

VisualAudio :

**Caractéristiques
matérielles des disques
phonographiques**

Sylvain Stotzer

Publication interne n° 03-09

Juin 2003

Département d'Informatique
Université - Pérolles
Chemin du Musée 3
CH-1700 Fribourg
(Suisse)

tél. : (+41 26) 300 84 65
fax : (+41 26) 300 97 31
iiuf-secr-per@unifr.ch
www.unifr.ch/iiuf

VisualAudio :

Caractéristiques matérielles des disques Phonographiques.

Résumé

Le projet VisualAudio est le fruit d'une collaboration entre le Département d'Informatique de l'Université de Fribourg et l'Ecole d'ingénieurs et d'architecte de Fribourg, avec la participation de la phonothèque Nationale Suisse à Lugano et de l'école d'Arts Appliqués de Vevey.

VisualAudio propose une nouvelle technique d'archivage et de lecture visuelle des disques phonos. La première phase de ce projet consiste à décrire les images des disques afin d'adapter au mieux le processus de lecture. Pour ceci, il est indispensable de connaître en détail la technologie phonographique. Ce document présente la technologie d'enregistrement phonographique ainsi que les aspects physiques et géométriques des disques qui en découlent. Différents types de détérioration des disques sont également présentés, puisqu'ils influencent directement l'image du disque et le contenu sonore.

Table des matières

1	Introduction	4
2	Historique	5
3	Matériaux	5
3.1	Shellac	5
3.2	Vinyle	6
3.3	Déformation des matériaux	6
4	Enregistrements	6
4.1	Acoustique	6
4.2	Électrique	6
4.3	Courbes d'égalisation	7
4.4	Standard RIAA	8
4.5	Dynamique	9
5	Modes de gravure	9
5.1	Mono	9
5.2	Stéréo	10
6	Burin de gravure	11
7	Tête de lecture	11
8	Vitesses de rotation	12
8.1	78 tours	12
8.2	33 tours	12
8.3	45 tours	13
9	Caractéristiques géométriques des sillons	13
10	Sources de dégradation du son	13
10.1	Matériaux	13
10.2	Usure	13
10.3	Vieillessement	14
10.4	Enregistrement	14
10.5	Gravure	14
10.6	Non-linéarité de lecture	14
10.7	Lecture	15
11	Type de dégradation du son et restauration	15
11.1	Bruit de fond	16
11.2	Bruits impulsionnels (impulsive noise ou clicks)	16
11.3	Craquements (crackles ou scratches)	16
11.4	Pleurage	17
11.5	Distorsion	17
12	Conclusion	17
13	Références	18

1 Introduction

Le projet VisualAudio propose une nouvelle méthode d'archivage et de lecture des disques phonographiques par l'intermédiaire d'une photographie. Tout d'abord le disque est photographié avec un film à haute définition, qui permet de distinguer précisément le contour du sillon. Ensuite ce film est digitalisé au moyen d'un scanner conçu spécifiquement. La dernière phase consiste à traiter cette image digitalisée afin d'analyser le déplacement du sillon, et d'extraire le contenu sonore du disque. La Fig. 1 illustre le principe du projet VisualAudio. Une description plus détaillée de ce projet et de ses motivations se trouve dans [VA01].

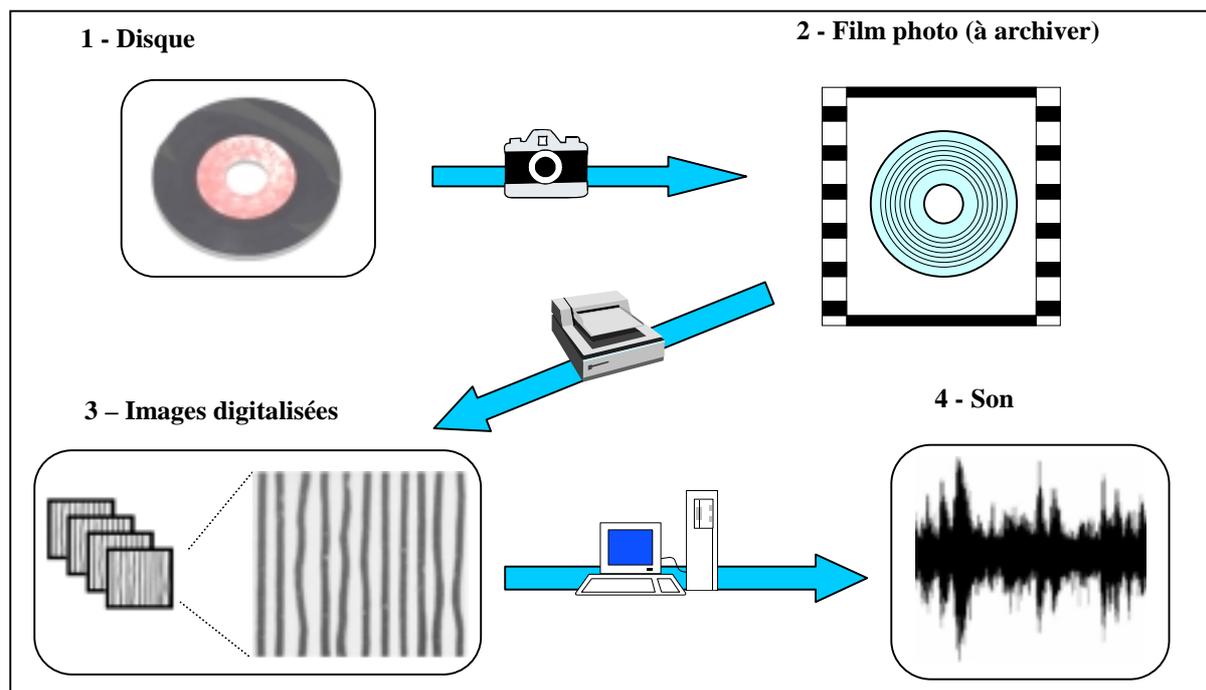


Fig. 1. Principe du projet VisualAudio : le disque est pris en photo, cette photo est scannée, puis le contenu sonore est extrait de l'image digitalisée.

