



Alain Carou, Thi Phuong Nguyen

Bibliothèque nationale de France

Contribution à l'étude du vieillissement des CD

Recherches sur les collections de la Bibliothèque nationale de France

Juin 2005

Depuis 1940, la Bibliothèque nationale de France (BnF) reçoit au titre du dépôt légal deux exemplaires de tout enregistrement phonographique mis à disposition du public français. Le premier CD audio a été reçu en 1983. En avril 2005, la BnF conserve 200 000 titres (unités documentaires) édités sur CD audio, soit 240 000 supports physiques CD. La conservation sans limitation de durée de l'intégralité de ce patrimoine est l'une des missions fondamentales associées au dépôt légal. Elle doit permettre le libre accès de tout public motivé (chercheurs, amateurs, professionnels) à tout document sonore ayant fait l'objet un jour d'une édition.

La politique adoptée pour les supports numériques reçus à la BnF tels que disquettes, cartouches, CD enregistrables de tous types (WORM, RW)... est la recopie à court terme sur des supports de masse, plus faciles à contrôler et à recopier en temps utile que les supports d'origine. Plusieurs éléments conduisent à chercher à privilégier pour le moment la conservation des CD audio (pressés) sur leur support d'origine:

- des ressources limitées pour les opérations de transfert conduisent à donner la priorité aux supports réputés les plus fragiles (bandes magnétiques notamment) ;
- le fonds CD audio représente un volume considérable de données, avec pour corollaire des coûts de fonctionnement de l'archive numérique significativement accrus ;
- le contrôle de la recopie intègre de l'information contenue sur un CD audio est une opération plus délicate que lors de la recopie de fichiers.

Il reste que nous manquons d'évaluations objectives du vieillissement des CD audio. Voilà plus de vingt ans que le premier CD audio a été reçu au dépôt légal : il atteint un âge proche des estimations les plus prudentes de l'« espérance de vie » du CD pressé, fondées sur des expériences de vieillissement accéléré en laboratoire. Peut-on se fier globalement à la conservation sur support d'origine ? Pour quelle durée ? Peut-on identifier des presseurs, des années, des compositions chimiques... plus vulnérables que la moyenne ?

Trois axes de tests ont été poursuivis à la BnF à partir de 2002 pour disposer d'éléments d'évaluation :

- la première porte sur un ensemble de CD des années 1983-1994 pour lesquels on dispose des résultats de tests menés il y a une dizaine d'années ;

- la seconde porte sur un échantillon important des premières années du dépôt légal ;
- la troisième porte sur des segments de collection ciblés en fonction de risques identifiés.

Le présent document vise à délivrer les résultats obtenus à ce jour.

Préliminaires : paramètres de mesure de qualité d'un CD

Le train binaire inscrit sur support CD est structuré différemment de l'information binaire « utile ». Deux des principales transformations sont la dispersion sur le support d'informations successives (« entrelacement ») et l'ajout de codes correcteurs d'erreurs, basés sur la redondance d'informations. Ces procédés (intrinsèques au format CD) assurent une protection élevée contre les pertes, notamment les pertes aléatoires.

La correction d'erreurs à la lecture du CD repose sur la mise en œuvre de deux mécanismes logiques successifs :

- ◆ C1 : correction de l'information binaire issue de la lecture avant désentrelacement, c'est-à-dire organisée « dans l'ordre où elle est inscrite sur le CD »
- ◆ C2 : correction de l'information binaire après désentrelacement, c'est-à-dire organisée « dans l'ordre de restitution de l'information utile ».

Un testeur de CD permet de mesurer les taux d'erreurs détectés par C1 et par C2.

- ◆ Le BLER (Block Error Rate) est la mesure du nombre de blocs par seconde comportant au moins un symbole de 8 bits erroné rencontrés par le correcteur C1. On fixe communément une limite de 220 impulsions/seconde (soit 3 % des trames dont la fréquence est de 7350 Hz). Ce paramètre est indicatif d'un état d'ensemble du disque, mais des pertes fatales peuvent intervenir bien avant le franchissement de la limite de 220 (et réciproquement).
- ◆ Le BERL (Burst Error Length) est la mesure de la plus longue salve de blocs erronés à chaque seconde par C1. La performance des systèmes de correction reposant sur la dispersion aléatoire de l'erreur, les erreurs en salve sont un indicateur de risque essentiel.
- ◆ E22 et E32 sont la mesure du nombre de blocs comportant respectivement 2 et 3 symboles de 8 bits erronés rencontrés par le correcteur C2. Un E32 non nul signifie une perte d'informations sans possibilité de correction.

E22 et BERL sont des paramètres particulièrement intéressants pour alerter sur un risque élevé de E32.

Une seconde catégorie de paramètres (fournie seulement par les testeurs haut de gamme) permet de caractériser la modulation du signal électrique résultant de la réflexion du spot lumineux sur le disque. Ces paramètres permettent de caractériser un CD sur le plan physique : on peut grâce à eux anticiper et interpréter des anomalies au niveau des taux d'erreurs.

- ◆ I3 et I11 expriment l'amplitude du signal pour la suite de « 0 » la plus courte et pour la suite de « 0 » la plus longue. Ces deux paramètres rendent compte de la qualité de la modulation du signal.
- ◆ SYM exprime le rapport entre longueur moyenne des pits et des lands.
- ◆ REF exprime le niveau de réflectivité du rayon de lecture par la couche métallique du CD.
- ◆ XT exprime le rapport entre amplitude du signal sur les pistes et entre les pistes (trop faible, il entraîne un risque de saut entre pistes).
- ◆ Le « jitter » mesure les irrégularités de passage entre « 0 » et « 1 ».

D'autres paramètres existent, mais n'auront pas à être examinés ici.

