LABORATOIRES DE TRAPPES
29 avenue Roger Hennequin – 78197 Trappes Cedex
Tél. : 01 30 69 10 00 - Fax : 01 30 69 12 34

TYPOLOGIE DU VIEILLISSEMENT DES CD-R

- EN CONDITIONS NORMALES DE CONSERVATION
- ACCELERE A FORTE TEMPERATURE ET HYGROMETRIE
- ACCELERE PAR EXPOSITION EN LUMIERE INTENSE

Recherche sur la conservation des Archives numériques

dans le cadre du GIS DON

Auteur : Jean-Michel LAMBERT

Juin 2010

Financement :

Laboratoire National de Métrologie et d'Essais Fiche R&D N°202 / 2009

Résumé

Cette étude réalise une synthèse d'analyses effectuées sur des CD-R qui se sont dégradés à la suite d'un vieillissement naturel ou d'un vieillissement accéléré par la température et l'hygrométrie ou par exposition à la lumière.

On décrit les moyens d'analyse utilisés, en particulier certains moyens spécifiques développés au LNE qui permettent d'atteindre des caractéristiques du signal HF non directement disponibles sur les analyseurs.

On fait une description détaillée des différents types de dégradations, à la fois au niveau microscopique et au niveau de leur répartition à la surface des disques.

Des résultats statistiques sont donnés pour chaque mode de vieillissement (naturel, température-hygrométrie, lumière). On distingue des dégradations des paramètres de contraste et d'amplitude du signal HF qui sont lentes en vieillissement naturel et ne provoquent pas ou peu d'erreurs de décodage sur une dizaine d'années et des dégradations beaucoup plus rapides et destructrices de l'information enregistrée. Dans cette seconde classe on trouve l'apparition de micro-taches et/ou de fluctuations de réflectivité à une échelle micrométrique.

L'évolution des paramètres de contraste et d'amplitude du signal HF présente des différences systématiques entre les trois modes de vieillissement qui font supposer que les phénomènes physiques qui en sont à l'origine sont différents.

Abstract

This study synthesizes tests performed on CD-R which have been degraded after natural or accelerated ageing (high temperature and humidity or light exposure).

The analysis tools are described, particularly tools which have been developed in LNE. These specific tools provide HF signal characteristics that are not directly available on the analyzers.

We give a detailed description of the various kinds of defects. The description concerns both the microscopic scale and the repartition over the discs.

Statistical results are given for each mode of ageing (natural, temperature-humidity, light). We distinguish the degradation of the HF signal contrast and amplitude, which is slow in normal ageing and causes little or no decoding errors after ten years, and more rapid damaging degradation. In this second class we find micrometer-sized spots and reflectivity fluctuations.

The evolution of contrast and amplitude parameters of the HF signal shows systematic differences between the three ageing mode. This indicates that the physical phenomena at the origin of defects are probably different for the three modes.

SOMMAIRE

Page

1. CONTEXTE ET OBJET....4

2 MOYENS D'ANALYSE....5

2.1 ANALYSE DES ERREURS NUMERIQUES....5
2.2 ANALYSE DU SIGNAL OPTIQUE....9
2.3 ANALYSE DETAILLEE DU SIGNAL OPTIQUE PAR UN LOGICIEL SPECIFIQUE....15

3 DIFFERENTS TYPES DE DEGRADATION OBSERVES....18

3.1 DECOLLEMENT DU VERNIS ET DE LA COUCHE METALLIQUE (D)....18
3.2 DEFAUTS LOCALISES (L)....19
3.3 DIMINUTION DE LA REFLECTIVITE ET DU CONTRASTE ENTRE PITS ET LANDS (RC)....20
3.4 TACHES DE TAILLE MICROMETRIQUE (MT)....22
3.5 FLUCTUATIONS DE REFLECTIVITE (F)....24