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. Afin de connaître au mieux les caractéristiques des images à analyser pour VisualAudio, il faut tout d'abord bien comprendre le processus de création des disques phonos ainsi que les caractéristiques physiques de ceux-ci. Le présent document décrit le fonctionnement et la géométrie des disques phonographiques, ainsi que les dégradations du son qui peuvent se produire dans le cas particulier des enregistrements phonographiques. Cet état des lieux se fait dans le contexte du projet VisualAudio, c'est pourquoi la description de certains aspects physiques à priori secondaires de la technologie phono, tels la taille ou la forme des sillons, ont été privilégiés par rapport à d'autres sujets, comme le processus de lecture par le tourne-disque, qui ne rentrent pas en ligne de compte dans le cadre de VisualAudio.

2 Historique

Commençons par énumérer quelques dates importantes de l'histoire du disque phono.

- 1857 Léon Scott de Martinville développe le phonoautographe : un système qui retranscrit les fluctuations de pression de l'air dues au son sur un cylindre. Mais il n'existe pas encore d'appareil pour restituer ces sons.
- 1877 Edison invente le phonographe en enregistrant pour la première fois de la voix humaine sur un cylindre de cire.
- 1887 Berliner crée le gramophone qui permet d'écouter des disques plats, avec gravure latérale.
- 1897 Le shellac est utilisé pour fabriquer des disques.
- 1901 Standardisation du 78t par la compagnie Victor, constructeur de gramophones.
- 1925 Premiers enregistrements électriques.
- 1925 Création des premiers 33t.
- 1929 Début de l'utilisation du vinyle.
- 1931 Premiers enregistrements stéréo.
- 1948 Introduction des microsillons et des LP (Long Play) permettant de stocker environ 23 minutes de musique par face de disque 33t.
- 1949 Création du 45t microsillon.
- 1950 Introduction des disques 16t 2/3 pour les enregistrements contenant uniquement de la voix.
- 1954 Standard RIAA pour l'égalisation des hautes et basses fréquences.
- 1957 La RIAA unifie le processus de gravure en stéréo en créant le standard Westrex.

Les termes phonographe et gramophone, bien que décrivant initialement deux techniques différentes d'enregistrement, ont par la suite été indistinctement utilisés pour la dénomination des systèmes de lecture de disques. L'utilisation d'un terme ou de l'autre a ainsi été plutôt influencée par le langage usuel et ses régionalismes que par des raisons technologiques ou historiques. Phonographe sera ainsi la terminologie utilisée dans ce présent document.

3 Matériaux

Divers matériaux ont été utilisés pour la fabrication des cylindres et des disques, tels que la cire, la cellulose, le vulcanite, etc... Pour les disques, on retiendra principalement le shellac et le vinyle.

3.1 Shellac

Le shellac est à la base une résine naturelle provenant d'Asie. Celle-ci est additionnée de liants, de poudre abrasive et de carbone, employé pour la coloration et pour augmenter la conductivité afin de réduire l'électricité statique. Il est ainsi difficile de préciser quelle est la granulométrie du shellac, étant donné qu'il y a eu de grandes variations dans la composition de cet agrégat. Le shellac a été utilisé dans l'industrie phonographique de 1897 à 1950 environ.

3.2 Vinyle

Le manque de résine lors de la deuxième guerre mondiale a favorisé l'émergence du vinyle (polychlorure de vinyle ou PVC). Le vinyle ayant un grain beaucoup plus fin (environ 50 Angström = $5 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$), il permet de graver des sillons plus étroits et rapprochés.

3.3 Déformation des matériaux

La tête de lecture étant beaucoup plus dure que le disque lui-même, on peut simplifier les problèmes de déformation lors de la lecture à la déformation du disque uniquement.

On distingue 2 types de déformations du disque lors de la lecture :

- La déformation élastique. Le disque se déforme légèrement sous la pression du stylet, mais retrouve quasi-instantanément sa forme d'origine lorsque celui-ci s'est déplacé. Cette déformation est caractérisée par le module d'élasticité de Young, représentant la proportionnalité entre la contrainte et la déformation. Cette déformation est réversible.
- La déformation plastique. Ce type de déformation n'apparaît qu'à partir d'un certain seuil de contrainte, appelé seuil de plasticité, dépendant du matériau. Cette déformation est permanente et irréversible

Le shellac a une limite de plasticité environ 2 fois supérieure au vinyle. Ainsi il supporte mieux les contraintes plus fortes. Le shellac possède un module d'élasticité environ 3x plus élevé que le vinyle. C'est-à-dire qu'il faut y exercer une force 3 fois plus grande pour obtenir une même déformation élastique. Ceci signifie également qu'à pression égale, le vinyle se déformera momentanément plus que le shellac et aura donc une plus grande surface de contact entre le disque et la tête de lecture, ce qui réduit le rapport poids/surface. Ainsi le shellac est plus résistant que le vinyle sous le poids des stylets lourds des anciens pick-up.

4 Enregistrements

L'enregistrement consiste à graver la modulation du son sur un disque. Les premiers disques étaient directement gravés, c'est-à-dire qu'il fallait graver chaque disque indépendamment, soit en jouant plusieurs fois le même morceau de musique, soit en ayant plusieurs graveurs en parallèle. Par la suite, la gravure se fit sur un original, qui servait à fabriquer un moule pour presser les disques de façon industrielle. Dans les deux cas, l'opération la plus sensible reste la gravure proprement dite. Ainsi même si un disque a été moulé, on parlera principalement de la gravure de ses sillons.

4.1 Acoustique

Aux débuts du gramophone, les disques étaient enregistrés de façon acoustique. La prise de son se faisait au moyen d'une corne au fond de laquelle se trouvait un diaphragme. Les vibrations de celui-ci étaient transmises mécaniquement à un burin qui gravait ainsi les variations de pression de l'air sur le disque original. Donc toute l'énergie de l'enregistrement provenait du son, sans aucune amplification. Ce système limitait beaucoup la bande de fréquence enregistrable.