Les tests sont réalisés avec un CD-CATS SA3 : cet analyseur, fabriqué par la société AudioDev, est jugé l'un des appareils, sinon l'appareil, le plus fiable. Muni d'une platine CD de référence, il fournit des données incluant les taux d'erreur C1 et C2, les propriétés optiques, mécaniques, électriques. Outre des résultats chiffrés, il fournit une précieuse représentation visuelle de la répartition des valeurs sur la surface du disque. Cette fonction fournit une aide à la localisation des défauts ponctuels rencontrés sur le disque, et parfois à la détection de leur cause (poussière, rayure, défaut de métallisation...).

♦ **1983-1994-2004 : comparaison de résultats à une dizaine d'années d'intervalle**

Pour la première campagne, 121 disques ont été testés en 2003-2004 et les résultats ont été comparés à ceux obtenus lors de tests menés entre 1990 et 1994 au Laboratoire d'acoustique musicale (LAM) sur des exemplaires des mêmes disques neufs (il s'agissait exactement des mêmes disques ou d'équivalents).

Tous ces disques sont entrés neufs dans les collections de la BnF. Ils ont été conservés sous conditionnement opaque et, au moins depuis l'emménagement dans les nouveaux bâtiments en 1998, dans des conditions de température et d'humidité contrôlée. L'air en magasin est filtré : les polluants atmosphériques sont rares, quoique il ne soit pas possible d'assurer qu'ils sont totalement absents. Les disques reçus avant 1989 ont été étiquetés : cette pratique a cessé par la suite, par mesure de préservation (cependant, il n'a été détecté jusqu'à présent aucune interaction néfaste entre étiquette et disque). Enfin, ces disques ont pu être manipulés au fil des années lors de demandes de consultation en salle de recherche, avec le risque d'usures, chocs, rayures...

En répartissant les CD de l'échantillon par année et par presseur, on obtient le tableau suivant : (*) Chaque presseur différent a reçu une lettre par convention. (Il faut préciser que derrière chaque presseur se cachent des variations de date, de ligne de fabrication, de process, de contrôle qualité... qui sont source d'hétérogénéité. C'est donc un paramètre à prendre avec précaution, même s'il faut s'en satisfaire, faute d'information plus précise...)

Presseur*	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	Total
A			2	2	2	5		6	1	5	1		24
B			2	1	3	1	1	1		3	3	1	16
C						3		1					4
D		1				4		4	4				13
E								3				7	10
F					2	1	1		2	1			7
G							1	2		1	1		5
H							3	2					5
I						1	1	1			1		4
J		2				1		1					4

K				1		1		1			1		4
L								4					4
M							1	1					2
N							1					1	2
O	1					1							2
P					1			1					2
Q							1						1
R									1				1
S						1	4	1	1	2	1		10
Non déterminé													
	1	3	4	4	8	19	14	29	9	13	8	9	212

Les conditions d'expérimentation interdisent d'attribuer une signification à des variations minimales, du fait du changement de matériel : le testeur est de même marque, mais d'une autre génération, avec une platine de lecture référence aux performances sans doute différentes.

Il faut y ajouter une marge d'incertitude propre aux testeurs, qui se traduit par le fait que deux analyses du même disque à une heure d'intervalle ne donneront pas des résultats exactement identiques.

Une variation de quelques pourcents de tel ou tel paramètre ne doit donc pas être interprétée comme une donnée significative, que ce soit au niveau de chacun des disques ou au niveau de l'ensemble de l'échantillon par agrégation des résultats.

Nous avons ainsi fixé un seuil de variation significative pour chacun des paramètres étudiés, en nous fondant sur une étude comparative des résultats obtenus en mesurant les mêmes disques sur 3 testeurs CATS (deux appareils SA3 et un SA2), publiée en 1994[1].

BLER	5 %
E22	5 %
XT	5 %
Push Pull	5 %
BERL	5 %
E32 total	5 %
RN	10 %
SYM	2 %

En appliquant ces seuils, on obtient les résultats suivants :

- . • 106 disques sont "stables" (c'est-à-dire que la variation de tous les paramètres, à l'exception de celle du crosstalk, reste dans les limites définies ci-dessus : si une dégradation s'est produite, elle est trop minime pour être détectable dans les conditions de mesure qui sont les nôtres).
- . • Le BLER moyen a augmenté sur 4 disques.
- . • Le BLER moyen a diminué sur 7 disques (!).
- . • Aucun disque n'atteint des niveaux d'erreurs critiques, si ce n'est ponctuellement (BERL = 6 ou 7 et E32 ponctuel, dû à une poussière incrustée ou à une rayure).
- . • 4 disques présentent des variations non concluantes, vu l'incohérence entre résultats anciens et résultats actuels.

Augmentation significative du BLER moyen sur 4 disques :

Année	Variation BLER moyen	BERL max	E22 max	Presseur
1985	31 ==> 263	4	0	B
1988	55 ==> 68	5	21	K
1988	16 ==> 130	10	74	A
1990	6 ==> 18	5	0	D

Les 4 disques ont des presseurs différents. 3 d'entre eux sont les presseurs les plus représentés dans l'échantillon. Il est à remarquer que le premier disque du tableau fait partie d'un coffret de deux, et que l'autre, également testé à 10 ans de distance, n'a pas bougé.

Il sera utile d'engager une surveillance des 3 premiers disques à intervalles rapprochés de 2-3 ans pour mesurer la rapidité de l'évolution et d'étendre les tests à la production de ces presseurs (généralement saine si l'on considère l'ensemble de l'échantillon) pour la période concernée.

