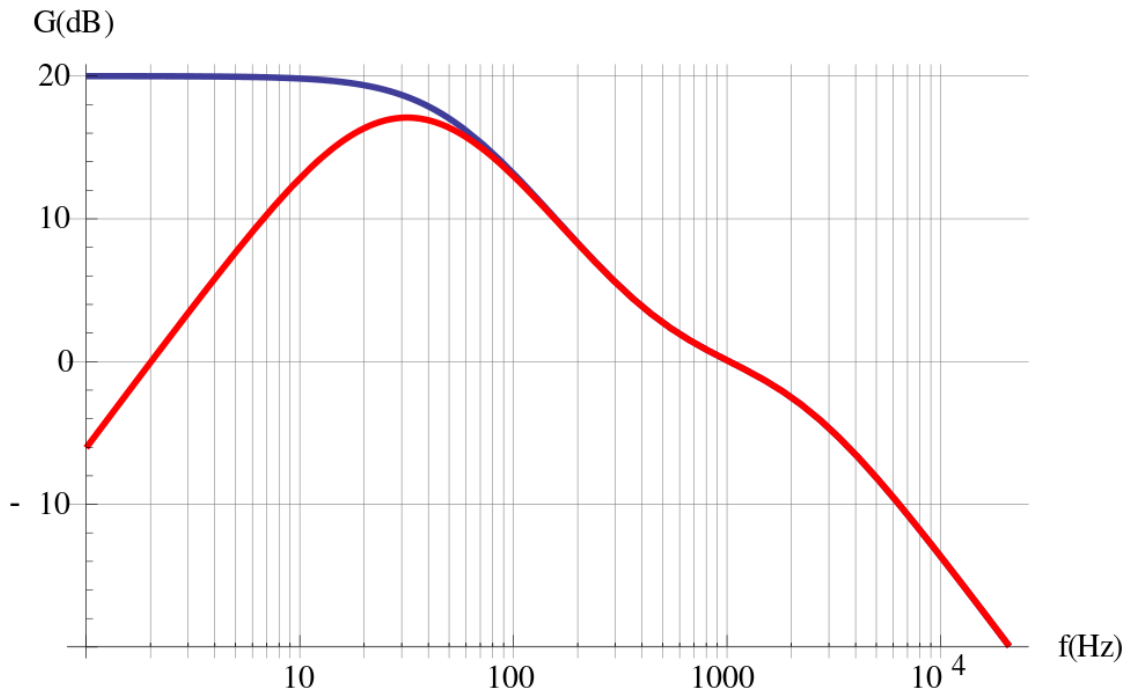


Illustration 5: Courbe de lecture RIAA en bleu et RIAA/IEC

Expression du gain :

$$G_{dB}(f) = 10 \log \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 t_2^2} \right) - 10 \log \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 t_1^2} \right) - 10 \log (1 + 4\pi^2 f^2 t_3^2)$$

Avec : $t_1 = 75 \mu s$
 $t_2 = 318 \mu s$
 $t_3 = 3180 \mu s$
 $t_4 = 7950 \mu s$

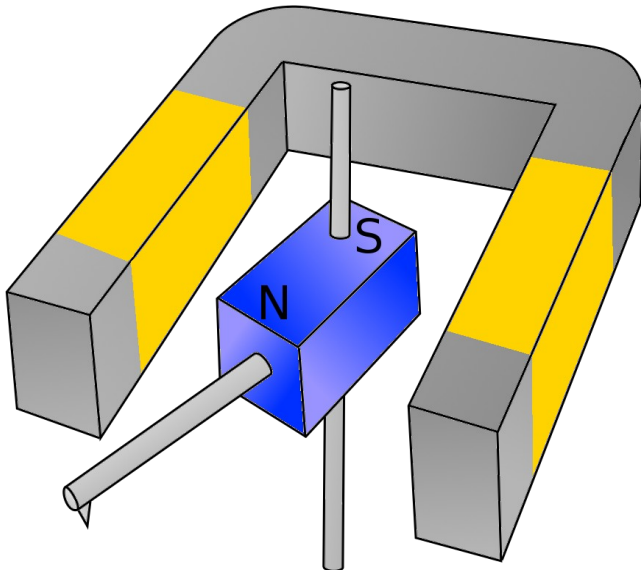
Pour le standard RIAA/IEC une constante des basses fréquences est rajoutée :

$$G_{dB}(f) = 10 \log \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 t_2^2} \right) - 10 \log \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 t_1^2} \right) - 10 \log \left(1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 t_4^2} \right) - 10 \log (1 + 4\pi^2 f^2 t_3^2)$$

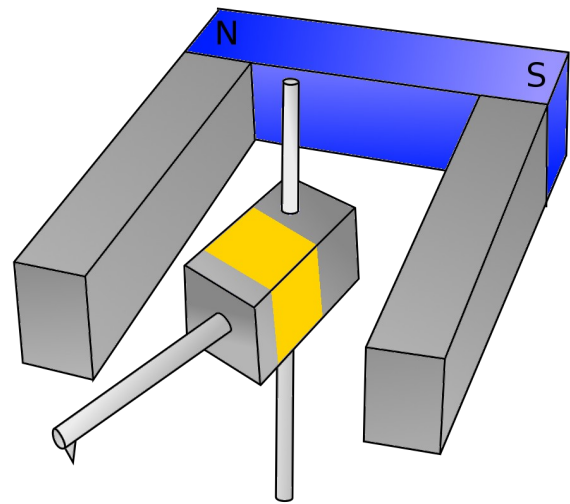
Capteurs phonographiques

Il existe une demi-douzaine de types de capteurs phonographiques. Néanmoins ils présentent des parties communes. Ce sont des capteurs analogiques et actifs. Leur sensibilité est exprimée en Volt/cm/s valeur comprise entre 0,2 et 15. Une tête de lecture est défini par sa traçabilité et sa pression de lecture qui doit être la plus faible possible.

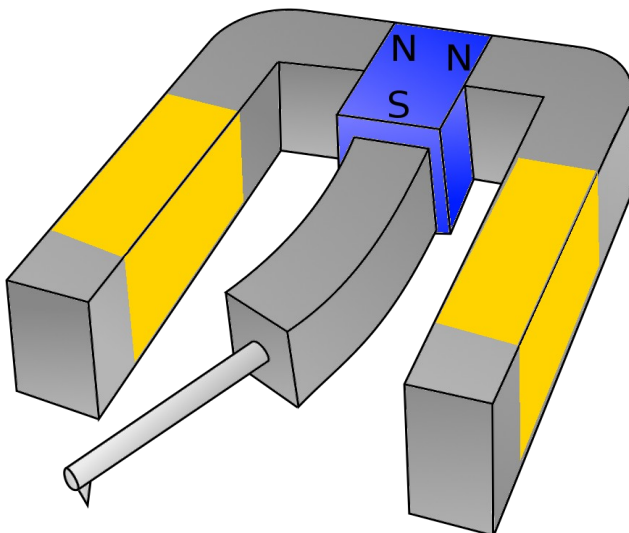
Voici les schémas de principes des principaux capteurs. Ici ne sont représentés que des capteurs mono plus simples.



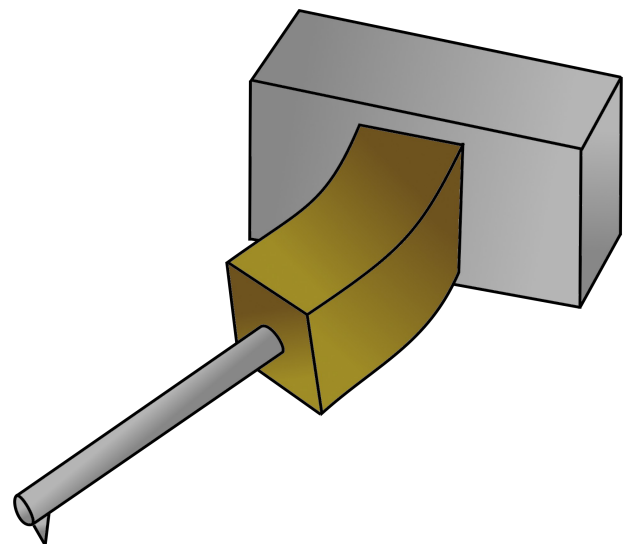
Dessin 1: Capteur "Moving Magnet"



Dessin 2: Capteur "Moving Coil"



Dessin 3: Capteur à réluctance Variable



Dessin 4: Capteur piézoélectrique

Le porte saphir est fixé au corps d'épreuve du capteur et est composée d'aluminium (parfois plaqué or), de bore ou de béryllium (qui n'est plus utilisé car toxique). Le tout est appelé cantilever (de l'anglais porte-à-faux) et est en liaison pivot ou rotule avec le bras (lecture mono ou stéréo).

La pointe est un diamant ou un saphir (les 78 tours utilisaient des aiguilles en métal). Elle a un diamètre compris entre 12.5 et 17.5 μm (voir illustration 6). Cet embout est nettement plus gros que le burin de gravure afin de s'appuyer ponctuellement sur les parois de sillon (pour limiter le bruit de surface). L'usure pour un saphir est perceptible au bout de 25 heures de lecture, la durée de vie d'un diamant dépasse les milles heures (voir annexes page 4). Leur durée de vie dépend de la force d'appui sur le disque. Leur forme peut être pointue, sphérique ou elliptique en fonction de leur application.

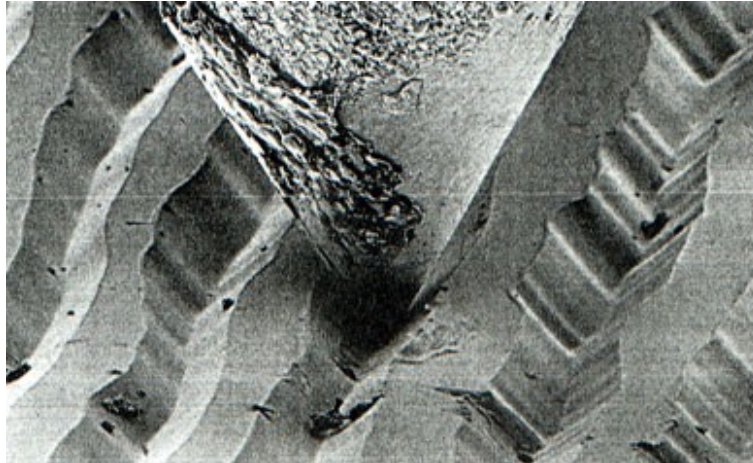


Illustration 6: Diamant reposant sur un sillon

Principaux capteurs :

1. « Moving iron » : c'est une plaque de métal agitée devant un aimant bobiné. Sa bande passante est faible et il y a des problèmes de résonance.
2. Piézoélectrique : C'est le moins cher qui crée un filtre passe bas qui rend inutile l'utilisation d'un filtre RIAA. Cependant il ce filtre manque de précision. Il ne nécessite pas de pré-ampli (tension en sortie de 100 mV) et il a un plus haut niveau de distorsion et de bruit par rapport aux autres solutions. Le stylet est directement couplé à la cartouche ce qui compromet les réponses en hautes fréquences. La tension est proportionnelle à la position du stylé. Leurs bande passante est très faible : 100-5000 Hz.
3. Magnétiques : La tension est proportionnelle à la vitesse du stylé.
 - « Moving Magnet » : Large bande passante de 10 Hz à 27 kHz
 - « Moving Coil » : Large bande passante de 10 Hz à 75 kHz, ce système aurait une meilleure traçabilité (moins d'inertie que l'aimant).
 - Réductance variable : aptitude d'un circuit magnétique à s'opposer à sa pénétration par un champ magnétique.