4 REPARTITION DES DEGRADATIONS SUR LA SURFACE DES DISQUES....25

4.1 DEGRADATION A PARTIR DES BORDS....25
4.2 DEGRADATION A PARTIR DU BORD EXTERNE LIMITEEE A DES SECTEURS....25
4.3 DEGRADATION SUR UN ANNEAU....26
4.4 MODULATION DE LA DEGRADATION PAR LA SERIGRAPHIE....26

5 ETUDE DU VIEILLISSEMENT SUR DIFFERENTES COLLECTIONS....27

5.1 VIEILLISSEMENT NATUREL....27
5.2 VIEILLISSEMENT ACCELERE EN ETUVE....33
5.3 VIEILLISSEMENT EN LUMIERE ARTIFICIELLE INTENSE....38
5.4 COMPARAISON DES DIFFERENTS MODES DE VIEILLISSEMENT....43

6 CONCLUSION....43

ANNEXE 1 - RELATIONS ENTRE PARAMETRES D'ERREURS NUMERIQUES DU 1ER ET DU 2EME NIVEAU....45

ANNEXE 2 - RELATION ENTRE ERREURS NUMERIQUES ET DC JITTER....48

ANNEXE 3 – EVALUATION DU TAUX DE BLER A PARTIR DE LA DISTRIBUTION DES ECARTS DES TRANSITIONS PAR RAPPORT AUX TOPS D'HORLOGE....49

1. CONTEXTE ET OBJET

Le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) réalise des mesures sur la qualité des disques optiques enregistrables depuis environ dix ans. De nombreuses données ont ainsi été accumulées, en particulier sur les CD-R. Certaines de ces données ont permis au LNE d'être le premier à révéler des cas de vieillissement naturel rapide de modèles de CD-R. Ces résultats figurent dans le rapport LNE 021 / 2000 daté de septembre 2004 et sont accessibles, sous forme résumée, sur le site Internet du LNE (http://www.lne.fr/publications/recherche/Etude-conservation-donnees-CD-R.pdf).

Bien qu'une majorité de CD-R ne présentent, après plus de 10 années de stockage, aucune dégradation significative, l'existence de modèles à vieillissement rapide nous a amené à étudier la typologie des dégradations observées sur ces modèles ainsi que sur des disques ayant subi un vieillissement accéléré en étuve ou à la lumière.

L'objet du présent rapport est de décrire les méthodes d'investigation actuellement à notre disposition et de faire une synthèse sur les résultats expérimentaux obtenus au LNE sur les CD-R depuis une dizaine d'années. Le cas des disques réinscriptibles (CD-RW) n'est pas abordé. Le principe de gravure de ces disques est en effet différent de celui des CD-R, la transformation de la couche sensible n'étant pas de même nature. Les données acquises au LNE sur les DVD enregistrables présentent suffisamment de différences avec celles obtenues sur les CD-R pour que l'on préfère en faire une synthèse indépendante dans un rapport à venir.

Les résultats expérimentaux utilisés pour cette synthèse concernent environ 250 disques enregistrés entre 1994 et 2008, de 115 modèles différents. Ils sont issues d'analyses effectuées :

- soit à des périodes distantes de plusieurs années (vieillissement naturel),
- soit sur des disques ayant subi un vieillissement accéléré en étuve (température 60℃ ou 80℃ - hygrométrie relative 85 %),
- soit sur des disques ayant subi un éclairement intense (vieillissement à la lumière).

Les données expérimentales ont été obtenues à l'aide d'analyseurs dédiés. Elles comportent d'une part des données exprimés sous la forme de taux d'erreurs numériques et d'autre part des données relatives à la qualité du signal optique qui sert au décodage de l'information numérique. Dans la première partie de ce rapport, on s'attachera à montrer la difficulté à relier ces deux types de données. Les erreurs numériques sont directement liées à la qualité d'usage des disques optiques, c'est à dire à la possibilité de relecture sans perte des données enregistrées. La caractérisation du signal optique est, quant à elle, susceptible d'être plus facilement reliée à la dégradation physique des disques.