Diminution du BLER moyen sur 7 disques : Cette variation paraît extrêmement étonnante. On observe en fait que 5 de ces disques ont une SYM minimum nettement inférieure à la tolérance fixée par la norme (-18, la norme fixe -15). 2 autres cas sont plus compliqués à comprendre : l'un a un jitter très hors norme et une SYM élevée dépassant de peu la norme, ce qui est inhabituel (la SYM est en général basse). Il n'existe aucun autre disque d'une SYM min inférieure ou égale à -17 dont les taux d'erreur n'aient fortement baissé.

Il apparaît que l'analyseur utilisé pour les tests en 2003 est plus tolérant à une SYM hors norme que l'analyseur utilisé pour les tests initiaux. On voit par là que des tests à plusieurs années de distance uniquement fondés sur les taux d'erreur révèlent moins une évolution de la dégradation des supports qu'une évolution de la lisibilité du CD (autrement dit une évolution de la performance du couple CD-lecteur).

Année	Variation BLER moyen	Jitter	SYM
1987	108 ==> 41		min = -18
1989	71 ==> 41		min = -18
1989	238 ==> 16	tous Jit Land > 35	max = 7
1990	37 ==> 9		
1990	30 ==> 7		min = -18
1990	103 ==> 39		min = -18
1991	167 ==> 17		min = -18 min = -17

Problème du crosstalk :

XT présente une augmentation importante sur tous les disques, comprise entre 40 et 60 %. Cette évolution paraît trop générale pour être uniquement due à une évolution propre aux disques. On peut au contraire en attribuer au moins une part au facteur machine. 2 disques franchissent le seuil de 50 % de crosstalk. L'évolution de ce paramètre dans le futur sera à suivre de près.

On peut tirer des conclusions globalement rassurantes, quoique non définitives, de cette étude comparative. On constate toutefois que la dégradation des CD sur une période de dix ans est une réalité, qui, sans atteindre des niveaux alarmants, concerne 3 % de l'échantillon et qui ne paraît pas à ce stade se concentrer sur un presseur ou une année en particulier.

Pour mieux connaître l'état de conservation des CD des dix premières années, une campagne de tests sur des échantillons plus fournis a été lancée sur les années 1983 et 1989. Les résultats peuvent être fournis pour l'année 1983.

◆ **Un approfondissement sur les débuts du CD : l'année 1983**

550 titres ont été reçus en 1983 au dépôt légal.

Chaque combinaison différente d'une marque et d'un presseur a été échantillonnée à raison d'un CD au moins, et d'un CD supplémentaire par tranche de 20 titres. Un échantillon de 39 documents a été ainsi constitué. On ne dispose pas cette fois de résultats de tests antérieurs.

On a affiné ici la mesure du BLER à conserver : en effet, un BLER max élevé peut correspondre à un pic ponctuel aisément corrigeable par le décodeur C2, et un BLER moyen faible sur un CD de plus de 60 minutes peut cacher des disparités importantes. On prend donc la mesure d'un "BLER maximum continu", soit le niveau maximal auquel se maintient le niveau de BLER pendant 3 secondes au moins.

Sur 39 disques :

- . • 24 ont un BLER max continu inférieur à 10
- . • 9 ont un BLER max continu entre 10 et 30
- . • 3 ont un BLER max continu entre 30 et 100
- . • 2 ont un BLER max continu entre 100 et 220
- . • 1 a un BLER max continu supérieur à 220

Ce dernier cas a pu être diagnostiqué comme un raté dans le processus de fabrication : les deux exemplaires conservés par la BnF présentent des courbes d'erreur caractéristiques identiques. Il est probable que les erreurs aient été présentes initialement et ne soient donc pas le résultat d'un vieillissement prématuré.

- . • 2 ont un RN localement supérieur à la tolérance
- . • 3 ont des E22 en plusieurs points
- . • 1 a un BERL max supérieur à 5

Soit au total 6 disques à considérer non pas encore comme à copier, mais comme à placer en surveillance pour mesurer l'évolution dans les toutes prochaines années pour dessiner la tendance. Au moins 4 de ces 6 disques paraissent émaner du même presseur, bien que le nom de ce presseur ne figure pas sur les disques : même type d'impression sur le disque, même mode de numérotation sur l'anneau central. 3 d'entre eux ont été réalisés pour le même éditeur important (Polygram).

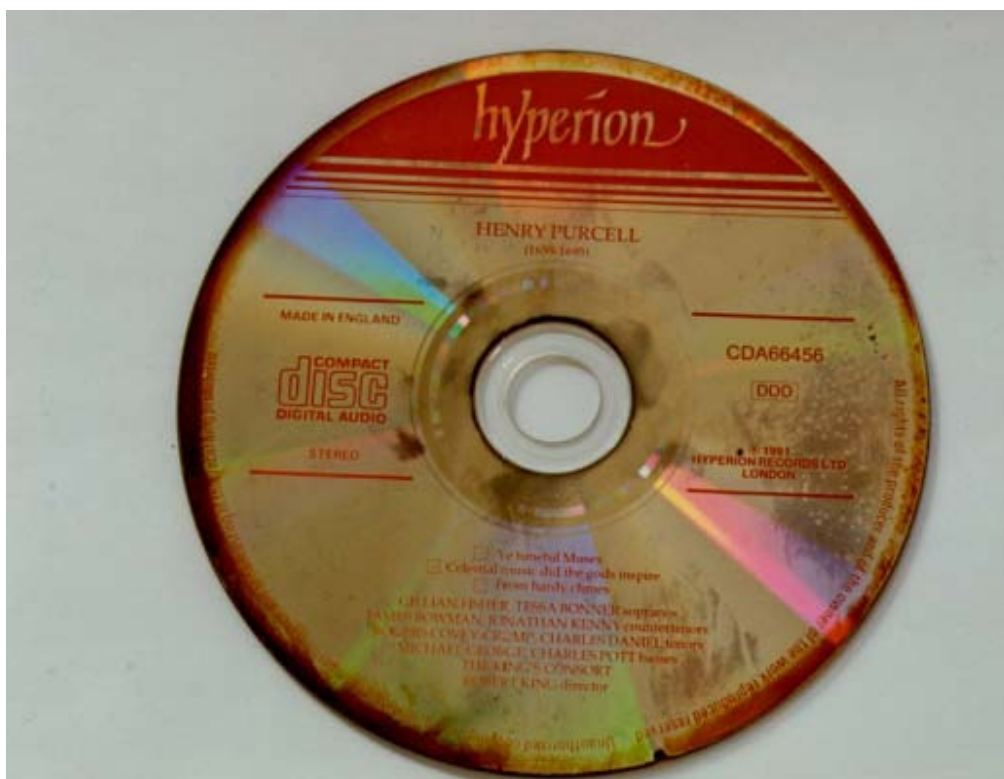
A noter qu'aucun disque ne présente de paramètres HF hors norme.