Le frottement de l'aiguille de la tête de lecture sur le disque vinyle provoque une légère usure de la tête et surtout du disque. Cette perte est très sensible dans les aigus après quelques écoutes. Les fréquences au delà de 10 kHz sont facilement dégradées car elles induisent de fortes pressions sur la pointe de lecture. Des systèmes optiques à laser (ELP³) ou par microphotographie⁴ corrigent ces problèmes mais sont cependant très coûteux (voir annexes page 5).

Certains projets sérieux présentent même un moyen d'utiliser son propre scanner pour lire ses disques vinyles⁵.

Modélisation d'un système et problèmes de lecture

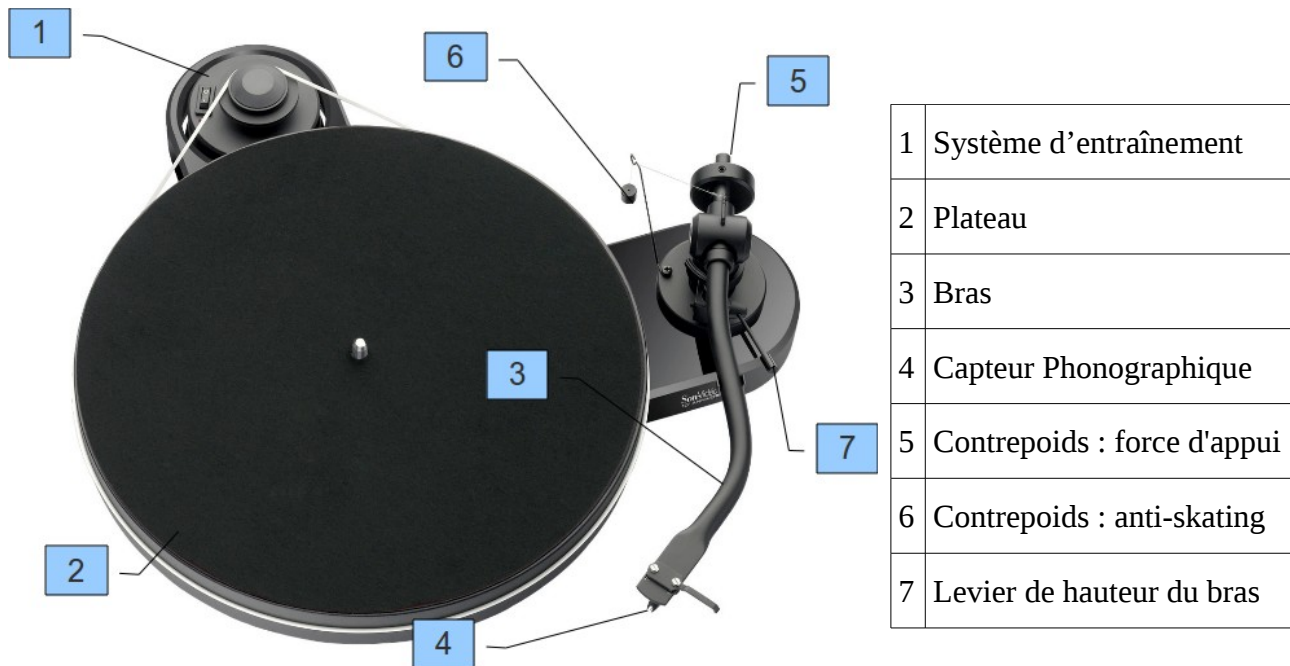


Illustration 7: Principaux composants d'une platine classique.

La lecture d'un disque est entachée de nombreuses sources d'erreurs :

- Erreur de piste (traçabilité): le diamant peut ne pas suivre exactement le fond du sillon mais prendre un chemin plus facile comme une automobile qui coupe un virage. Pour l'éviter, il faut plus de pression sur la pointe de lecture, ou une tête de lecture plus légère mais cela entraîne une usure du disque.
- Erreur de trajectoire : Le bras de lecture décrit un arc de cercle qui n'est orthogonal aux sillons que deux fois dans sa trajectoire. Le reste du temps, cela produit une distorsion d'harmonique deux (on lit une sinusoïde selon un axe oblique). Il existe les bras tangentiels qui n'ont pas ce défaut mais induisent une plus grande complexité.
- Erreur angulaire : Le diamant touche les bords du sillon en deux points qui ne correspondent pas aux arêtes du burin qui a fait la gravure. Le diamant elliptique s'en approche mieux qu'une pointe ronde. L'erreur est très importante dans les fréquences élevées.
- Bruit de surface : C'est un bruit de frottement qui est dû à un vinyle insuffisamment lisse. Il est principalement inaudible.
- Poussières : Le dépoussiérage est difficile car le vinyle est électrostatique et attire la poussière.
- Longueur d'un tour : Les sillons du centre du disque sont beaucoup moins longs que ceux de la périphérie. Y graver une fréquence de plus de 10 kHz et surtout la lire est difficile.
- Pleurage : variation de la vitesse de rotation du disque. En principe inaudible avec un matériel correct.
- Vibrations : les vibrations du moteur et autres sources de vibrations, y compris des sons, peuvent perturber la lecture.
- Correction selon la courbe RIAA : plus ou moins précise.
- Surcharge de courbure : si la piste a une courbure plus importante que le diamant, il s'en suit des distorsions.

- Pincement : Il modifie le signal « vertical » et ne touche donc que les disques stéréo

Afin d'étudier le support, on réalise une modélisation de la surface du disque à l'aide d'une spirale d'Archimède.

On choisit comme dimensions :

d	60 mm
D	304,8 mm
Pas du sillon	84 μm
Longueur bras	210 mm

Notre repère étant centré sur le disque, la pivot du bras est placée à une distance $D=192$ mm. Ce sont les dimensions de la platine présentée page 16.

Première modélisation : Trouver un ordre de grandeur de la force exercée sur la tête de lecture.

On étudie statiquement la tête de lecture.

On se place dans un problème statique, on modélise le pick-up par un porte-à-faux penché d'un angle γ de longueur L (On mesurera $\gamma=20^\circ$).

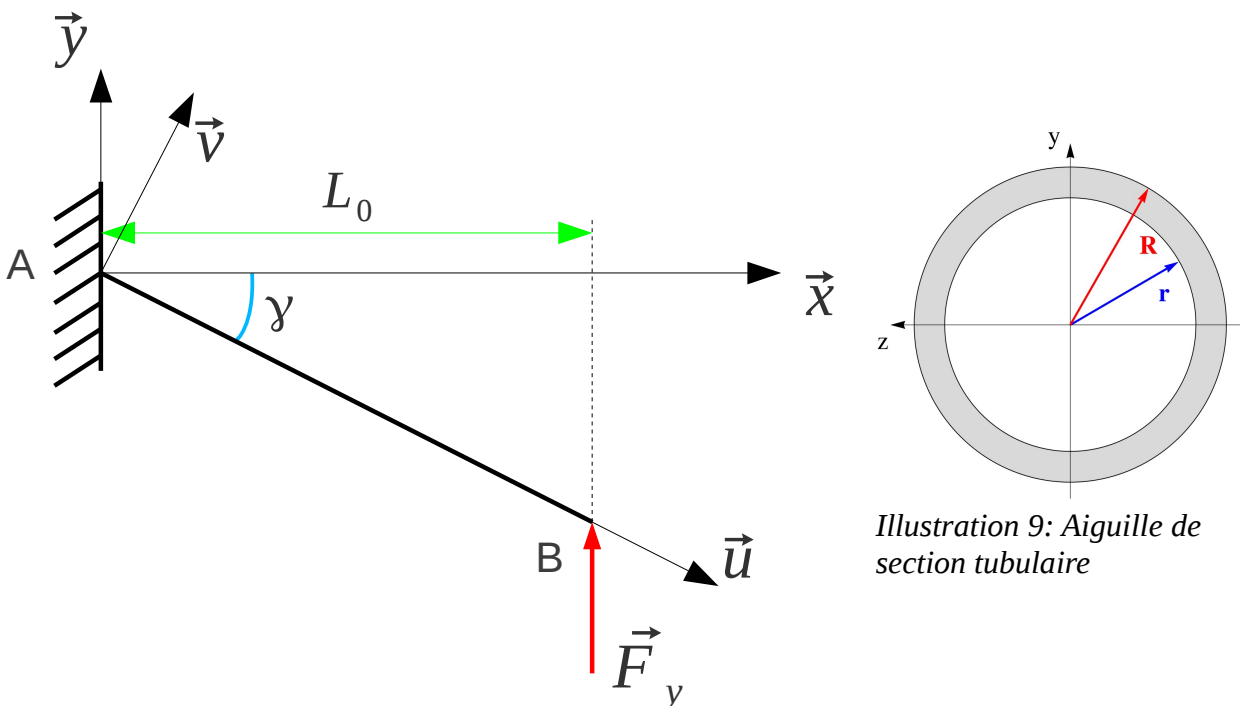


Illustration 9: Aiguille de section tubulaire

Illustration 8: Modélisation de l'aiguille en porte-à-faux.

On exprime la flèche δ pour un déplacement vertical sur \vec{y} dû à une flexion simple et à une compression (annexes page 8) :

$$\delta(u) = \delta_{\text{compression } /y} + \delta_{\text{flexion}}(u)$$

$$\delta(u) = \frac{LF \sin(\gamma)^2}{E \pi (R^2 - r^2)} + \frac{F_y \cos(\gamma)^2}{E I_{Gz}} \left((L-u)^3 + \frac{L^2}{2} u - \frac{L^3}{6} \right)$$

Et pour un déplacement horizontal :

$$Z(u) = \frac{F_z}{E I_{Gv}} \left(\frac{(L-u)^3}{6} + \frac{L^2}{2} u - \frac{L^3}{6} \right)$$

L'aiguille de la platine est tubulaire donc $I_{Gv} = \pi \frac{(R^4 - r^4)}{2}$.