4.2 Électrique

Au milieu des années vingt, on put utiliser des microphones et des amplificateurs pour l'enregistrement et la lecture. Ceci permit d'améliorer la qualité du son, d'augmenter la dynamique des enregistrements et d'amplifier la puissance du son à la lecture du disque. Mais l'électronique apporte également d'autres avantages, puisque cela permet de filtrer le son et donc de corriger certains défauts.

4.3 Courbes d'égalisation

Si les vibrations enregistrées ont une énergie égale dans tout le spectre des fréquences, alors le bras du burin de gravure aura une vitesse moyenne constante pour toutes ces fréquences. Ce mode d'enregistrement est dit à vitesse constante.

Mais une vitesse moyenne constante signifie que l'excursion du sillon doublera à chaque fois que le signal descend d'une octave, ce qui présente les inconvénients suivants:

- Dans les basses fréquences, l'excursion devient grande et oblige à augmenter le pas de sillonnage, ce qui diminue la durée d'enregistrement.
- Dans les hautes fréquences, l'excursion devient petite et le signal se noie dans le bruit de fond.

Ainsi ce mode d'enregistrement nécessite des corrections à l'enregistrement et à la lecture du disque afin de limiter ces défauts.

En atténuant progressivement les amplitudes des basses fréquences à partir d'un certain seuil fréquentiel à l'enregistrement, le sillon occupera une plus petite portion du disque et on réalise un gain de place. A la lecture du disque, la puissance sonore des basses fréquences doit être augmentée en conséquence afin de restituer le son original (bass booster). Un autre filtrage est parfois encore effectué pour aplatir la courbe à l'enregistrement dans les très basses fréquences (lower bass turnover), afin d'assurer une qualité de son constante également dans ces basses fréquences.

Par contre les hautes fréquences sont amplifiées à l'enregistrement (treble pre-emphasis), afin d'augmenter la dynamique et le rapport signal sur bruit. La puissance sonore de cette plage de fréquence doit être diminuée de manière inverse à la lecture.

System	Treble turnover	Bass turnover	Low bass turnover	Cut at 10 kHz	Boost at 50 Hz
US MID 30	-	400 Hz	70 Hz	-	16 dB
WESTREX	-	200 Hz	-	-	15 dB
HMV/Blumlein	-	250 Hz	50 Hz	-	12 dB
FFRR 78 (1949)	6.36 kHz	250 Hz	40 Hz	5 dB	12 dB
Early DECCA	5.8 kHz	150 Hz	-	6 dB	11 dB
Columbia	1.6 kHz	300 Hz	-	16 dB	14 dB
BSI	3.18 kHz	353 Hz	50 Hz	10.5 dB	14 dB

Fig. 2. Paramètres des courbes d'égalisation à la lecture pour les disques 78t ([Wilmüt], [Vadlyd])

System	Treble turnover	Bass turnover	Low bass turnover	Cut at 10 kHz	Boost at 50 Hz
RIAA (CCIR)	2.1215 kHz	500,5 Hz	50,5 Hz	13,6 dB	17 dB
FFRR LP (1953)	3 kHz	450 Hz	100 Hz	11 dB	12,5 dB
EMI LP	2,5 Khz	500 Hz	70 Hz	12 dB	14,5 dB
NAB	1,6 kHz	500 Hz	-	16 dB	16 dB
Columbia	1590Hz	500Hz	100Hz	16dB	12.5dB

Fig. 3. Paramètres des courbes d'égalisation à la lecture pour les disques microsillon ([Wilmüt], [Vadlyd])

Ces corrections en hautes et basses fréquences sont définies par une courbe de réponse fréquentielle. Cette courbe est caractérisée par les seuils fréquentiels (turnover) à partir desquels on applique ces corrections, ainsi que par les facteurs d'amplification et d'atténuation.

Dans les années 40-50, de nombreux systèmes d'égalisation ont été utilisés et pratiquement chaque maison de disque utilisait sa propre courbe d'égalisation. Malheureusement il n'est pas toujours fait mention sur le disque de la courbe utilisée à l'enregistrement.

4.4 Standard RIAA

En 1954, la RIAA (Recording Industry Association of America) a standardisé ce processus d'égalisation en créant la norme RIAA qui spécifie ces courbes d'égalisations. La plupart des disques postérieurs à 1955 ont été enregistrés avec des filtres RIAA. Trois constantes de temps sont ainsi définies, correspondant à 3 seuils fréquentiels :

Low bass turnover

$$\frac{1}{\omega_1} = \tau_1 = 3180 \mu s$$

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 50.05 Hz$$

Bass turnover

$$\frac{1}{\omega_2} = \tau_2 = 318 \mu s$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = 500.5 Hz$$

Treble turnover

$$\frac{1}{\omega_3} = \tau_3 = 75 \mu s$$

$$f_3 = \frac{\omega_3}{2\pi} = 2122 Hz$$

A l'enregistrement, les fréquences en dessous de 500Hz sont atténuées de 6dB par octave et celles au-dessus de 2122Hz sont augmentées de 6dB par octave. A la lecture, le préamplificateur utilise la courbe inverse. La courbe d'enregistrement se compose de 2 filtres passe-haut pour les seuils de 50.05Hz (3180 μs) et 2122 Hz (75 μs), et d'un filtre passe-bas à 500.5Hz (318 μs) :

$$H_1(j\omega) = 1 + j\omega\tau_1 = 1 + \frac{j\omega}{2\pi f_1}$$

$$H_2(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau_2}$$

$$H_3(j\omega) = 1 + j\omega\tau_3 = 1 + \frac{j\omega}{2\pi f_3}$$

La combinaison de ces 3 filtres définit la fonction de transfert pour l'enregistrement :

$$H_e(j\omega) = H_1(j\omega)H_2(j\omega)H_3(j\omega) = \frac{(1 + j\omega\tau_1)(1 + j\omega\tau_3)}{1 + j\omega\tau_2}$$