♦ Etudes ciblées sur des séries de disques « bronzés »

Des études ciblées ont été conduites lorsqu'une alerte a été lancée à propos de telle marque, de tel presseur, de tel ou tel titre. La presse et l'Internet ont été les relais de telles alertes, lancées tantôt par le producteur, tantôt par les acheteurs. Les problèmes rapportés ici auraient pu difficilement être détectés par une campagne de contrôle générale sur des échantillons de la collection, compte tenu du fait qu'ils

concernent des marques qui y sont représentées en nombre relativement faible et que ce n'est pas la totalité des titres de cette marque à un moment donné, mais seulement une partie d'entre elle, qui se sont avérées affectées.

L'alerte concernant les disques fabriqués par PDO UK pendant une période donnée (1988-1993) est bien connue. Elle a été lancée en 1997 par l'éditeur Hyperion. Certains disques présentaient en vieillissant des marbrures rouges, ce qui a amené à parler de "disques bronzés".



43 pour cent de la collection de disques Hyperion de la BNF présentait des taux d'erreurs très importants (> 220). Il n'y a pas concordance entre l'importance des marbrures et le niveau de gravité de la dégradation.

L'observation visuelle ne peut donc suffire à évaluer l'état d'une collection de ces disques.

Les conséquences patrimoniales ont été limitées dans ce cas, puisque le presseur assure l'échange des disques bronzés contre des pressages neufs.

Le remplacement des CD PDO a permis de progresser dans la connaissance du

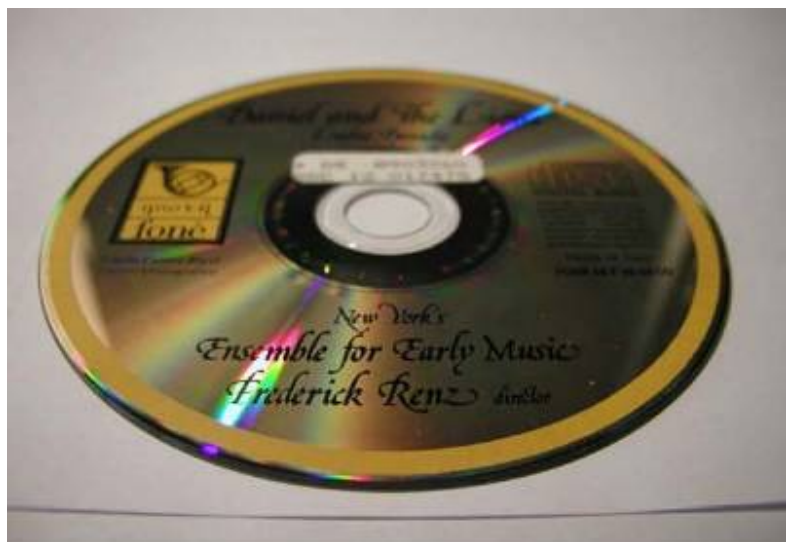
phénomène les affectant en permettant de passer à des analyses chimiques destructives. 3 CD, dont 2 "bronzés" et 1 "sain", ont été soumis à une analyse des composants organiques puis à une analyse élémentaire. Il s'est avéré que ces trois disques étaient composés d'une couche métallique argent, fortement réfléchissante, mais que le vernis employé était différent : nitrate de cellulose pour les disques dégradés, acrylique pour le seul disque sain. L'analyse élémentaire n'a permis de détecter la présence que de carbone, d'oxygène et d'argent ; il n'y a en particulier pas trace de soufre.

Une méthode plus légère d'identification de la nature du métal et du vernis a été par la suite mise au point pour étendre les tests à davantage de CD. Pour le métal, elle consiste à exploiter la valeur de réflectivité du disque délivrée par le testeur : celle-ci prend toujours une valeur comprise entre 73 et 78 % ou entre 83 et 87 %. Cela correspond respectivement à une couche métallique aluminium et à une couche argent (l'usage de l'argent, métal coûteux, par certains presseurs s'explique précisément par la recherche d'une meilleure qualité des valeurs HF grâce à une bonne réflectivité).

Pour l'identification du vernis, on soumet un petit fragment de vernis (prélevé à l'aide d'un coton-tige par frottement sur l'anneau central) à un test diphénylamine à 2 % dans de l'acide sulfurique concentré. Une réaction de couleur bleue se produit en présence de vernis nitrocellulosique.

Un test effectué sur la totalité de la collection a confirmé l'incrimination de la combinaison argent-verniss nitrocellulosique.

Une autre alerte a été lancée, cette fois par des discophiles, à propos des disques issus d'une usine de pressage italienne (Optimes) à la fin des années 80 et au début des années 90. Les tests systématiques réalisés sur les disques de ce presseur conservés à la BNF en ont confirmé le bien-fondé.^[2] Des signes de dégradation sont observables : stries rouges radiales à la périphérie, couche métallique plus claire sous les zones non encrées que sous les zones encrées.