Avec $R=0.83$ mm pour un tube d'épaisseur $e=0.12$ mm et de longueur $L=9$ mm.

On considère le module d'Young pour l'aluminium : $E = 69\,000$ MPa

On peut donc trouver l'intensité de la force horizontale appliquée sur l'aiguille en connaissant $\delta(L)$.

$$F_z = 3 Z(L) \frac{E I_{Gv}}{L^3}$$

Puis les variations d'un point C d'abscisse x sur [AB].

Applications numériques : avec $\delta(L) = 70 \mu\text{m}$

$$I_{Gz} = 3.463 \times 10^{-13} \text{ m}^4$$

$$F_{z \text{ max}} = 6,9 \text{ N}$$

Lors du réglage de la platine on conseille une force d'appui d'une dizaine de grammes (environ 0.1 N).

Le résultat est bien trop élevé, c'est normal, car en réalité il n'y a pas d'encastrement mais simplement une rotule ou pivot. Cependant ces calculs sont valables dans le cas d'un capteur à réluctance variable.

Deuxième modélisation :

Les disques originaux sont gravés tangentiellement, cependant la tête de lecture n'est pas tangentielle au sillon. Son angle par rapport au sillon varie même lors de la lecture : c'est l'erreur de trajectoire (ou erreur d'angle). Elle influe sur le signal selon la forme du diamant. Beaucoup d'études ont été menées à ce sujet⁶. Un moyen radical contre l'erreur de piste est l'utilisation d'une platine de lecture tangentielle (voir photo page 5 en annexe).

On peut quantifier l'erreur de trajectoire en appliquant le théorème d'Al-Kashi (voir annexes page 9) :

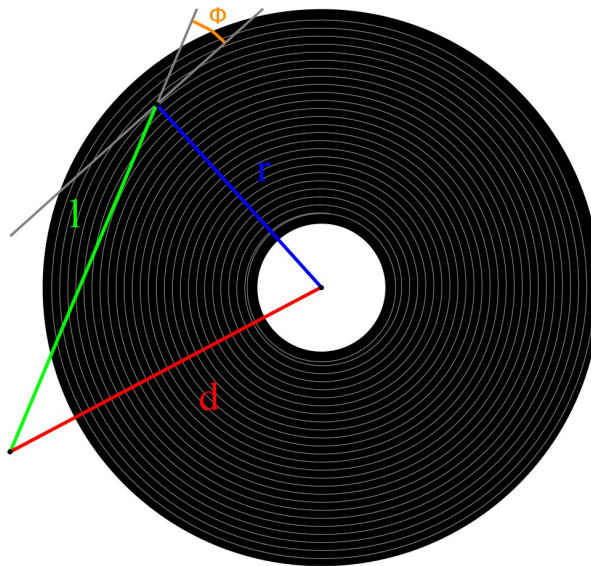


Illustration 10: l : longueur du bras, d : distance entre les deux pivots et r : position radiale du diamant

On obtient la relation :

$$\sin(\phi) = \frac{r}{2l} + \frac{l^2 - d^2}{2lr}$$

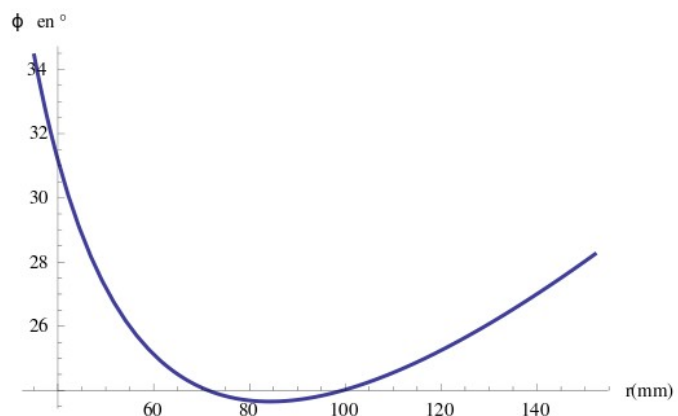


Illustration 11: Erreur de trajectoire en fonction de r

On peut calculer l'angle du coude, angle entre le bras et la tête de lecture (visible sur l'illustration 14) afin de minimiser l'erreur d'angle. On prend la valeur maximale dans l'intervalle délimité par les rayons extrêmes du vinyle afin de centrer la fonction (voir annexes Mathematica page 6).

On trouve un angle de coude de $25,9^\circ$

Avec pour erreur de trajectoire maximale : $2,3^\circ$

On va par la suite essayer d'appliquer l'erreur d'angle sur un son audio.

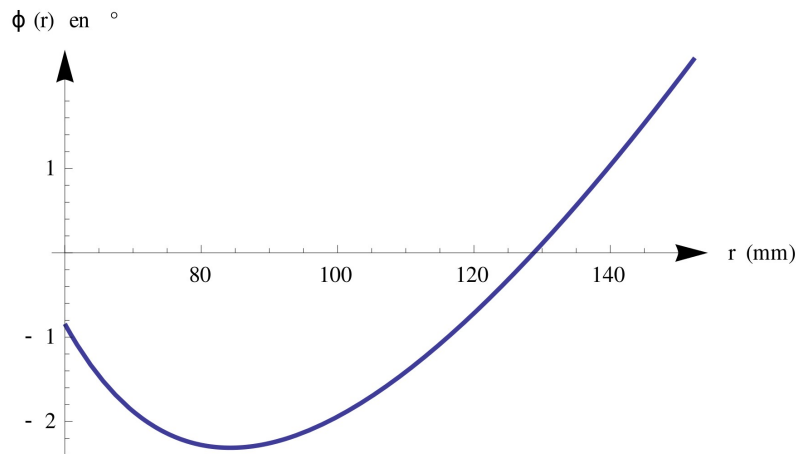


Illustration 12: Angle d'erreur de trajectoire d'un bras coudé

On peut également calculer l'angle de coude en annulant la valeur moyenne de la fonction : l'angle d'erreur de trajectoire sera le plus longtemps proche de l'abscisse : on trouve 25.1° .

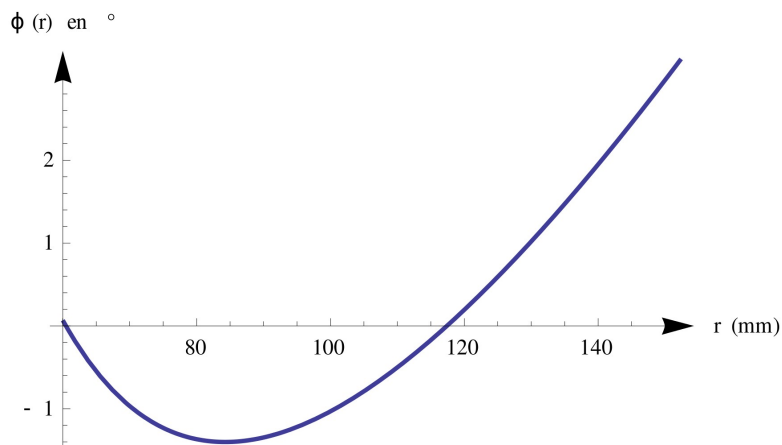


Illustration 13: Angle d'erreur de trajectoire d'un bras coudé

On remarque qu'on réduit l'erreur de trajectoire en diminuant le rayon minimum du vinyle. Le son est d'autant plus dégradé que le rayon est faible.

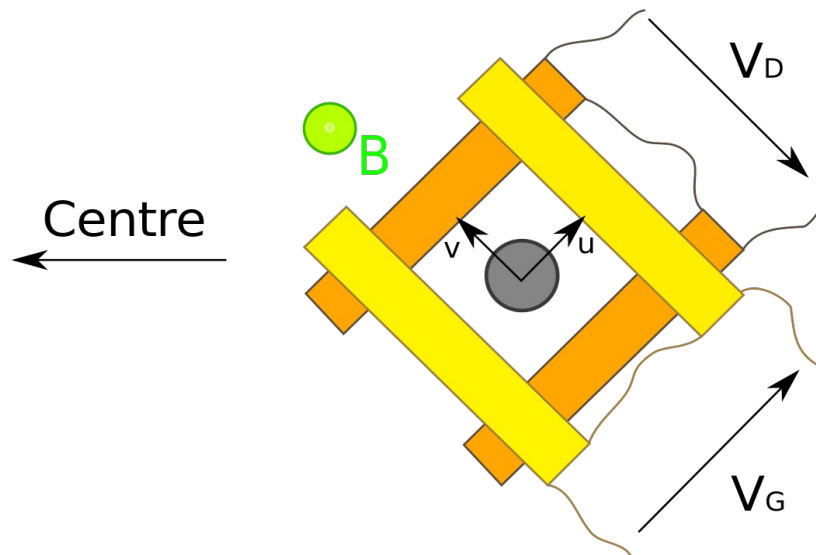
L'angle de coude mesuré sur la platine Mandivox (Illustration 14) est $25^\circ \pm 1^\circ$.

Troisième modélisation : Modélisation d'une tête de lecture « Moving Coil » :

Les bobines sont placées à une distance L_b du diamant sur l'aiguille et sont plongées dans un champ magnétique créé par un aimant fixe.

Soit v_u et v_v les projetés de la vitesse de la bobine.

Il y a quatre bobines de longueur l plongées dans un champ B .



Dessin 5: Bobine plongée dans un champ uniforme.

On applique la loi de Faraday : $e = -\frac{d\phi}{dt}$

$$d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$d\vec{S} = \vec{MM}' \wedge d\vec{l} = \vec{v} \wedge d\vec{l}$$

$$e = \int B v dl$$

On trouve les forces électromotrices induites :

$$V_G = 2B \cdot l \cdot v_u$$

$$V_D = 2B \cdot l \cdot v_v$$

On ne peut pas faire d'application numérique, il nous manque des données difficilement récupérables telles que la valeur du champ B et la longueur de la bobine. Cependant on trouve bien un potentiel proportionnel à la vitesse de la bobine.

III. Expériences

Pour l'expérience on utilisera une platine Mandivox (Illustration 14). Elle est équipée d'un transducteur céramique. Son spectre donné par le constructeur est de 50 à 10000 Hz.





Illustration 14: Platine bas de gamme Mandivox

Reproduction du diagramme de Bode d'une platine à pick-up piézoélectrique.