La difficulté, dans bien des cas, à relier les taux d'erreurs numériques et les caractéristiques du signal optique délivrées par les analyseurs nous a conduit à prolonger l'analyse du signal optique au-delà des informations fournies par les analyseurs. On a développé pour cela un logiciel spécifique capable de reconstituer les principales opérations effectuées par un lecteur sur le signal optique, afin de mieux caractériser les défauts générant les erreurs numériques. Ces traitement spécifiques ne sont effectués que sur de petits échantillons du signal et non sur la totalité des disques comme le font les analyseurs.

Grâce à cet ensemble de moyens d'analyse, il est possible de reconnaître des similitudes dans les dégradations de différents modèles de CD-R et ainsi d'établir un début de classification des types de dégradation. Cette classification est relative aux défauts observés sur le signal optique délivré par la tête de lecture des analyseurs. L'identification des phénomènes physiques à l'origine de chaque type de dégradation nécessitera l'utilisation d'autres moyens d'analyse permettant entre autre d'appréhender les réactions chimiques qui sont en jeu. La classification décrite dans le présent rapport n'est donc qu'un point de départ pour une compréhension véritable des processus de vieillissement des CD-R.

2 MOYENS D'ANALYSE

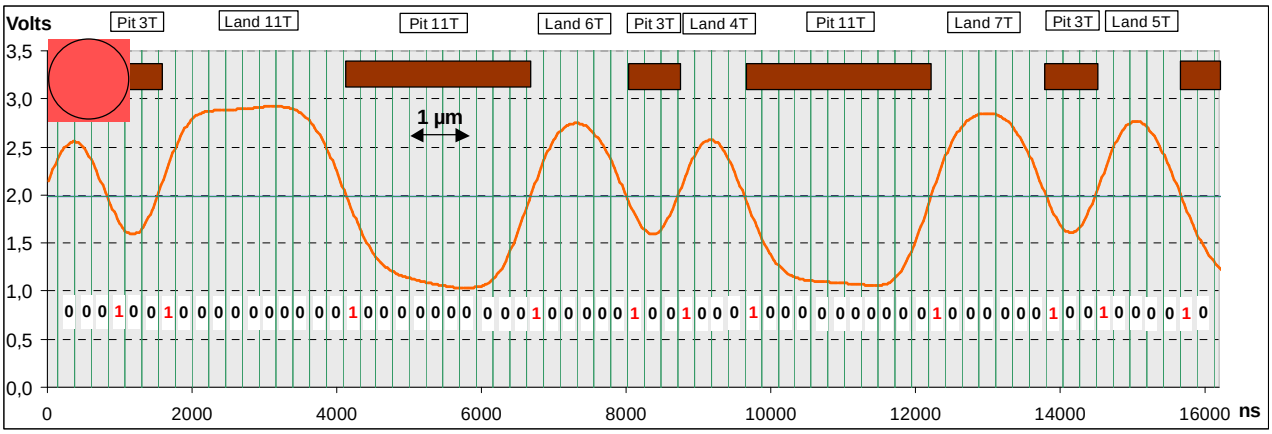
2.1 ANALYSE DES ERREURS NUMERIQUES

Le codage de l'information numérique sur le sillon

Lors de la gravure d'un CD-R, des petits traits sont marqués sur le sillon par « brûlage » de la couche sensible avec le laser. La longueur des traits ainsi que les intervalles entre les traits ont des valeurs qui sont multiples d'une longueur élémentaire L de l'ordre de 0,3 µm. En lecture, on associe à cette longueur élémentaire une horloge dont les tops sont séparés par un intervalle de temps T, qui est égal à 0,231 µs si la lecture est effectuée à la vitesse dite 1x.