Sur 24 CD issus de ce presseur jusqu'ici retrouvés dans nos collections :

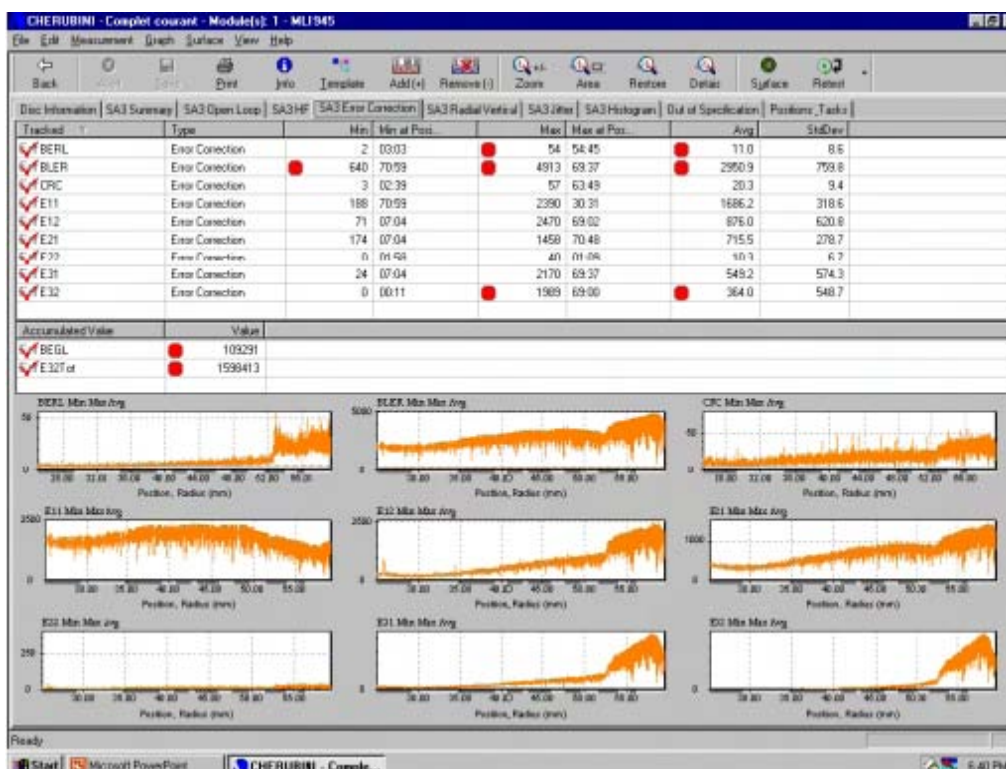
- 17 ont un BLER supérieur voire très supérieur à 220 sur plusieurs minutes

Sur 24 CD issus de ce presseur jusqu'ici retrouvés dans nos collections :

- 15 ont un BERL > 5 sur plusieurs secondes consécutives,
- 17 ont un E32 non nul : l'un d'eux a un BLER < 220 ; à l'inverse, 1 disque de BLER moyen = 272 est encore exempt de E32.

Soit au total 18 disques présentant des niveaux d'erreur alarmants.

Les dégradations notées ici sont nettement plus avancées que celles constatées sur les disques PDO UK "bronzés". Les niveaux d'E32 total atteints sont spectaculaires sur les dernières plages de 5 disques. Le disque le plus dégradé atteint un niveau de 1989 blocs non corrigibles / sec. (soit plus de 25 % de l'information musicale illisible à cet endroit) et dépasse 1000 pendant les 6 dernières minutes. Dans 13 autres cas, le niveau de E32 est faible et non perceptible à la lecture du fait de l'efficacité des mécanismes de "masquage" des pertes d'informations.