Cette expérience est simple :

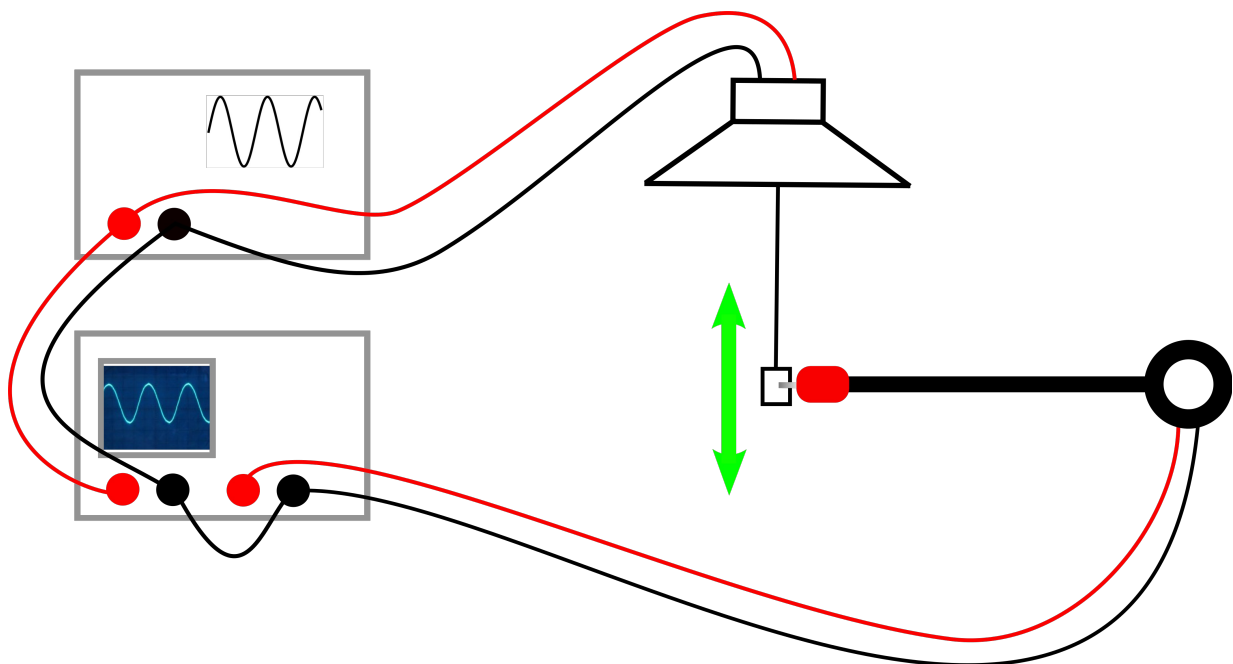


Illustration 15: Schéma de l'expérience

On excite la pointe du stilet horizontalement à amplitude constante à l'aide d'un pot vibrant (le GBF lui fournit un signal à tension sinusoïdale), et on relève le rapport tension de sortie sur d'entrée à différentes fréquences.

La construction du diagramme de Bode permettra de déterminer si le filtre créé par l'élément piézoélectrique est proche du filtre RIAA.

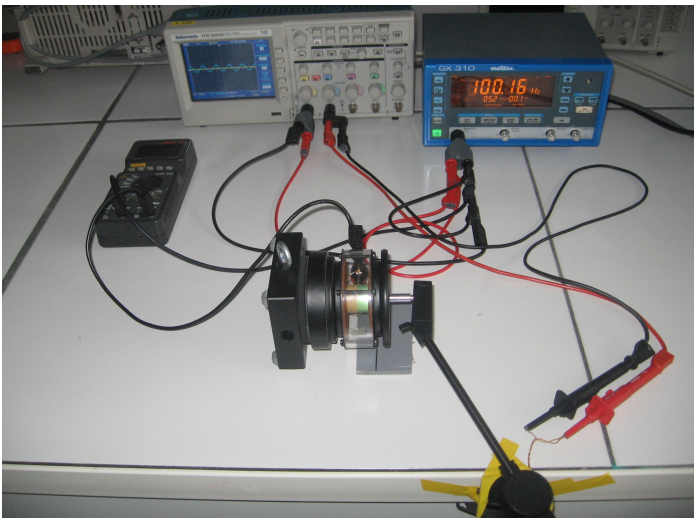


Illustration 16: Photo de l'expérience

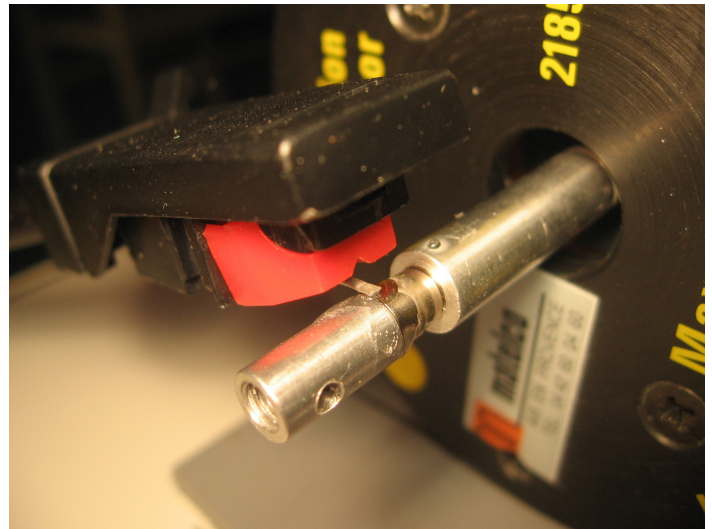


Illustration 17: Le saphir collé sur le pot vibrant

Il y avait beaucoup de bruit sur le signal de sortie (le fil récupérant la tension de sortie semblait agir comme une antenne), le signal (faible tension de sortie) était difficilement lisible.

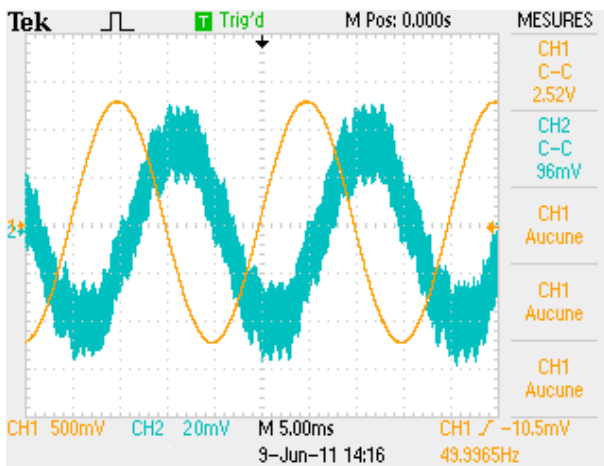


Illustration 18: Mesure sur l'oscilloscope à 50 Hz

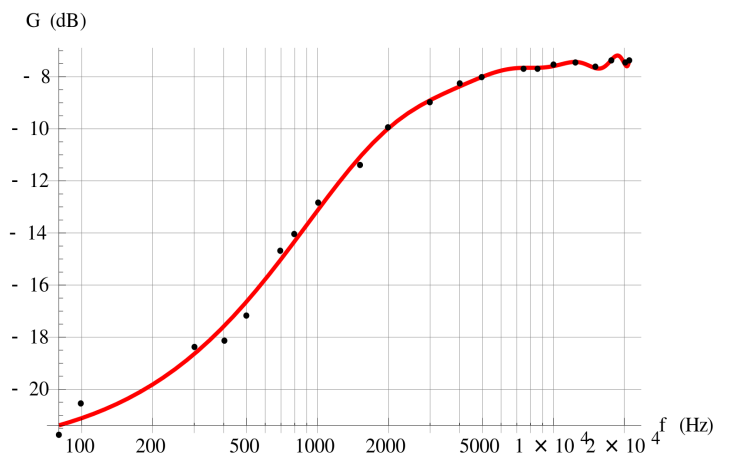


Illustration 19: Diagramme de Bode du système

On trouve un filtre passe-haut, alors que l'on devrait trouver un filtre passe-bas. Il est possible que l'amplitude de l'excitation ait été trop grande. De plus le pot vibrant pour une faible fréquence d'alimentation donnait une amplitude plus grande que pour une plus haute fréquence. Ainsi le filtre créé par le pot vibrant modifie nos résultats. Il aurait fallu un accéléromètre pour trouver le diagramme de Bode du pot vibrant. Rentrent en compte également les filtres mécaniques créés par l'ensemble {bras,pivot}.

On tente une nouvelle expérience en essayant d'appliquer un dirac sur la tête de lecture fixe, en enregistrant le signal on peut le traiter à l'aide d'une transformée de Fourier. On trouve un filtre passe bas. Le filtre est approximatif, il tout de même proche du filtre RIAA. On pouvait s'attendre à un tel filtre de la part d'une platine de ce type. Il est possible que l'amplificateur intégré à la platine filtre également le signal ; et on ne parlera pas des enceintes qui ont une faible bande passante (50 Hz à 10000 Hz).