Le préamplificateur du tourne-disque doit appliquer exactement la fonction de transfert inverse lors de la lecture :

$$H_a(j\omega) = 1/H_e(j\omega) = \frac{1 + j\omega\tau_2}{(1 + j\omega\tau_1)(1 + j\omega\tau_3)}$$

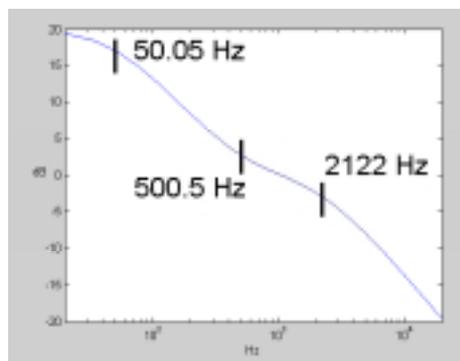


Fig. 4. Courbe d'égalisation RIAA appliquée par le préamplificateur à la lecture : les basses fréquences sont amplifiées et les hautes fréquences atténuées afin de recréer le son original.

4.5 Dynamique

La dynamique d'un enregistrement peut être représentée en dB par son rapport signal sur bruit, c'est-à-dire le rapport entre la puissance du signal enregistré et la puissance du bruit de fond.

La qualité et la puissance du son n'a cessé de s'améliorer avec la technologie. Ainsi la dynamique a progressivement augmenté et le spectre des fréquences enregistrables s'est agrandi. Le tableau de la Fig. 5 ci-dessous permet de comparer ces évolutions au cours du temps.

Année	Type d'enregistrement	dB	Spectre (Hz)
1897	Disques shellac	28	168-2000
1925	Enregistrement électrique	30	100-5000
1931	Disque vinyle	60	30-10000
1944	Decca FFRR	60	10-15000

Fig. 5. Dynamique et volume d'enregistrement des disques phonos.

Le spectre des fréquences audibles pour l'être humain est, dans les meilleures conditions et pour une oreille très fine, compris entre 20Hz et 20'000Hz. Mais la dynamique des disques Decca FFRR (Full Frequency Range Recordings) qui est comprise entre 10Hz et 15'000Hz couvre toutes les fréquences audibles pour la plupart des gens.

5 Modes de gravure

5.1 Mono

L'enregistrement mono est composé d'un seul signal. Il nécessite ainsi une gravure dans une seule dimension. On peut donc graver les modulations du signal mono soit en profondeur, soit de façon latérale.

- En profondeur : les vibrations sont enregistrées dans un plan perpendiculaire au disque. Etant donné que le burin a une forme conique, le sillon s'élargit en surface en même temps qu'il devient plus profond.
- Latéral : le signal module le déplacement du sillon qui se déplace latéralement dans un plan parallèle au disque. Les sillons gardent ainsi une largeur constante en surface. La spirale effectuée par le sillon depuis le bord jusqu'au centre du disque représente ainsi une distorsion du signal original. Mais si la spirale est régulière, la fréquence de cette distorsion est extrêmement basse et elle reste donc totalement inaudible.

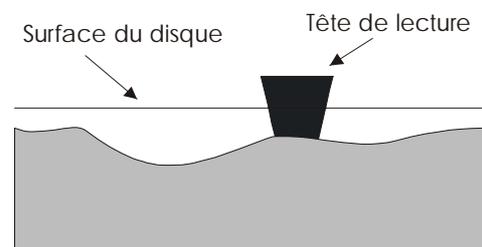


Fig. 6. Vue de profil d'un sillon gravé en profondeur

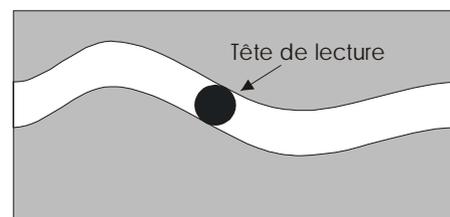


Fig. 7. Vue de dessus d'un sillon en gravure latérale

La plupart des cylindres et une première génération de disques plats (Pathé, Edison Diamond disc,...) furent gravés en profondeur. Mais il fut prouvé vers 1910 que les distorsions à la lecture sont nettement plus faibles pour la gravure latérale. C'est pourquoi la gravure en profondeur ne fut plus pratiquée par la suite.

5.2 Stéréo

Les enregistrements stéréo se font sur deux canaux : gauche et droit. En disposant des techniques de gravure mono, on peut distinguer 2 modes de gravure possibles pour les enregistrements stéréo :

- latéral/vertical : un canal module le sillon latéralement et l'autre canal est gravé en profondeur. Ce système reste marginal car il n'est pas vraiment satisfaisant. En effet les têtes de gravure et de lecture sont relativement complexes à réaliser. De plus la qualité du son n'est pas la même pour les deux canaux.
- $45^\circ \times 45^\circ$: la gravure est oblique à 45° dans les 2 directions. Les bords interne (proche du centre) et externe du sillon portent respectivement les modulations des canaux gauche et droit. Ainsi le déplacement latéral du sillon représente la variation de la somme des signaux gauche et droit (composante mono), alors que la profondeur représente la différence des deux signaux (composante stéréo). Ce système assure une compatibilité entre les enregistrements mono et stéréo, puisqu'ainsi un disque stéréo peut être lu sur un lecteur mono et inversement.