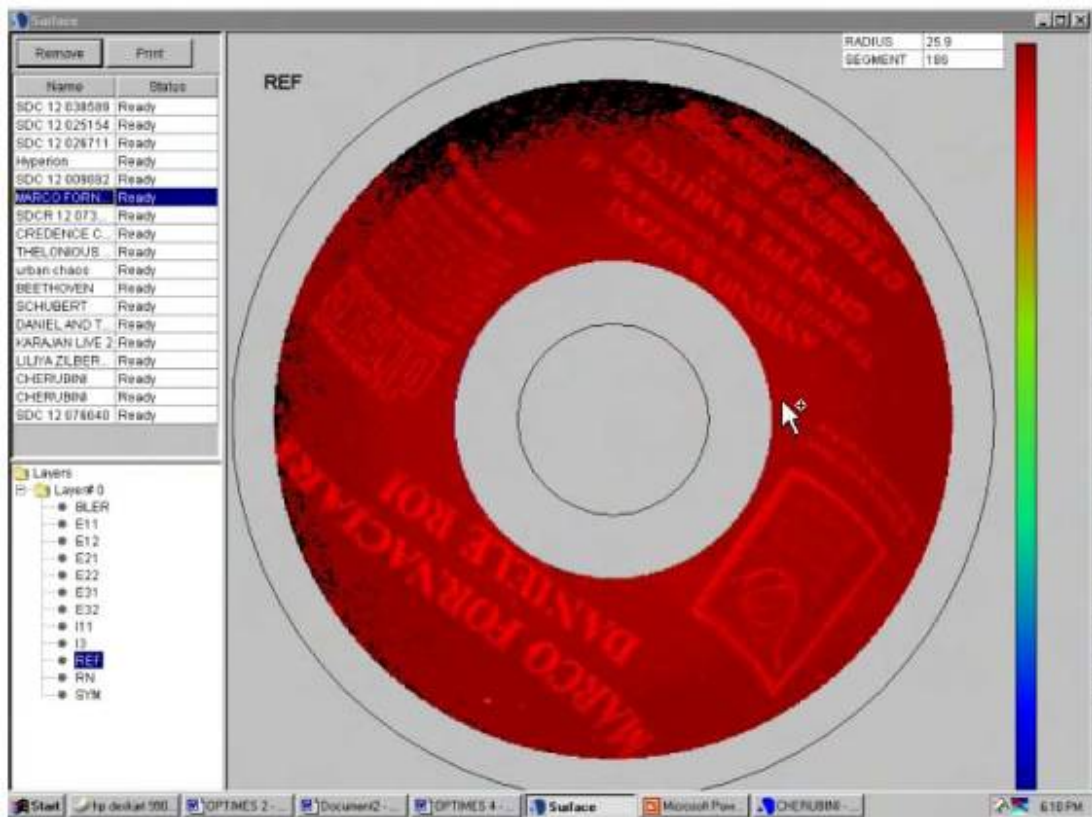
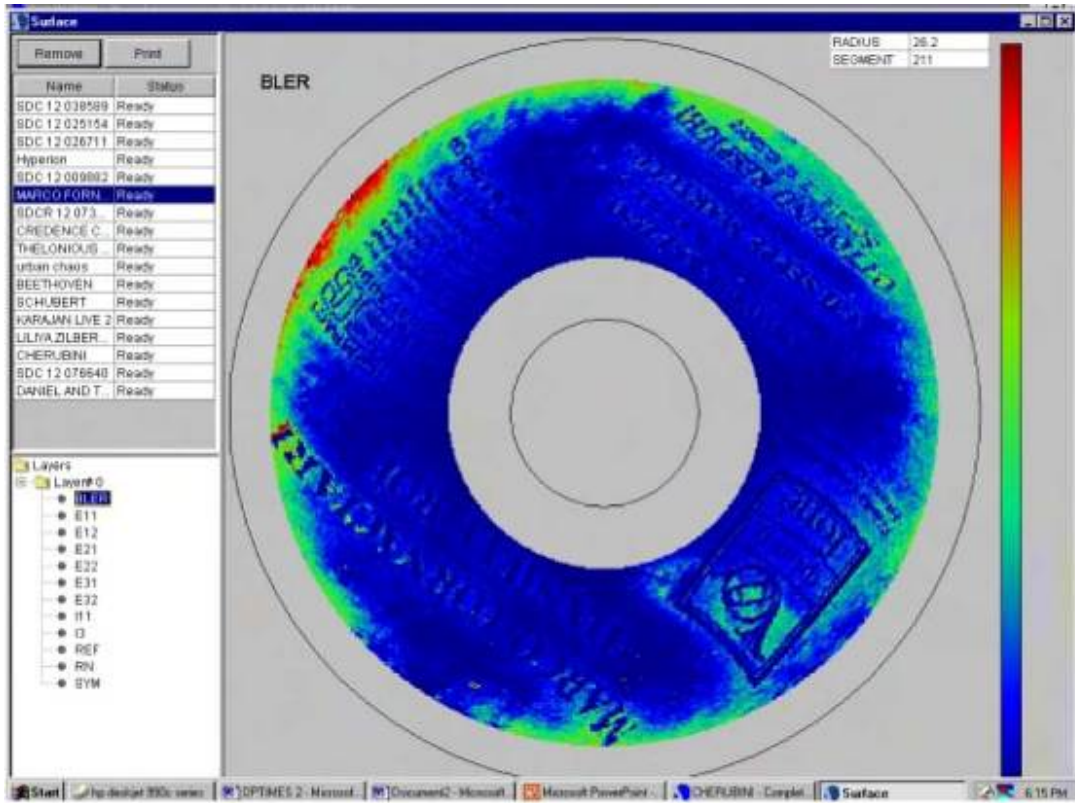
Le mode optimal de récupération du contenu que nous avons trouvé a été de l'importer sur station de travail audio en opérant depuis un lecteur de CD-ROM une extraction à vitesse lente (4x) et en faisant jusqu'à 4 tentatives de lecture successives en cas d'échec. Cette solution a été comparé notamment à une récupération du flux en AES à partir d'une platine de lecture de CD audio de référence.