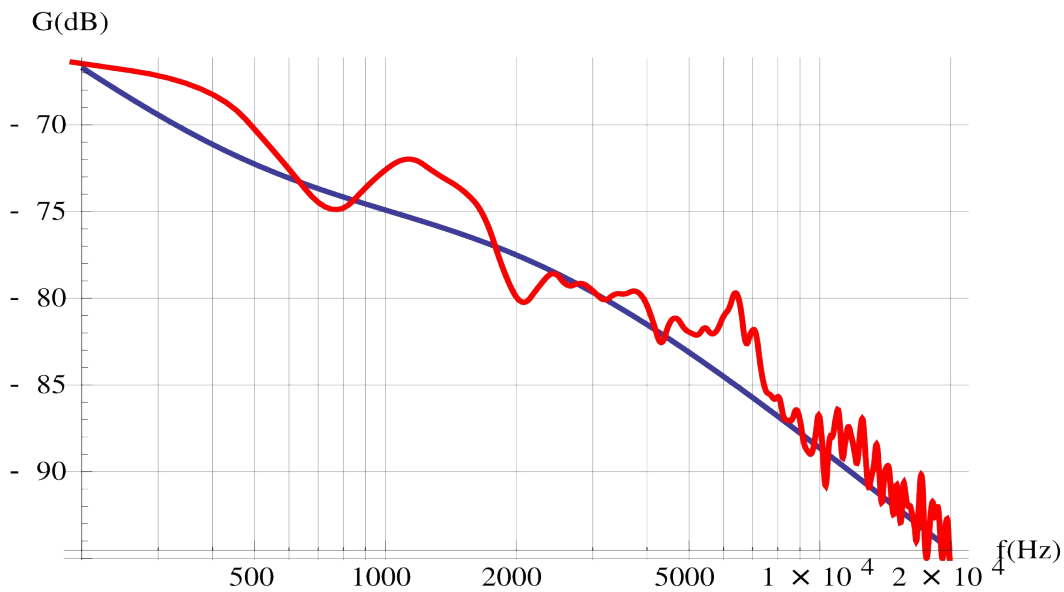


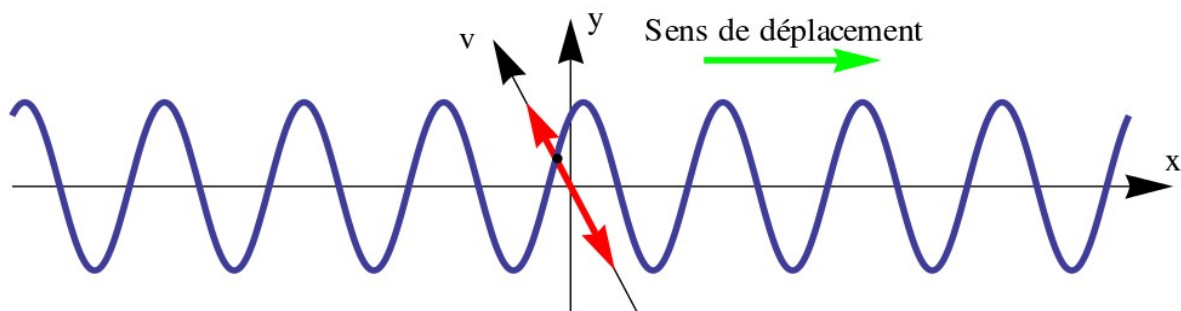
Illustration 20: Diagramme de Bode (en rouge) de la cellule superposé au filtre RIAA (en bleu).

Mise en évidence de l'erreur de trajectoire : est elle audible ?

Étude théorique

Dans la suite, on essaye de reproduire l'effet de l'erreur de trajectoire avec une fonction périodique tel que le sinus (voir annexes page 10).

Afin de reproduire l'erreur de trajectoire, on prend la valeur maximale que l'on a calculé et on va l'appliquer à notre fonction.



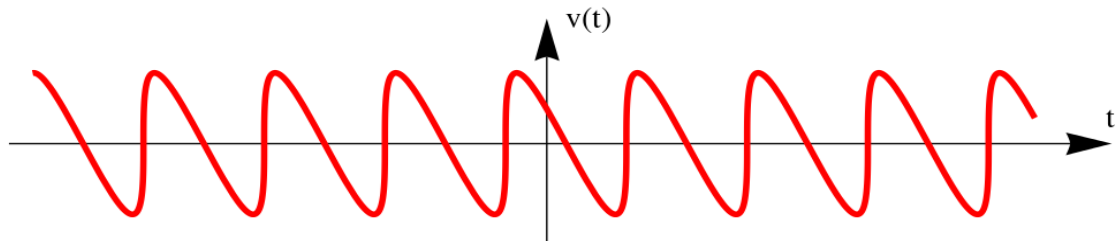
Dessin 6: La position du diamant est l'intersection de la trajectoire du diamant en rouge, et du sillon en bleu.

Sur le vinyle, si on considère localement la lecture du sillon, on peut comparer le déplacement de l'aiguille par le passage de la ligne moyenne du sillon à travers une surface sphérique qui n'est autre que la trajectoire du diamant par rapport au bras. Devant la faible taille des variations et leur rayon, on suppose que cette surface est un plan. On se place pour simplifier le problème dans le cas d'un disque mono. Le problème est alors dans le plan du disque ; on va calculer l'intersection de la fonction avec une droite (fonction affine) orientée par l'angle de lecture. Pour reproduire le

déplacement du sillon, on introduit un déphasage dans la fonction que l'on fait varier.

Ce qui revient à résoudre l'équation $\text{pente} \cdot x = A \cdot \sin\left(x + \frac{t}{T}\right)$ à chaque instant t . On remarque qu'il faut adapter l'amplitude A de la fonction à la variation radiale maximale d'un sillon ($70 \mu\text{m}$).

La résolution de cette équation ne peut se faire que par une recherche par approche. Il faut espérer qu'il n'y a pas deux points d'intersection de la fonction avec la droite ou il ne nous sera pas possible de traiter la fonction et de la jouer.



Dessin 7: Effet de l'erreur d'angle sur un signal sinusoïdal

L'angle d'erreur de trajectoire et l'amplitude du signal sont trop faibles pour avoir un effet audible (voir référence 7)⁷. En augmentant l'angle, on obtient un son encore plus désagréable à écouter, qui semble plus aigu.

On applique également l'effet de l'erreur sur un fichier musical : on récupère une version informatique de l'album qui sera utilisé lors de l'expérience (voir annexes page 12).

Elle est importée sous Mathematica sous forme de liste. On procède à une interpolation pour avoir une fonction du temps que l'on pourra modifier aisément. On exporte le morceau après interpolation, ce sera ce fichier qui permettra la comparaison car l'importation et l'exportation sous Mathematica dégrade la qualité audio.

Il faut également calibrer la fonction :
$$\frac{\Delta r_{max}}{F_{max} - F_{min}} F(t)$$

Les calculs prennent beaucoup de temps (environ 30 minutes), il a fallu à plusieurs reprises diminuer la taille de la piste que l'on manipule.

Il est probable que le fichier audio numérique ait été « remastérisée », ce qui peut rendre la comparaison inutile. Le plus important aura été de comparer le fichier musical avant et après transformation. On n'entend pas de différence entre le fichier exporté et le fichier transformé. L'erreur d'angle a donc été exagéré pour entendre une différence : on entend surtout plus de grésillements⁷. Ces grésillements peuvent provenir du fait que la tangente à la courbe peut être de même pente que la droite de trajectoire du diamant ou que deux solutions aient été trouvées lors de la résolution de l'équation (ce qui ne semble pas être le cas).

Résultats de l'expérience :

Pour vérifier les résultats de la modélisation il faut tout d'abord se munir d'un 33 tour (que l'on n'aime pas ou que l'on a en double...), ici ce sera Breakfast in America de Supertramp. Il y a bien sûr

un risque de détérioration lorsque la tête de lecture est perpendiculaire au sillon. On lit une même piste sur le vinyle en prenant une position tangentielle et une position où l'on exagère l'erreur de piste. On obtient un son entaché de grésillements (sûrement dus à la tête de lecture qui saute), le résultat semble correspondre à la modélisation.

Conclusion

Le CD audio était considéré à ses débuts comme le support utilisé par les audiophiles. Ce support n'est pourtant pas satisfaisant, sans parler de la guerre du volume⁸ qui dégrade l'œuvre original, la fréquence d'échantillonnage est trop faible, et on attend son remplacement par le Super Audio CD (SACD : la fréquence d'échantillonnage est 64 fois supérieure). Cependant ce système est encore très cher pour de « l'audio sur DVD ».

Le disque vinyle grâce à son intense développement est un support de très bonne qualité ; ce sont les systèmes de lecture qui sont imparfaits, pouvant dégrader les fréquences supérieures à 10 kHz. Même les systèmes à bras tangentiels présentent des problèmes. Seuls les systèmes à lecture laser ELP semblent reproduire à la perfection le son analogique. Un système de lecture à aiguille classique de bonne qualité rend ; malgré les erreurs que l'on a vu ; une qualité audio excellente. Ajoutons à cela les circonstances de son utilisation qui peut augmenter l'attention que l'on porte à l'œuvre musicale. Une autre théorie compare la dynamique des supports : les disques vinyles ont une dynamique de 60 dB, les CD 100 dB, et les SACD 120, hors les systèmes audio domestiques dépassent rarement les 50 dB, de surcroît l'écoute à 100 dB est désagréable pour l'oreille humaine.

Un argument fort des CD est le fait qu'il n'y a aucune dégradation du support lors de la lecture, cependant leur durée de vie est revue à la baisse : moins d'une dizaine d'années⁹ : contrairement aux vinyles dont la conservation et la durée de vie est plus longue (malgré le fait qu'ils demandent du soin). Une preuve est que les disques d'occasion qui n'ont pas été manipulés intensivement ne sont abîmés que par des problèmes de soin.

Remerciements :

Au lycée Louis Armand pour m'avoir prêté le matériel et les instruments nécessaires à la réalisation de mon expérience.

Aux professeurs de la classe préparatoire du lycée Louis Armand pour leur aide.

À Stéphane Louvet, internaute passionné de la galette noire.

À Frédéric Vidal, créateur d'audiofolia.

À Hugo Ricateau et mes correcteurs pour leur aide.

À tous les contributeurs au projet wikipédia.

Sources et références :

- Revue du SON n°59-60 - Mars-avril 1958
- Tracking Angle de B. B. Bauer
- Acoustique et Musique de E. LEIPP aux éditions MASSON -1989
- Analytic Treatment Of Tracking Error (and notes on optimal pickup design) de H. G. Baerwald
- Caractéristiques matérielles des disques phonographiques de Silvain Stotzer - Juin 2003
- www.audiofolia.fr
- <http://fr.wikipedia.org>

- 1 [Emission Comment c'est fait ? Les Disques vinyles](#)
- 2 Recording Industry Association of America
- 3 <http://www.laserturntable.com/main.html>
- 4 <http://irene.lbl.gov/>
- 5 [Projet LightBLue](#)
- 6 Tracking Angle, B. B. Bauer
- 7 <http://tribufamily.perso.neuf.fr/vinyle>
- 8 [Guerre du volume \(Loudness War\)](#)
- 9 [Longévité des disques enregistrables \(CD, DVD...\) : mythe ou réalité ?](#)
- 10 [GNU Free Documentation License](#)



Ce document est sous licence libre¹⁰.

Annexes



Illustration 1: Thomas Edison et son phonographe

Charles Cros fut le premier à formuler que les vibrations sonores pouvaient être gravées dans du métal à l'aide d'un crayon rattaché à une membrane vibrante, et que, par la suite, en faisant glisser un stylet rattaché à une membrane sur cette gravure on parviendrait à reproduire le son initial. Cependant Edison réalisa un prototype avant que Cros ne poursuive son projet.