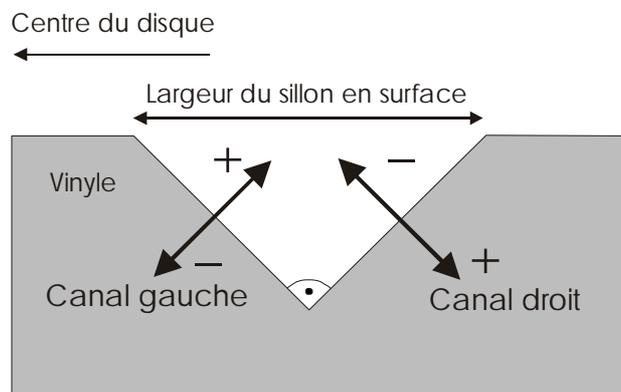


Fig. 8. Mode de gravure stereo $45^\circ/45^\circ$

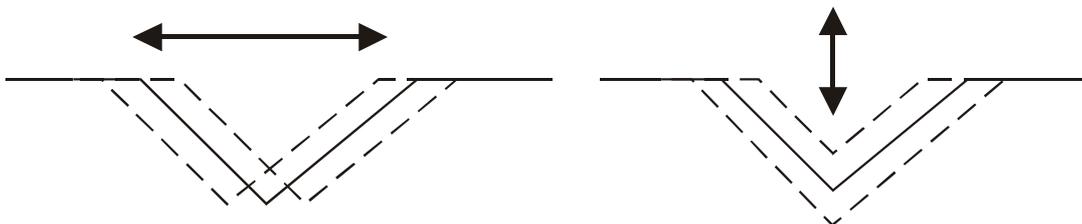


Fig. 9. Si les canaux droite et gauche sont en phase, le sillon se déplace latéralement. Lorsque les canaux droite et gauche sont en opposition de phase, le sillon se déplace verticalement.

6 Burin de gravure

Les burins de gravure sont généralement en acier, saphir, rubis ou diamant. Les burins utilisés pour les 78t étaient arrondis, ce qui créait des sillons de forme arrondie, en U. Par contre les disques microsillons stéréo sont gravés avec des burins en V d'un angle de 90° afin de pouvoir moduler les deux parois du sillon indépendamment.

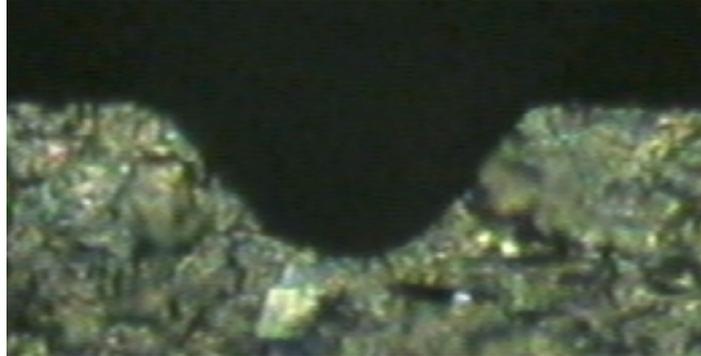


Fig. 10. Profil d'un sillon 78 tours en forme de U, agrandi environ 400 fois.

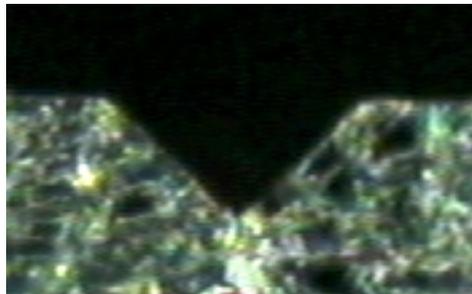


Fig. 11. Profil d'un microsillon 33 tours en forme de V, agrandi environ 400 fois.

Les côtés du burin sont chauffés afin de lisser les parois et d'éviter que le sillon ne soit endommagé. L'utilisation de burins chauffants ainsi que le passage au vinyle permirent de passer à la technique des microsillons en réduisant considérablement le diamètre des burins de gravure et la taille des sillons.

	Inch	µm
78t	0.0015 - 0.0025	38.1 - 63.5
33t	0.00025	6.35

Fig. 12. Rayon de courbure de la pointe des burins de gravure standards pour les disques 33t et 78t.

7 Tête de lecture

Pour les disques en gravure latérale, la tête de lecture est nettement moins fine que le burin de gravure, afin de s'appuyer sur les parois du sillon et non pas sur le fond, ce qui limite le bruit de surface. Les têtes de lecture sont généralement en acier, fibre, saphir ou diamant. Les plus anciennes sont de forme conique avec une tête sphérique. Alors que les stylets plus modernes sont de formes elliptiques, de même largeur que les têtes sphériques, mais moins longs afin de limiter les non-linéarités de lecture (cf. paragraphe 10.6). Il existe également des stylets à tête plate pour rejouer des disques aux sillons très larges ou abîmés sans toucher le fond du sillon.

	Inch	µm
78t	0.0025 - 0.004	63.5 - 100
33t mono	0.001	25.4
33t stéréo	0.0005 - 0.0007	12.5 - 17.5

Fig. 13. Rayon de courbure des têtes de lecture standard pour les différents types de disques à gravure latérale.

Les têtes de lecture des premiers gramophones pesaient jusqu'à 100 grammes. Puisqu'il n'y avait pas d'amplificateur à l'époque, ce poids était nécessaire au système de lecture pour donner une puissance suffisante au son. Ce poids important empêchait également la tête de sauter d'un sillon à l'autre, mais provoquait rapidement une usure des disques. Cependant la plupart des tourne-disques pour 78t n'exercent qu'une pression de 5 grammes environ, alors que les microsillons ne nécessitent pas de pression supérieure à 2 grammes.

8 Vitesses de rotation

8.1 78 tours

La société Victor Talking Machines standardise la vitesse de rotation des disques à 78 tours/minute en 1901. Cependant tous les constructeurs de phono ne vont pas s'y tenir jusqu'au début des années 20. On peut ainsi trouver des enregistrements allant de 68/min à 84t/min environ.

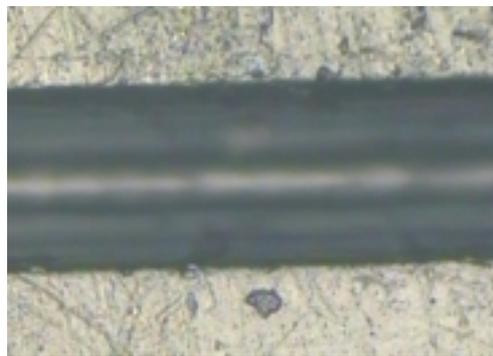


Fig. 14. Vue de dessus d'un sillon de disque 78t, agrandi environ 200x . Le sillon apparaît en noir, et l'intersillon plus clair. Le sillon des 78t étant de forme arrondie, le fond du sillon se trouve être presque plat. Ainsi il reflète la lumière à la photographie et se présente comme une fine bande blanche au centre de l' image.