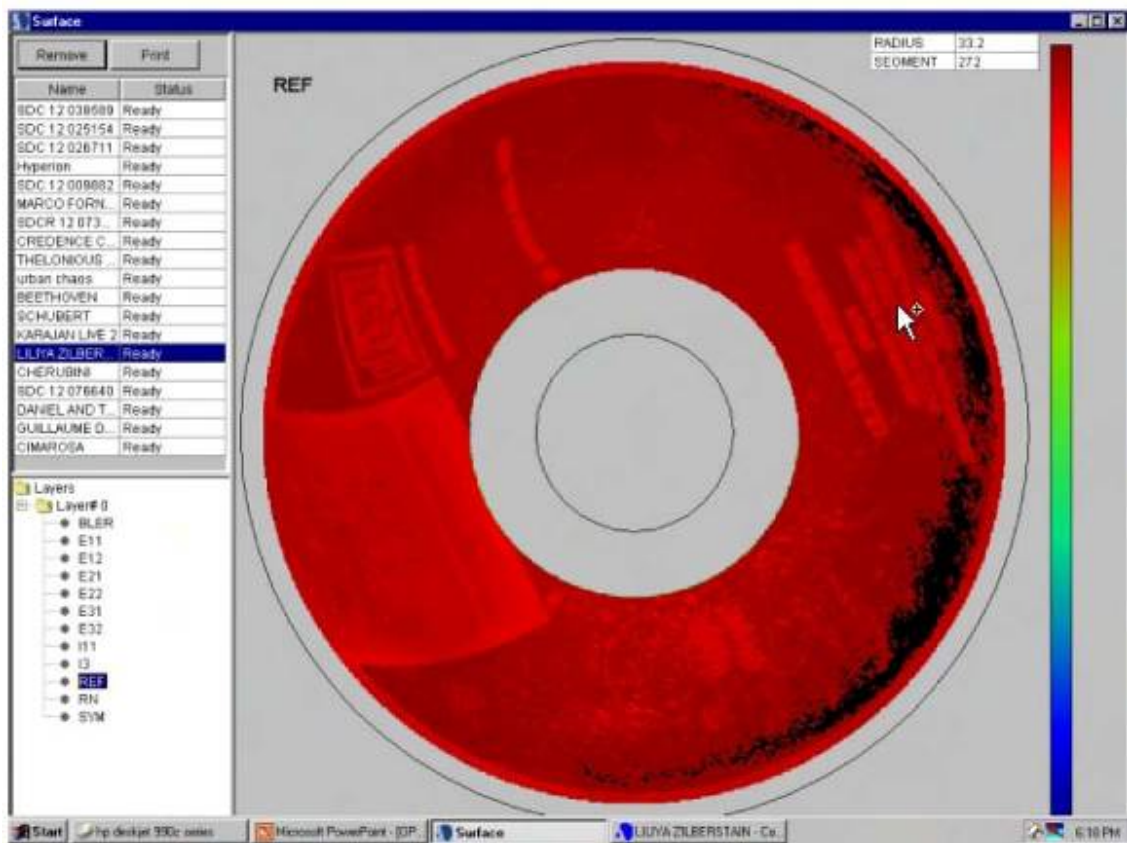
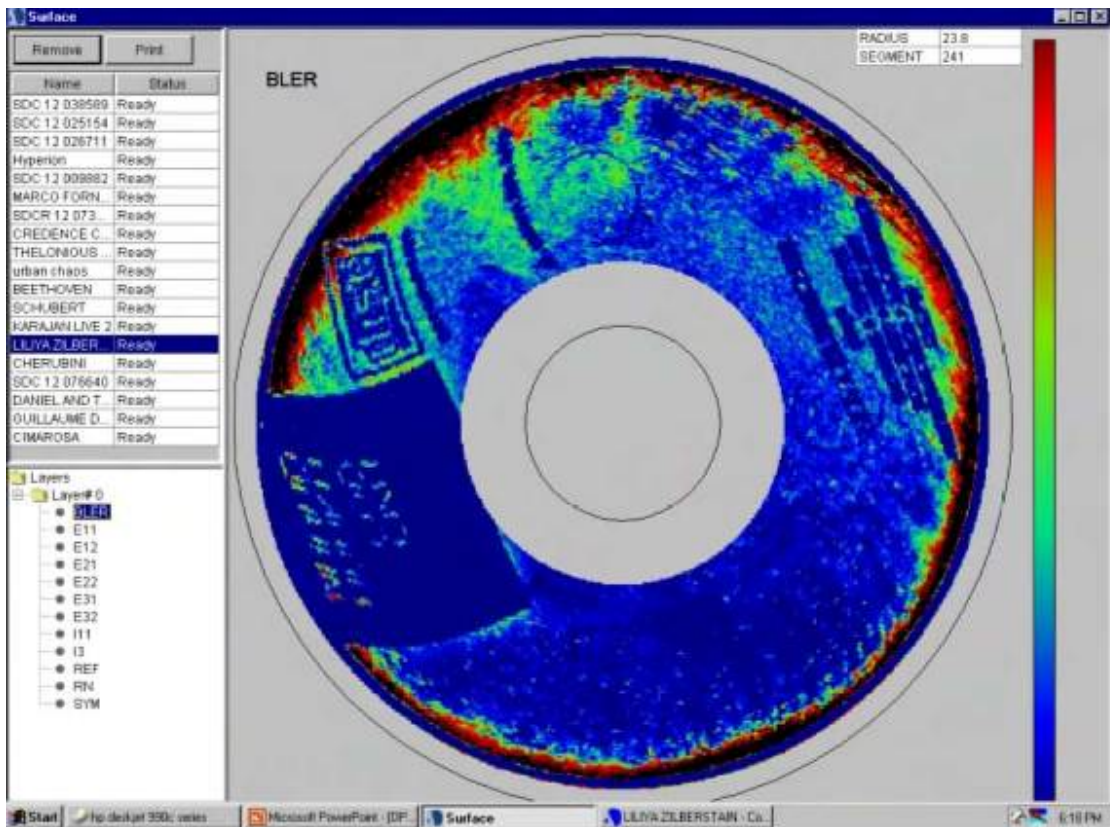
5 disques sur les 24 présentent des taux d'erreur bas (BLER inférieur à 20). Parmi eux figurent les 4 disques dont la réflectivité est de 75 %, c'est-à-dire avec une couche réfléchissante en aluminium. Les 18 disques présentant des taux d'erreur élevés sont tous d'une réflectivité de 86 à 90 %, c'est-à-dire à couche réfléchissante argent. Tous sont revêtus d'un vernis cellulosique. Les résultats concordent avec l'étude précédente sur PDO : l'emploi d'une couche argent est susceptible

d'entraîner une dégradation rapide.

La cartographie des erreurs sur la surface des CD montre comment se déroule le processus et tend à confirmer le rôle du vernis.