La figure ci-dessous donne une représentation schématique des traits gravés sur le sillon et du signal optique associé. Les zones gravées (pits) correspondent à un niveau lumineux faible reçu par la photodiode, alors que les intervalles non gravés correspondent à un niveau lumineux élevé. Les durées possibles pour les pits et les lands vont de 3T à 11T. Une succession d'un land 11T avec un pit 11T signale un début de trame. Chaque trame comporte 588 tops d'horloge avec environ 60 pits et 60 lands de différentes longueurs.

Schéma de principe du codage de l'information numérique sur CD



Le décodage du signal optique est effectué en considérant les transitions du signal optique par rapport à un seuil appelé seuil de décision. Sur l'exemple ci-dessus, la valeur du seuil est de 2 Volts. A chaque top d'horloge on associe 0 s'il n'y a pas de franchissement du seuil et 1 s'il y a franchissement du seuil. Il en résulte un code numérique (EFM) qui ne contient que des 1 isolés et des successions de 0 comprenant au moins deux 0 et au plus dix 0.

Un octet de l'information numérique initiale est encodé sur 14 bits du code EFM (« Eight to Fourteen modulation ») avec 3 bits supplémentaires dits de liaison entre deux octets successifs.

L'apparition d'une erreur numérique au décodage est liée à la position des transitions vis à vis des tops d'horloge. Un écart d'une transition compris dans l'intervalle [-0,5T ; +0,5T] ne produit pas d'erreur au décodage, alors qu'un écart sortant de cet intervalle produit une erreur en décalant la position d'un 1.

Les codes correcteurs d'erreur

Il est impossible que la lecture d'un CD-R soit totalement exempte d'erreur, en raison des défauts physiques inhérents à la gravure. C'est pourquoi les octets de l'information à enregistrer sont associés à des octets supplémentaires appelés codes correcteur d'erreurs. Ainsi pour 24 octets de données enregistrées, on a en plus 8 octets utilisés pour la correction des erreurs.

Le système de correction d'erreurs présente deux niveaux de correction. La correction de premier niveau (C1) agit sur un bloc de 32 octets consécutifs (une trame). La correction de second niveau (C2) agit également sur un bloc de 32 octets mais provenant de trames différentes.

L'intérêt du deuxième niveau de correction est de permettre la correction d'erreurs physiquement groupées, liées à un défaut ponctuel sur le disque (rayure par exemple). La longueur sur le sillon associée au niveau de correction C1 est d'environ 170 µm (longueur d'une trame), alors que la longueur associée au niveau de correction C2 est 108 fois plus importante soit environ 18 mm, en raison de l'éparpillement des octets entrant dans le correcteur C2.

Les deux codes correcteurs d'erreur sont similaires. Ils peuvent corriger au plus 2 octets erronés par bloc. Si, au niveau du correcteur C2, un bloc comporte 3 octets erronés ou plus, la correction est impossible et on a une perte de donnée sur l'information utile enregistrée.

Les paramètres d'erreur

Grâce au système de correction d'erreurs, il est possible de connaître le nombre d'erreurs en lecture, tout au moins si celui-ci n'excède pas les capacités du système.

On définit les paramètres d'erreurs suivants :

Erreurs au premier niveau de correction :

E11 : Nombre de blocs comportant 1 octet erroné par seconde de signal
E21 : Nombre de blocs comportant 2 octets erronés par seconde de signal
E31 : Nombre de blocs comportant 3 octets erronés ou plus par seconde de signal
BLER : Nombre de blocs comportant au moins 1 octet erroné par seconde de signal
(BLER = E11+E21+E31)