Cette vitesse standard est plus précisément de 78,26086957 t/min, car elle résulte d'un moteur tournant à 60Hz entraînant une roue à 46 dents ($60 \cdot 60 / 46 = 78,2608$). La durée de ces enregistrements était de 3 minutes environ par face pour un disque de 30cm de diamètre.

8.2 33 tours

L'avènement des 33t est dû à la synchronisation avec les films cinématographiques 35mm dans les années 30. Ceux-ci duraient 11 minutes, et pour avoir le son en continu il était nécessaire d'avoir un disque de même durée. Pour ceci il fallait donc soit utiliser des disques d'un diamètre beaucoup plus grand, soit réduire la vitesse de rotation. L'utilisation d'un moteur 60Hz entraînant une roue à 108 dents définit la vitesse à 33 1/3 tours/minute.

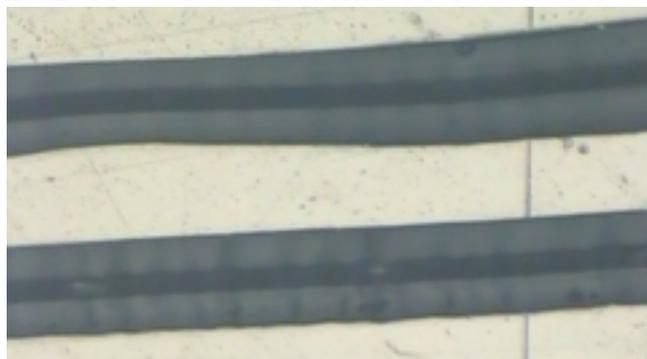


Fig. 15. Vue de dessus d'un disque 33t, agrandi environ 200x. Les sillons sont en noir, et l'intersillon plus clair.

L'arrivée du LP (Long Play) ou microsillon coïncide avec celle du 33 tours. L'utilisation du vinyle, plus lisse que le shellac, permet de réduire la taille et l'excursion des sillons. Avec la

technique du pas de sillonnage variable on peut également diminuer la distance entre 2 sillons consécutifs, en fonction de l'amplitude du sillon, ce qui permet d'optimiser le temps d'enregistrement par face sans que les sillons se chevauchent. Ainsi une face de 33t LP permet de stocker environ 23 minutes de musique.

8.3 45 tours

La raison d'être des 45t provient d'une décision purement commerciale : créer un disque microsillons de 7 pouces de diamètres et permettant d'enregistrer un seul morceau de musique par face pouvant durer jusqu'à 5 minutes 30. Sur la base de ces paramètres, il ne restait plus qu'à adapter la vitesse de rotation pour utiliser toute la place disponible sur le disque. Cependant certaines personnes prétendent que la vitesse de 45 tours/minute a été choisie pour une simple raison mathématique, puisque $45 = 78 - 33$.

Mis à part la vitesse de rotation, le temps d'enregistrement et le diamètre du disque, le 45t possède les mêmes caractéristiques que le 33t microsillons. C'est pourquoi il ne sera plus fait mention spécifiquement du 45t dans la suite de ce document.

9 Caractéristiques géométriques des sillons

Les sillons sont caractérisés par leur forme, leur largeur, leur profondeur, leur modulation, le pas de sillonnage, ainsi que les variations de ces différents paramètres. [AES1] et [AES2] décrivent des ordres de grandeur de ces différentes caractéristiques qui sont données dans les tableaux de la Fig. 16 à la Fig. 18.

	Inch	μm
78t	0.004 - 0.005	100 - 125
33t mono	0.002 - 0.003	50-75
33t stéréo	0.001 - 0.004	25-100

Fig. 16. Largeur du sillon en surface pour les différents types de disques.

	Inch	μm
78t	0.01 - 0.013	254 - 330
33t	0.0033 - 0.0055	85 - 141

Fig. 17. Pas de sillonnage : espace réservé à un sillon.

	Pitch
78t	75 - 100
33t mono	180 - 220
33t stéréo	180 - 300

Fig. 18. Pitch : nombre de ligne/inch, c'est l'inverse du pas de sillonnage.

10 Sources de dégradation du son

Il existe plusieurs sources de dégradation du signal dans le cas du disque phonographique. Voici une liste de défauts qui peuvent modifier le son de façon plus ou moins importante.

10.1 Matériaux

- Le grain de la matière du disque.

10.2 Usure

- Les aspérités, parties arrachées, rayures, dues à de mauvaises manipulations du disque. Le bruit généré par ces défauts peut durer plusieurs millisecondes.
- La déformation plastique du matériau (shellac ou vinyle) due au poids du stilet. Cette déformation a déjà lieu lors de la première lecture. A moins d'une utilisation inadéquate, un disque peut être lu ensuite un grand nombre de fois

avec un stylet semblable sans que cela crée de nouvelles déformations plastiques du sillon.

- L'usure due au frottement de la tête de lecture sur les parois du sillon.

10.3 Vieillesse

- Certaines matières organiques contenues dans l'agrégat des disques shellac subissent l'attaque de champignons. A la lecture, ceux-ci génèrent des bruits impulsifs de l'ordre de durée de la milliseconde.
- Certains disques en shellac s'effritent petit à petit lors de chaque lecture, suivant l'agrégat. Une conservation du disque dans un environnement à haut taux d'humidité accélère cet effritement.

10.4 Enregistrement

- Bruit ambiant du local d'enregistrement
- Bruit de fond dû au matériel d'enregistrement.
- Suivant la capacité des microphones, le son peut être saturé à certaines fréquences.
- Si la vitesse de rotation de la platine n'est pas constante, certaines distorsions du son peuvent apparaître sous la forme de modulation de fréquence.