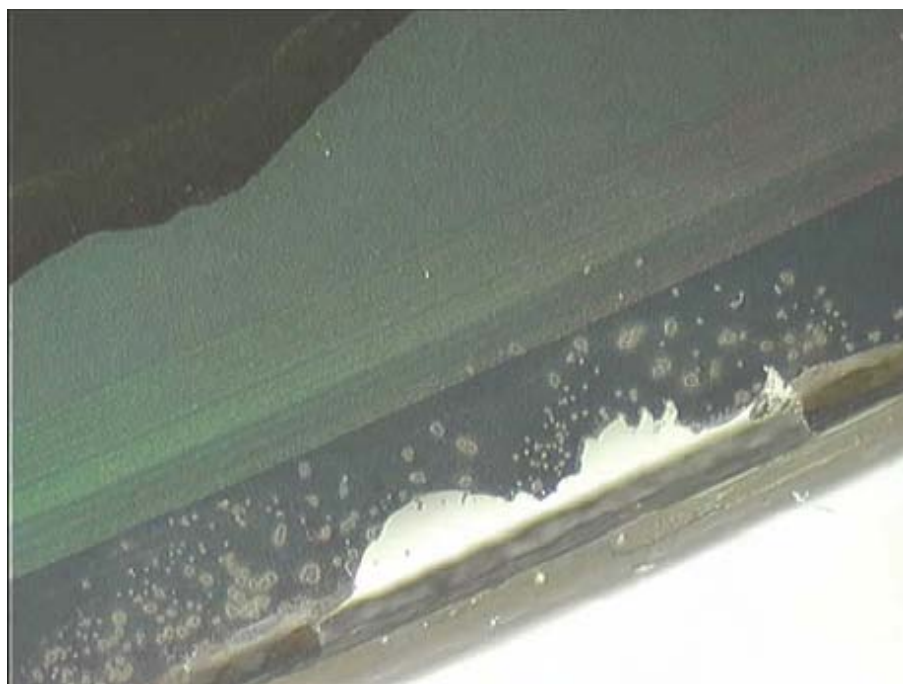
Distribution BLER et REF sur la surface du disque : exemple 1 Distribution BLER
et REF sur la surface du disque : exemple 2





L'agression est la plus marquée à la périphérie du disque. Sur le reste de la surface, cependant, l'impression commerciale en surface joue manifestement un rôle de protection contre l'agression : les taux d'erreur sont plus bas dans les zones qu'elle recouvre. L'agression provient donc aussi de la face supérieure vernie, en l'absence de cette couverture supplémentaire. L'explication par l'absence de vernis sur les tranches de disques, parfois invoquée, ne tient donc pas. C'est le vernis lui-même qui n'a pas rempli sa fonction sur la durée.

En résumé, on a donc une oxydation par le pourtour et par le dessus, à travers la couche de vernis. Ce processus rappelle de près celui que connaissent les spécialistes de la conservation de la photographie argentique. Une hypothèse serait que la dégradation du vernis cellulosique entraîne l'exposition de la couche argent à l'oxydation par des éléments ambiants[3]. L'argent oxydé peut connaître deux évolutions lors de processus d'oxydation : dans une forme intermédiaire allotropique, il paraît brun (argent colloïdal), ce qui rappelle la couleur du "bronzage" observé sur les CD ; totalement ionisé, il devient incolore. Ce second état est observable sur au moins un disque.





◆ Disques « embués »

Autre mal, cette fois repéré au départ par la BnF sur des disques des années 1993-95 : une dégradation de la couche de substrat qui lui donne une apparence « embuée ». Les deux exemplaires conservés sont touchés identiquement. La conséquence est une perte complète de l'accès au programme enregistré à partir d'un certain point. Exemples :

- . • *Best of Starshooter* (1993)
- . • Etienne Daho, *ED* (1995)

Une analyse chromatographique en phase gazeuse a révélé qu'il s'agit de bisphénol A, résultat d'une mauvaise stabilisation du substrat polycarbonate. Un nettoyage à l'eau distillée a permis l'élimination du dépôt en surface. Le processus se poursuit toutefois : en témoigne la réapparition du dépôt de surface, constatée six mois après le nettoyage.



◆ Conclusion

Le vieillissement prématuré des CD est devenu un sujet à la mode, et on a ainsi pu lire il y a quelques mois sur des sites d'information en ligne des affirmations émanant de particuliers qui donnent des estimations allant jusqu'à 15 à 20 % des premiers CD atteints par le phénomène dit "CD-Rot". Or, les tests réalisés sur nos exemplaires des quelques titres cités comme potentiellement défectueux ont été tout à fait rassurants.

Les recherches conduites sur les collections de la BnF tendent à montrer jusqu'à présent une bonne conservation générale de ce support. Le seul phénomène de dégradation rapide qui ait pu être identifié porte sur la combinaison couche argent-verniss cellullosique. La combinaison aluminium-verniss cellullosique paraît

également porteuse de risque possible, puisque la dégradation du vernis entraîne l'exposition du métal. On constate dans quelques cas une sensible élévation du BLER à la périphérie du disque, sans commune mesure toutefois avec ce qui a pu se produire avec l'argent.

La méthode d'identification rapide des vernis par frottement et test chimique doit à présent être mise en oeuvre le plus largement possible pour repérer les disques à vernis nitrocellulose. Un nouvel échantillonnage et des tests pour déterminer le métal employé et les niveaux d'erreur permettront d'avoir une vision plus précise des segments de collection à risque.

[1] *JPL Information Newsletter*, février 1994, cité par Jean-Marc Fontaine, *Etude des paramètres définissant la qualité des disques CD audio*, étude réalisée pour la BNF, 1995.

[2] Dans les limites autorisées, car la nature patrimoniale des documents analysés (contenu et contenant) interdit de pousser l'analyse jusqu'à des opérations destructives, même après recopie, sauf remplacement de l'exemplaire défectueux par un exemplaire sain.

[3] Pour la description du processus affectant la photographie argentique, cf. Giovanna Di Pietro, *Silver Mirroring on Silver Gelatin Glass Negatives*, PhD, Basel, 2002.