L. totale = 2.1 mm
 L. cut-off = 0.8 mm
 Nr. de cut-off = 2
 Ra = 8.34 μm
 T+ = 0.48 μm
 T- = 0.42 μm
 Rq = 9.77 μm
 RzD = 35.13 μm
 Rmax = 35.85 μm
 Rt = 35.85 μm
 Rp = 13.29 μm
 Pc @ 100.00 = 0/cm

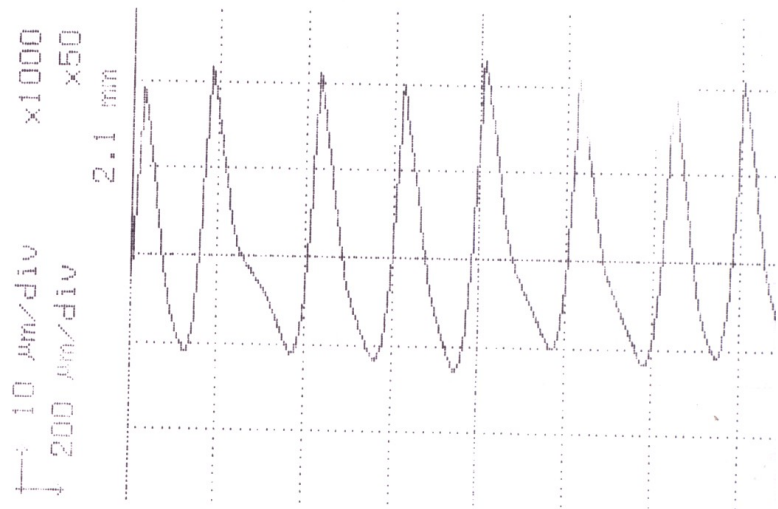


Illustration 2 : Relevé de rugosité radiale d'un flexi disc (sonosheet).

L. totale = 2.1 mm
 L. cut-off = 0.8 mm
 Nr. de cut-off = 2
 Ra = 6.10 μm
 T+ = 0.48 μm
 T- = 0.42 μm
 Rq = 6.97 μm
 RzD = 24.85 μm
 Rmax = 24.90 μm
 Rt = 24.90 μm
 Rp = 9.24 μm
 Pc @ 100.00 = 0/cm

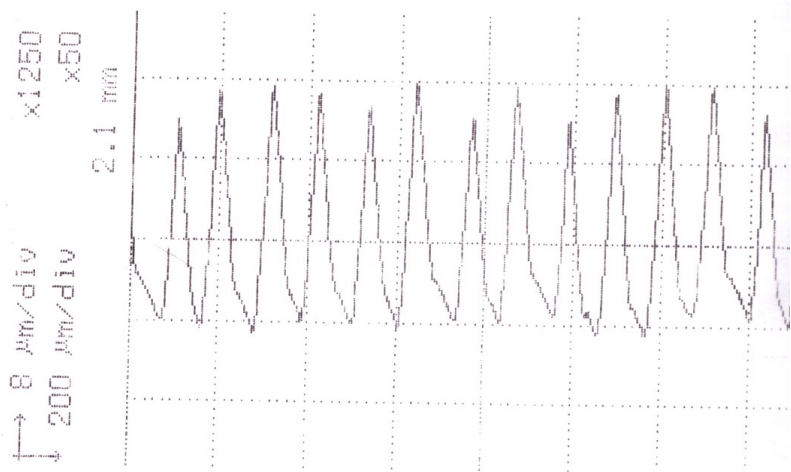


Illustration 3 : Relevé de rugosité radiale du 33 tour Breakfast In America de Supertramp.

L. totale = 2.1 mm
 L. cut-off = 0.8 mm
 Nr. de cut-off = 2
 Ra = 3.69 μm
 T+ = 0.48 μm
 T- = 0.42 μm
 Rq = 4.32 μm
 RzD = 15.43 μm
 Rmax = 15.51 μm
 Rt = 15.72 μm
 Rp = 5.70 μm
 Pc @ 100.00 = 0/cm

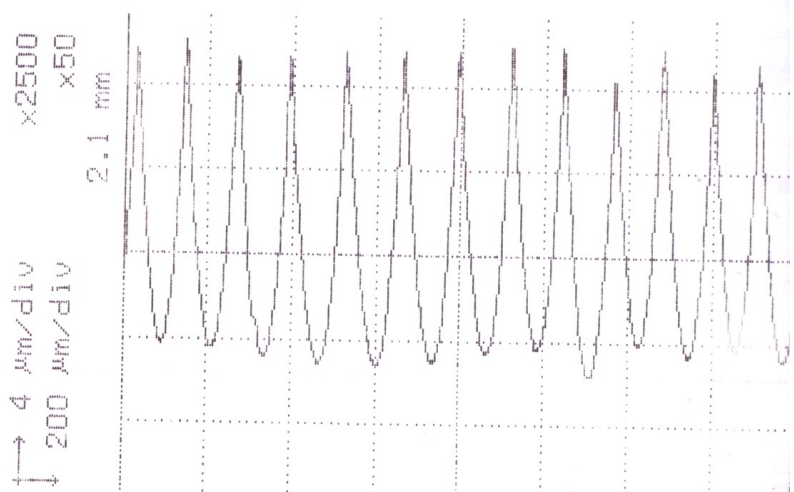


Illustration 4 : Relevé de rugosité radiale du 45 tour Just Blue de Space.

On peut essayer de retrouver la forme du burin en réduisant l'échelle de la hauteur.

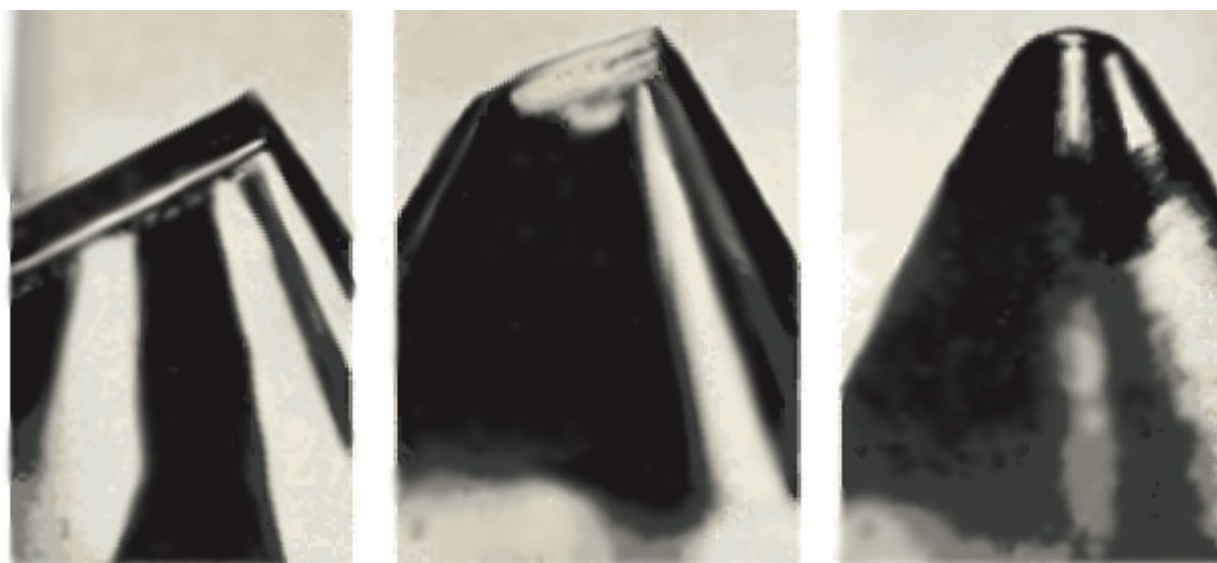


Illustration 5: Les trois types d'aiguille, de gauche à droite :

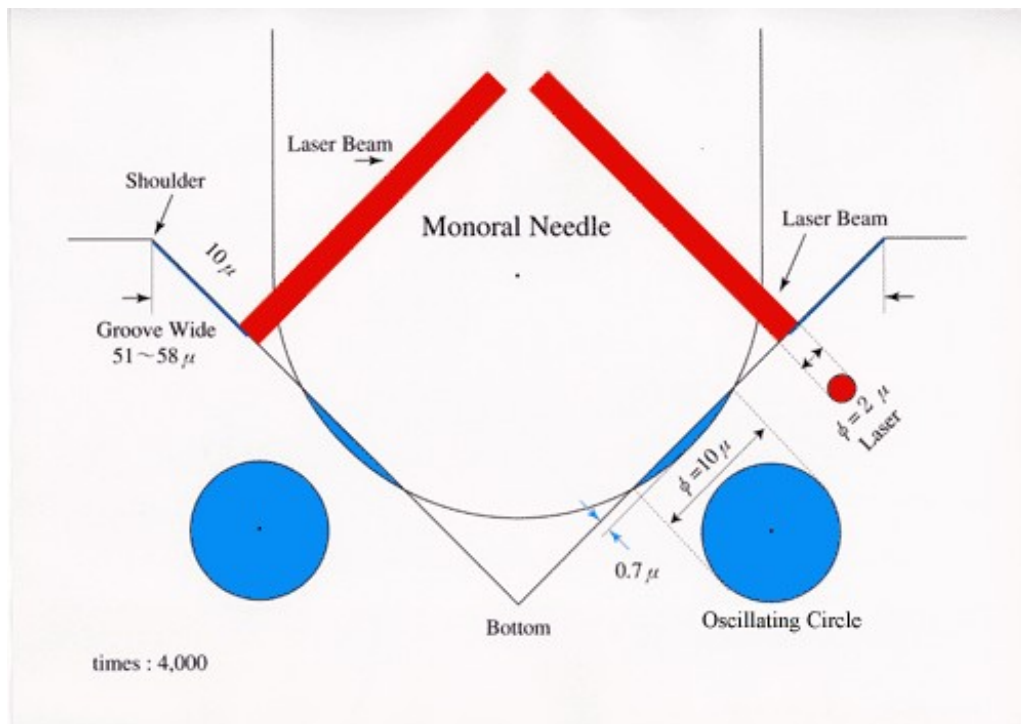
- En osmium après 50 heures d'utilisation*
- En saphir après 50 heures d'utilisation*
- En diamant après 478 heures d'utilisation*



Illustration 6: Une application spatiale mais symbolique du disque vinyle : The Voyager Golden Record et son couvercle sont embarqués sur les deux sondes Voyager lancées en 1977.



Illustration 7: Platine Tangentielle



Dessin 1: Principe de fonctionnement d'une platine laser ELP versus à aiguille

RDM

La poutre est symétrique et de longueur L .

On se place dans le repère (A, \vec{u}, \vec{v})

On oriente la poutre suivant \vec{u} .

On note l'abscisse u séparation de notre poutre.

Il s'exerce sur la poutre un effort radial et un effort vertical en B :

$$\vec{F}_z = F_z \vec{z}$$

$$\vec{F}_y = F_y \sin(\gamma) \vec{u} + F_y \cos(\gamma) \vec{v}$$

- La force radiale produit une flexion de la poutre dans le plan (A, \vec{u}, \vec{z}) .