10.5 Gravure

Certaines surcharges de gravure peuvent créer des distorsions du son. Ces défauts sont connus depuis longtemps, relativement bien maîtrisés, et n'apparaissent pas dans la plupart des enregistrements. Mais ils sont une cause de distorsion du son potentielle et de ce fait imposent certaines règles sur la fabrication des disques.

- Chevauchement : 2 sillons adjacents se recoupent physiquement. Pour éviter ceci on peut utiliser un pas de sillonnage variable en fonction de la modulation de l'enregistrement.
- Talonnement ou surcharge de pente : c'est la destruction du sillon par l'arrière du burin de gravure. Ce cas se présente lorsque la vitesse du burin devient trop importante par rapport à la vitesse de défilement. On peut éviter de tels problèmes en limitant la vitesse maximale de gravure. En stéréo, le talonnement peut se produire autant dans le sens vertical que dans le sens horizontal.
- Excentricité du disque : le signal est modulé par une fréquence parasite si le trou au milieu du disque n'est pas parfaitement centré. Cette fréquence est très basse et donc pas audible.
- Régularité de la spirale du sillon. La spirale ne devrait pas se faire par à-coups, mais être la plus régulière possible

10.6 Non-linéarité de lecture

Les non-linéarités de lecture apparaissent du fait que le burin de gravure et la tête de lecture n'ont pas exactement la même forme.

- La surcharge de courbure (tracing distortion) : lorsque la courbure du sillon est plus grande que la courbure de la pointe de lecture, cette dernière peut toucher les bords du sillon en plus de deux points, ce qui crée des distorsions non-linéaires et peut endommager le sillon. Afin d'éviter une telle surcharge, la vitesse de gravure est limitée à une valeur maximale telle que le rayon de courbure du sillon soit supérieur au rayon de la pointe de lecture.
- L'effet de pincement (pinch effect) : la tête de lecture n'ayant généralement pas la même forme géométrique que le burin de gravure, elle ne suivra pas forcément la

même trajectoire que le burin et ne reproduira donc pas exactement le son initial. Ce problème est illustré à la Fig. 19.

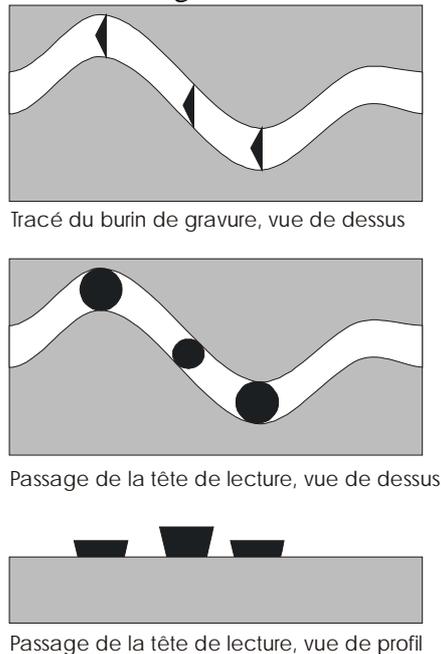


Fig. 19. Effet de pincement : Pour une même position dans le sillon, le burin de gravure et la tête de lecture ne touchent pas les bords du sillon aux mêmes endroits. Ceci produit un déplacement vertical de la tête de lecture alors que le sillon n'est modulé que latéralement.

10.7 Lecture

- Présence de poussières sur le disque.
- Puisque la technologie d'enregistrement n'a pas toujours été standardisée, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques de l'enregistrement avant d'écouter un disque, afin d'utiliser le matériel et les paramètres adéquats pour restituer le son original. Parmi ces caractéristiques on peut citer notamment la vitesse exacte de rotation, le nombre de canaux (mono/stéréo), l'utilisation d'un filtre RIAA ou d'un filtre similaire.
- Si la vitesse de rotation de la platine n'est pas constante, certaines distorsions du son peuvent apparaître.

11 Type de dégradation du son et restauration

Le son peut être altéré de différentes manières selon les sources de dégradations citées ci-dessus. Ces altérations et les différentes méthodes de restauration correspondantes sont largement décrites dans la littérature, par exemple dans [Godsill98] ou [Cappé93]. Il existe également plusieurs produits commerciaux disponibles sur le marché, parmi lesquels on peut citer [CEDAR] et [NoNoise], et qui permettent de filtrer le bruit et d'atténuer les altérations des anciens documents sonores.

Malgré le fait que les techniques de restauration audio sont étudiées depuis de nombreuses années, elles restent toujours la cible de nombreuses critiques. Principalement parce que l'appréciation des résultats se fait sur la base de critères relativement subjectifs, puisqu'il n'est souvent pas possible de comparer le son restauré au son initial lors de la prise de son.

Toute restauration d'un signal modifie celui-ci et peut ainsi créer une nouvelle distorsion du son. Ainsi un des grands problèmes de la restauration d'enregistrements anciens consiste à faire le meilleur compromis entre un son non-bruité légèrement distordu et la fidélité à

l'enregistrement original. Un autre problème réside dans la grande variété de sons enregistrés et dans les similitudes entre certains sons et certains bruits.

11.1 Bruit de fond

Le bruit de fond (hiss) ou bruit à large bande, est un signal perturbateur permanent non-corrélé avec le signal et réparti aléatoirement sur une large bande de fréquences, généralement sur tout le spectre des fréquences audibles. Puisque pour des raisons techniques la plupart des anciens disques n'utilisent pas toute la bande des fréquences audibles (20Hz- 20KHz), un des moyens les plus simples pour limiter le bruit de fond consiste à limiter le spectre de l'enregistrement au moyen d'un filtre passe-bas.

[Cappé93] présente plusieurs méthodes d'atténuation spectrale à court terme (Short Term Spectral Methods) pour l'élimination du bruit de fond. Ces méthodes se basent sur l'hypothèse que le bruit de fond est additif au signal et qu'il est stationnaire durant tout l'enregistrement. Ainsi on estime la densité spectrale de puissance du bruit sur une portion d'enregistrement où seul le bruit est présent (début ou fin d'un morceau). La technique consiste ensuite à effectuer une décomposition spectrale du signal bruité. Puis chaque canal du spectre est atténué selon que le niveau mesuré localement dépasse plus ou moins l'estimation du bruit de fond.