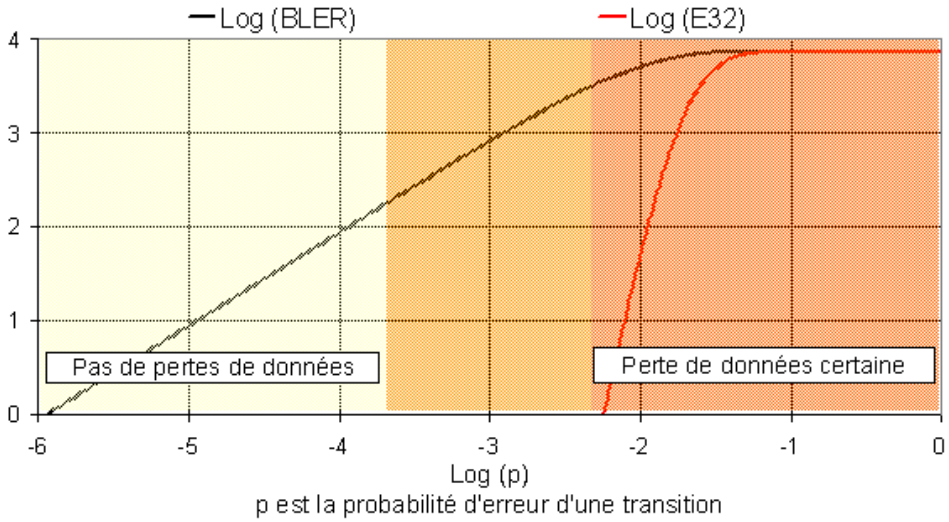
Erreurs au second niveau de correction :

E12 : Nombre de blocs comportant 1 octet erroné par seconde de signal
E22 : Nombre de blocs comportant 2 octets erronés par seconde de signal
E32 : Nombre de blocs comportant 3 octets erronés ou plus par seconde de signal

Ces paramètres d'erreurs sont associés à 1 seconde de signal en lecture à la vitesse 1x, c'est à dire à 7350 blocs. La valeur maximale pour chacun d'eux est donc de 7350. Ainsi, on obtient un taux de blocs erronés en divisant chaque paramètre par 7350. Ce taux n'est toutefois pas égal au taux des transitions produisant une erreur car chaque bloc contient environ 120 transitions. Par exemple un BLER égal à 1 correspond à un taux de transitions erronées de1 / (7350 x 120) soit environ 10^{-6}. Il est fréquent d'avoir, pour des CD-R correctement gravés, un BLER inférieur à 1, correspondant à un taux de transitions erronées inférieur à 10^{-6}.

Dans l'hypothèse d'une répartition aléatoire des erreurs, il est possible de relier les différents paramètres d'erreurs entre eux (cf. annexe 1). Le graphe ci-dessous donne la relation entre BLER, E32 et la probabilité p qu'une transition génère une erreur. Si les erreurs sont aléatoirement dispersées, l'apparition des erreurs incorrigibles se produit pour une valeur de BLER de l'ordre de 3800, correspondant à une probabilité pour une transition d'être erronée d'environ 0,6%. Cette valeur est élevée par rapport aux valeurs réellement mesurées sur les CD-R, l'hypothèse d'une répartition aléatoire des erreurs étant rarement satisfaite.

Relation entre BLER et E32 pour des erreurs réparties aléatoirement



Paramètres d'erreurs et analyseurs

Le LNE dispose de trois analyseurs permettant d'obtenir les paramètres d'erreurs de CD-R :

- Analyseur CATS SA300 de la société Audio Development,
- Analyseur R 40X E de la société DaTARIUS,
- Analyseur DVX de la société Clover.

L'analyseur CATS SA300 ne fait des analyses qu'en lecture à la vitesse 1x. Il est muni d'un lecteur mono-faisceau de référence (développé par Philips), datant d'avant 2000. Les deux autres analyseurs sont munis de lecteurs PLEXTOR tri-faisceaux et peuvent faire des analyses jusqu'à la vitesse 40x CAV. Pour les vitesses de lecture supérieures à 8x, la vitesse angulaire du disque est constante pendant toute la lecture du disque (CAV : « Constant Angular Velocity »), la vitesse affichée n'étant atteinte qu'en fin de disque.