On a :

$$\{\tau_i\}_G = \{\tau_{F_{ext} \rightarrow II}\}_G$$

$$\{\tau_{F_{ext} \rightarrow II}\}_G = \begin{pmatrix} F_z \vec{z} \\ -(L-u) F_z \vec{v} \end{pmatrix}$$

On applique les résultats de cours :

$$E I_{Gv} Z''(u) = M_{fv} = -(L-u) F_z \text{ avec } Z(u) \text{ la flèche.}$$

$$\frac{E I_{Gv}}{F_z} Z''(u) = -(L-u) \rightarrow \text{On intègre : } \frac{E I_{Gv}}{F_z} Z'(u) = -\frac{(L-u)^2}{2} + C_1$$

$$\text{En A : } u=0 \text{ et } Z'(0)=0 \rightarrow C_1 = \frac{L^2}{2}$$

On intègre encore une fois :

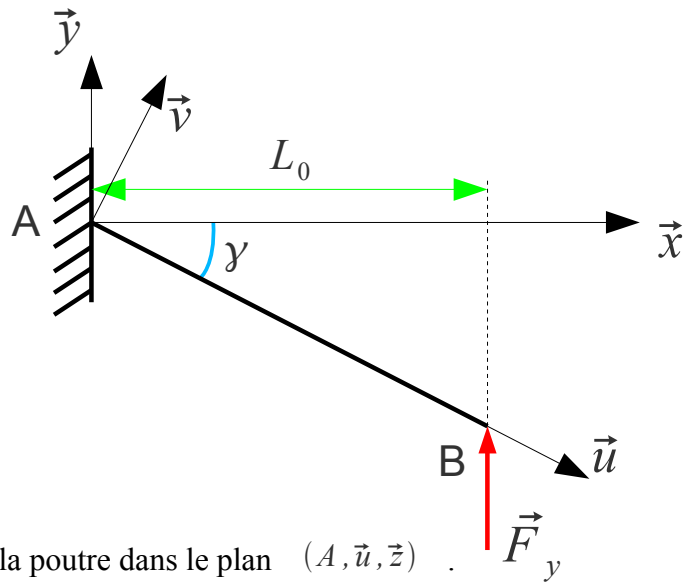
$$\frac{E I_{Gv}}{F_z} Z(u) = \frac{(L-u)^3}{6} + \frac{L^2}{2} u + C_2$$

$$\text{Or } Z(0)=0 \rightarrow C_2 = -\frac{L^3}{6}$$

$$Z(u) = \frac{F_z}{E I_{Gv}} \left(\frac{(L-u)^3}{6} + \frac{L^2}{2} u - \frac{L^3}{6} \right)$$

- Le déplacement vertical (suivant \vec{y}) est provoqué par l'effort F qui induit une flexion simple et une compression.

On appelle δ le déplacement



$$\delta(u) = \delta_{\text{compression } l_y} + \delta_{\text{flexion}}(u)$$

Le calcul de la flèche est similaire au premier :

$$V(u) = \frac{F_y \cos(\gamma)}{E I_{Gz}} \left((L-u)^3 + \frac{L^2}{2} u - \frac{L^3}{6} \right)$$

$$\delta_{\text{flexion}}(u) = V(u) \cos(\gamma)$$

Pour la compression :

Première loi de Hooke :

$$\sigma = E \epsilon_u$$

Et les résultats de cours de traction/compression.

$$\epsilon_u = \frac{\Delta L}{L}$$

$$\sigma = \frac{F_y \sin(\gamma)}{S}$$

$$\Delta L = \frac{L F \sin(\gamma)}{E \pi (R^2 - r^2)}$$

$$\delta_{\text{compression } l_y} = \Delta L \sin(\gamma)$$

Finalement on obtient :

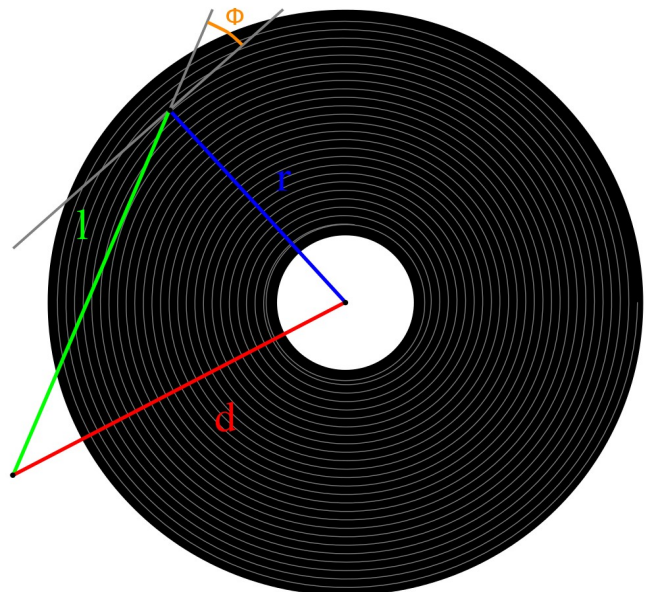
$$\delta(u) = \frac{L F \sin(\gamma)^2}{E \pi (R^2 - r^2)} + \frac{F_y \cos(\gamma)^2}{E I_{Gz}} \left((L-u)^3 + \frac{L^2}{2} u - \frac{L^3}{6} \right)$$

Théorème d'Al-Kashi

$$d^2 = r^2 + l^2 - 2rl \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)$$

$$d^2 = r^2 + l^2 - 2rl \sin(\phi)$$

$$\sin(\phi) = \frac{r}{2l} + \frac{l^2 - d^2}{2lr}$$



Évolution de l'angle d'erreur de trajectoire.

Voici les données de départ.

```
Rvinyle = 304.8 / 2;
rvinyle = 60;
CBras = {-170, -90};
XBrasC = -170;
YBrasC = -90;
RBras = 210;
Vbrasmax = {x, y} /.
  First[Solve[{x^2 + y^2 == Rvinyle^2, (x - XBrasC)^2 + (y - YBrasC)^2 == RBras^2}, {x, y}]];
Vbrasmin = {x, y} /. First[Solve[{x^2 + y^2 == rvinyle^2,
  (x - XBrasC)^2 + (y - YBrasC)^2 == RBras^2}, {x, y}]];

DPivots = Norm[CBras]

10  $\sqrt{370}$ 
```

On définit l'erreur d'angle en fonction de la distance par rapport au centre du disque.

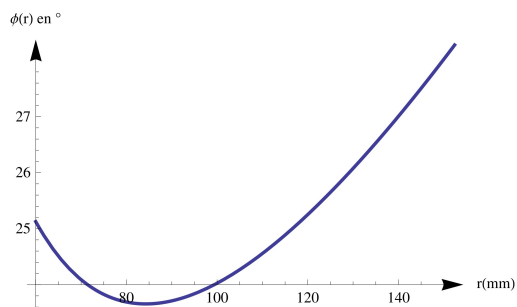
```
 $\phi[r_] = 360 / (2 \pi) \text{ArcSin}[r / (2 \text{RBras}) + (\text{RBras}^2 - \text{DPivots}^2) / (2 \text{RBras} * r)]$ 
```

```

$$\frac{180 \text{ArcSin}\left[\frac{355}{21 r} + \frac{r}{420}\right]}{\pi}$$

```

```
Plot[ $\phi[r]$ , {r, Rvinyle, rvinyle}, PlotStyle -> Thick,
  AxesStyle -> Arrowheads[{0.05}], AxesLabel -> {"r(mm)", " $\phi(r)$  en °"}]
```



```
Export["Tracking_angle.svg",
  Plot[ $\phi[r]$ , {r, Rvinyle, rvinyle}, AxesLabel -> {"r(mm)", " $\phi(r)$  en °"}, PlotStyle -> Thick];
```

On recherche les minimums et maximums de la fonction afin de réduire leur valeur absolue (on centre la fonction).

```
 $\phi[\text{Rvinyle}] > \phi[\text{rvinyle}]$ 
```

```
True
```

```
rmax = Rvinyle;
```

Le maximum est en Rvinyle.

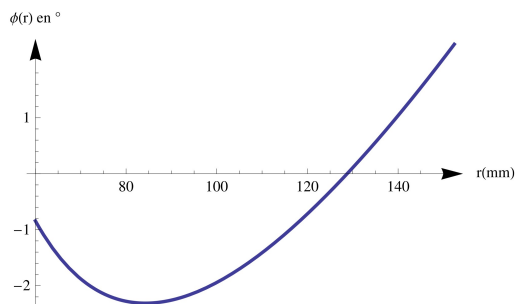
```
rmin = r /. FindMinimum[ $\phi[r]$ , {r, 80}][[2]];
min = First[FindMinimum[ $\phi[r]$ , {r, 80}]];
```

Le minimum est localisé vers $r = 80$ mm

$D1 = \max - \min$

4.62395

`Plot[$\phi[r] - \min - D1 / 2$, {r, Rvinyle, rvinyle}, PlotStyle -> Thick,
AxesStyle -> Arrowheads[{0.05}], AxesLabel -> {"r(mm)", " $\phi(r)$ en °"}]`



On vérifie :

$\phi_{\max} = \phi[Rvinyle] - \min - D1 / 2$

2.31197

$\phi[r_{\min}] - \min - D1 / 2$

-2.31197

$\phi_0 = -\min - D1 / 2$

-25.968

C'est la valeur de l'angle du coude qu'il faut pour minimiser la valeur absolue de l'erreur d'angle (l'effet est le même qu'il soit positif ou négatif).

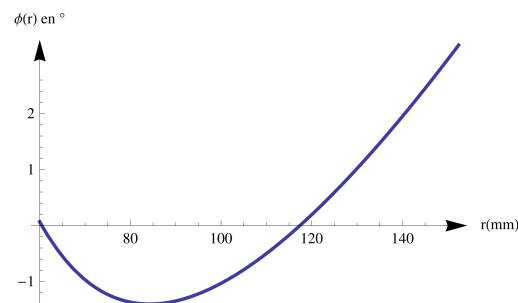
`Export["Tracking_angle_corrige.svg", Plot[$\phi[r] + \phi_0$ {r, Rvinyle, rvinyle}, PlotStyle -> Thick,
AxesStyle -> Arrowheads[{0.05}], AxesLabel -> {"r(mm)", " $\phi(r)$ en °"}];`

On peut également centrer la fonction en annulant sa moyenne

$\phi_1 = NIntegrate[\phi[r], \{r, rvinyle, Rvinyle\}] / (Rvinyle - rvinyle)$

25.0569

`Plot[$\phi[r] - \phi_1$ {r, Rvinyle, rvinyle}, PlotStyle -> Thick,
AxesStyle -> Arrowheads[{0.05}], AxesLabel -> {"r(mm)", " $\phi(r)$ en °"}]`



`Export["Tracking_angle_moy.svg", Plot[$\phi[r] - \phi_1$ {r, Rvinyle, rvinyle}, PlotStyle -> Thick,
AxesStyle -> Arrowheads[{0.05}], AxesLabel -> {"r(mm)", " $\phi(r)$ en °"}];`

L'angle est plus proche, plus longtemps de l'abscisse.