11.2 Bruits impulsionnels (impulsive noise ou clicks)

Les bruits impulsionnels sont des défauts localisés provenant de poussières, de champignons ou de détériorations ponctuelles du support. Ils sont caractérisés par une durée très courte, de l'ordre de la milliseconde, mais sont par contre très nombreux puisqu'on peut en compter plusieurs dizaines par secondes sur un 78t.

Du fait de leur courte durée, les bruits impulsionnels ne sont pas toujours audibles individuellement. Mais lors de la formation de la sensation sonore, l'ouïe intègre les énergies des événements séparés temporellement par moins de 200ms. Ce qui veut dire que même si des bruits impulsionnels ne sont pas audibles individuellement, ils peuvent devenir audibles du fait de leur grand nombre.

Les bruits impulsionnels se corrigent relativement facilement par interpolation ou par des méthodes d'autorégression. Il est également possible d'y appliquer des techniques de filtrage non-linéaires, telle que le filtrage médian.

[Godsill98] décrit également des méthodes d'estimation statistiques (Fully Bayesian Restoration, par exemple) qui consistent à modéliser le signal et les clicks, puis à appliquer des modèles de décision de Bayes au moyen d'un algorithme de maximum d'espérance afin d'interpoler le signal audio corrompu.

La puissance de calcul des ordinateurs actuels permet d'appliquer des méthodes de simulation par chaîne de Markov Monte Carlo (MCMC). Ces méthodes sont extrêmement coûteuses en temps de calcul, mais donnent des résultats difficilement atteignables avec des méthodes déterministes [Godsill98].

11.3 Craquements (crackles ou scratches)

Les craquements sont des défauts localisés provenant de détériorations physiques ponctuelles du support. Ils sont régulièrement traités comme des bruits impulsionnels, mais se distinguent de ceux-ci par leur longue durée et leur quantité relativement faible (dépendant de l'état du disque). Les craquements sont également souvent d'amplitude très importante par rapport au signal enregistré.

Les techniques de restauration appliquées aux craquements sont similaires à celles utilisées pour les bruits impulsionnels. Étant donné la durée de ces craquements, le son original est

impossible à récupérer. Mais en exploitant la quasi-périodicité du signal, on arrive à dissimuler cette perte d'information.

11.4 Pleurage

Les variations de vitesse de rotation de la platine, à la gravure ou à la lecture, provoquent des décalages dans le spectre des fréquences. A l'audition cela peut donner un effet de vibrato, plus communément appelé « wouawoua » ou pleurage (wow ou flutter).

Afin d'éliminer ce genre de dégradation, on applique le Frequency Tracing [Godsill98]. Cette méthode consiste à prendre des échantillons d'un spectre réduit de fréquences à intervalle régulier et à déterminer les variations des différentes fréquences tonales principales afin de corriger l'ensemble du spectre du signal.

11.5 Distorsion

Il existe encore plusieurs détériorations non-linéaires du son, telles les tracing distorsions. Mais ces techniques sont toujours des sujets de recherche actuels et n'ont pas encore donné lieu à des applications satisfaisantes.

12 Conclusion

Les techniques et matériaux utilisées pour graver des disques ont été assez diversifiés au cours du siècle passé. Et les standardisations des divers procédés ne sont apparues que tardivement par rapport à la durée de vie de la technologie des disques 78 tours notamment. Les dégradations de ces supports ont ainsi pris également des formes diverses, qui influent chacune à leur manière sur la qualité des disques et sur les photos qu'il est possible de prendre de ceux-ci.

Il apparaît ainsi difficile de définir un modèle standard idéal et unique de l'image digitalisée d'une photo d'un disque phonographique. Cependant, les éléments de technologies expliquées dans ce présent document mettent en avant un certain nombre de facteurs qui peuvent être paramétrés lors d'une analyse d'image. Certains de ces paramètres proviennent de connaissances à priori, tels la vitesse de rotation ou la couleur du disque. D'autres paramètres, tels l'état de dégradation ou la largeur des sillons seront principalement connus lors d'une première analyse de l'image digitalisée.

Cet effort de modélisation de l'image se poursuit dans le cadre du projet FNRS 21-64984.01. Il devrait permettre d'atteindre un double objectif. Tout d'abord déterminer le niveau de qualité sonore qu'il est possible d'atteindre avec l'approche VisualAudio. Puis mettre en œuvre un algorithme de reconnaissance de sillons capable de s'adapter au mieux à différentes familles de disques aux caractéristiques communes.

13 Références

- [AES1] Anthology of the Journal of Audio Engineering Society Disk Recording vol. 1
- [AES2] Anthology of the Journal of Audio Engineering Society Disk Recording vol. 2
- [Rossi] M. Rossi. Traité d'électricité volume XXI : électroacoustique, presses polytechniques romandes, EPFL.
- [Cappé93] O. Cappé. Technique de réduction du bruit pour la restauration d'enregistrements musicaux, thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris, 1993.
- [Godsill98] S. J. Godsill, P.J.W.Rayner. Digital Audio restoration, Springer-Verlag, 1998.
- [VA01] Cavagliari, Johnsen, Bapst. Optical Retrieval and Storage of Analog Sound Recordings, AES 20th International Conference, Budapest, 2001
- [Kasumi] <http://www.kasumirecords.com/cutting/discrec/>
- [ACUSD] <http://history.acusd.edu/gen/recording/speeds.html/>
- [Unesco] <http://www.unesco.org/webworld/ramp/html/r9704e/r9704e10.htm/>
- [Phono] <http://www.phono.org/Phono/ai.html/>
- [CEDAR] <http://www.cedar-audio.com/>
- [NoNoise] <http://www.sonic.com/pr/>
- [Wilmut] <http://www.rfwilmut.clara.net/repro78/repro.html>
- [Vadlyd] http://www.vadlyd.dk/English/RIAA_and_78_RPM_preamp.html