Effet de l'erreur d'angle sur un signal sinusoïdal.

On définit l'erreur d'angle maximale en radians et un déphasage choisi aléatoirement.

```
In[97]:=  $\phi_{\text{max}} = 2.3119747287252093 \cdot 2 \pi / 360;$   
 $\varphi = 2;$ 
```

On définit par une fonction la pente qu'aura la droite représentant la trajectoire du diamant.

```
In[76]:= pente[\phi_] = -1 / Tan[\phi];
```

Il faut adapter l'amplitude de la fonction sinusoïdale avec celle du sillon qui de l'ordre de 70 μm .

```
In[86]:= Amp = 7 * 10^-5;
```

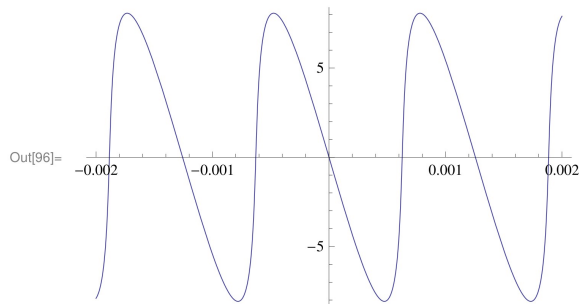
Comme expliqué dans le dossier, on trouve des solutions par recherche.

```
In[99]:= xc = x /. FindRoot[pente[\phi_max] * x - Amp * Sin[x + \varphi] == 0, {x, 0}]
```

```
Out[99]=  $-2.56981 \times 10^{-6}$ 
```

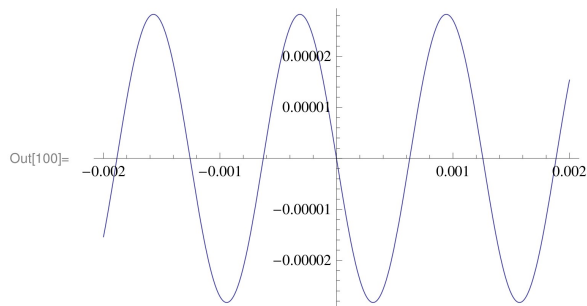
φ est calculé à l'instant t tel $\varphi = t * \text{Fréquence}$. En faisant varier φ on simule le passage de la fonction sinus à travers la droite.

```
In[96]:= Plot[10 * x /. FindRoot[pente[\phi_max] * x - 20 * Sin[x + t * 5000] == 0, {x, 0}], {t, -0.002, 0.002}]
```



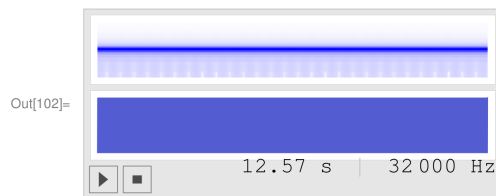
Plus l'amplitude de la fonction est grande, plus elle est modifiée en effet cela équivaut à diminuer la pente de la droite donc d'augmenter l'angle d'erreur de trajectoire.

```
In[100]:= Plot[10 * x /. FindRoot[pente[\phi_max] * x - Amp * Sin[x + t * 5000] == 0, {x, 0}], {t, -0.002, 0.002}]
```



À l'allure de la fonction on se doute que l'on entendra pas de différence entre notre fonction initiale et notre fonction modifiée.

```
In[102]:= Play[Amp * Sin[x * 5000], {x, 0, 4 π}, SampleRate → 32 000]
```

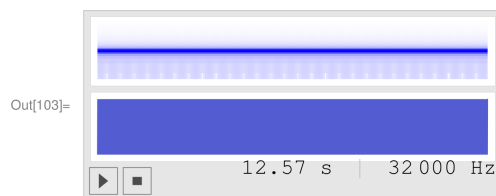


L'amplitude du signal ne modifie pas le volume lors de la lecture du signal (elle ne modifie rien).

```
In[104]:= Export["sinus.wav", Play[Amp * Sin[x * 5000], {x, 0, 4 π}, SampleRate → 32 000]]
```

```
Out[104]= sinus.wav
```

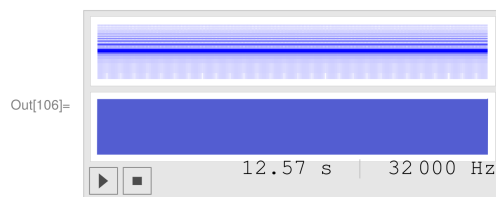
```
In[103]:= Play[10 * x /. FindRoot[pente[φ max] * x - Amp * Sin[x + φ * 5000] == 0, {x, 0}],  
{φ, 0, 4 π}, SampleRate → 32 000]
```



```
In[105]:= Export["sinus_erreur.wav",  
Play[10 * x /. FindRoot[pente[φ max] * x - Amp * Sin[x + φ * 5000] == 0, {x, 0}],  
{φ, 0, 4 π}, SampleRate → 32 000]]
```

```
Out[105]= sinus_erreur.wav
```

```
In[106]:= Play[10 * x /. FindRoot[pente[φ max] * x - 20 * Sin[x + φ * 5000] == 0, {x, 0}],  
{φ, 0, 4 π}, SampleRate → 32 000]
```



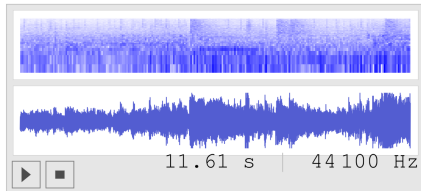
```
In[108]:= Export["sinus_erreur_audible.wav",  
Play[10 * x /. FindRoot[pente[φ max] * x - 20 * Sin[x + φ * 5000] == 0, {x, 0}],  
{φ, 0, 4 π}, SampleRate → 32 000]]
```

```
Out[108]= sinus_erreur_audible.wav
```

Importation et pré-traitement du fichier son.

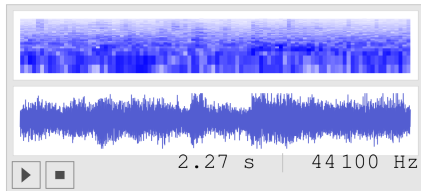
On importe le son sous forme de liste.

```
In[1]:= TuneList = Import["super.wav", {"Data", 1}];  
ListPlay[TuneList, SampleRate -> 44100]
```



On prend seulement une partie du fichier importé.

```
In[2]:= TuneListpar = Take[TuneList, 100000];  
ListPlay[TuneListpar, SampleRate -> 44100]
```

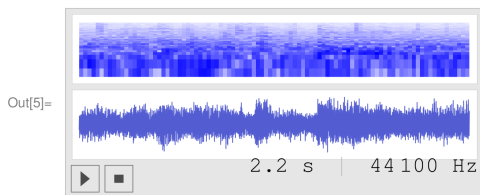


On rajoute la donnée du temps à chaque valeur de notre liste.

```
In[3]:= Do[TuneListpar = ReplacePart[TuneListpar, n -> {n / 44100, TuneListpar[[n]]},  
{n, Length[TuneListpar]}]
```

Ceci nous permet de faire une interpolation de la fonction qui sera plus facilement manipulable.

```
In[4]:= TuneFunc = Interpolation[TuneListpar];  
In[5]:= Play[TuneFunc[t], {t, 0, 2.2}, SampleRate -> 44100]
```



On exporte le fichier qu'on a importé, car l'opération d'importation dégrade le son et il est possible que l'interpolation le modifie également.

```
In[6]:= Export["superexp.wav", Play[TuneFunc[t], {t, 0, 2.2}, SampleRate -> 44100]]
Out[6]= superexp.wav
```

Ce fichier sera considéré comme l'original, c'est sur celui-ci que l'on se basera pour faire nos comparaisons.

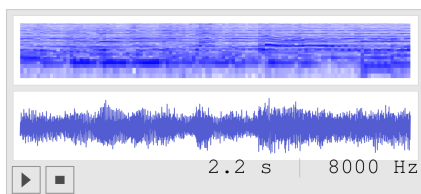
Simulation de l'effet de l'erreur d'angle.

Comme calculé pour la platine, l'erreur d'angle maximum en radians est :

```
In[7]:= phi_max = 2.3119747287252093` * 2 * Pi / 360;
In[8]:= pente[phi_] = -1 / Tan[phi];
```

On adapte la fonction à la taille de l'amplitude du sillon :

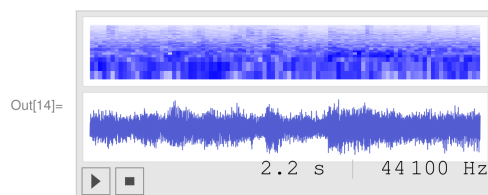
```
In[9]:= Amp = 7 * 10^-5;
In[10]:= FMax = Max[TuneListpar] // N
Out[10]= 2.26757
In[11]:= FMin = Min[TuneListpar]
Out[11]= -0.280853
In[12]:= TuneFuncAmp[t_] = Amp / (FMax - FMin) * TuneFunc[t];
Play[x /. FindRoot[pente[phi_max] * x - TuneFuncAmp[t] == 0, {x, 0}], {t, 0, 2.2}, SampleRate -> 44100]
```



```
In[13]:= Export["superexp_erreur.wav", Play[
  x /. FindRoot[pente[phi_max] * x - TuneFuncAmp[t] == 0, {x, 0}], {t, 0, 2.2}, SampleRate -> 44100]]
Out[13]= superexp_erreur.wav
```

On n'entend pas la différence, on réessaye avec une erreur d'angle supérieure.

```
In[14]:= Play[x /. FindRoot[pente[Pi / 4] * x - TuneFuncAmp[t] == 0, {x, 0}], {t, 0, 2.2}, SampleRate -> 44100]
```



```
In[17]:= Export["superexp_erreur_audible.wav", Play[
  x /. FindRoot[pente[Pi / 3] * x - TuneFuncAmp[t] == 0, {x, 0}], {t, 0, 2.2}, SampleRate -> 44100]]
Out[17]= superexp_erreur_audible.wav
```