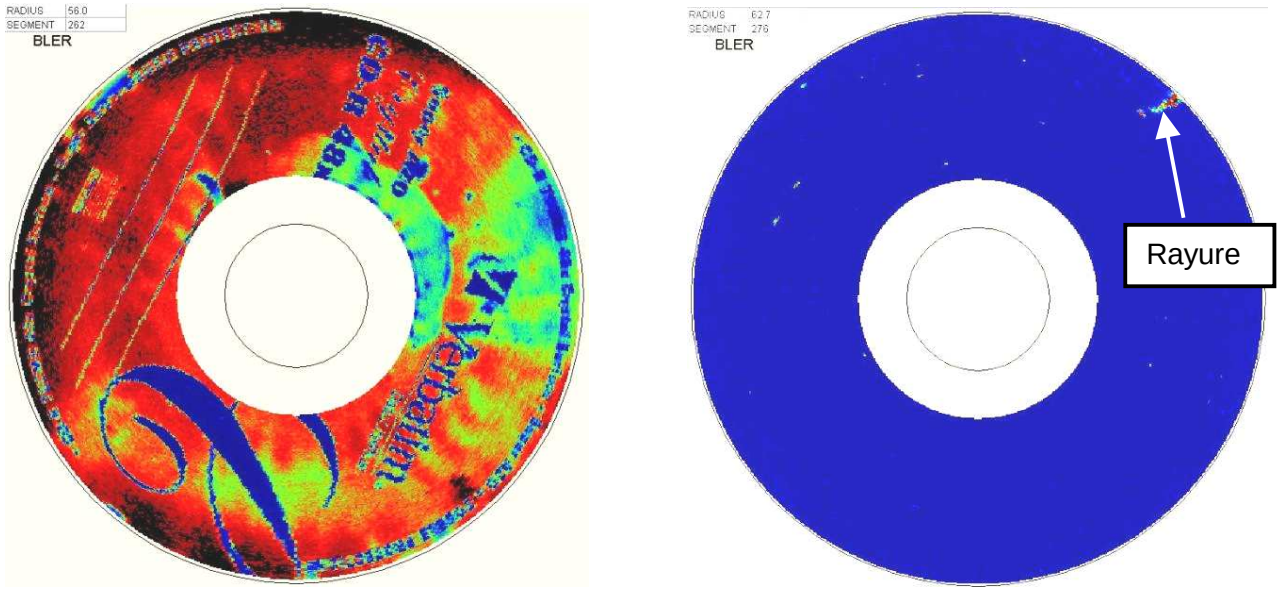
Compte tenu du principe de décodage du signal optique (§ 2.2), les paramètres d'erreurs mesurés peuvent différer notablement d'un analyseur à l'autre et aussi en fonction de la vitesse de lecture. A contrario, certaines dégradations comme des micro-taches (cf. § 3.4) peuvent produire des paramètres d'erreurs indépendants de l'analyseur. La sensibilité d'un CD-R vis à vis du lecteur ou de la vitesse de lecture peut être ainsi source d'information sur la nature de la dégradation.

Les analyseurs fournissent en premier lieu des valeurs moyennes des paramètres d'erreurs en cours de lecture avec une résolution de l'ordre de 1s en lecture à la vitesse 1x. On a ainsi des courbes comportant environ 4000 points pour l'analyse d'un CD-R entièrement gravé. Chaque point correspond à une moyenne sur plusieurs tours du sillon (4 à 8 tours) et ces courbes ne permettent donc pas de localiser angulairement des défauts sur le disque.

En plus de ces courbes, les deux premiers analyseurs donnent des représentations de surface (« mapping ») du paramètre BLER. La résolution est de l'ordre de 0,2 mm correspondant à la longueur d'un trame sur le sillon. Plusieurs sillons sont moyennés pour chaque point du mapping.

Ces représentations de surface, contrairement aux courbes, permettent une localisation des défauts. Il est parfois possible de reconnaître sur le mapping du BLER les inscriptions du dos du disque, ce qui montre que la sérigraphie participe à la dégradation de la qualité de la gravure (exemple de gauche ci-dessous). On peut également repérer l'effet de rayures importantes (exemple de droite).

Représentations de surface du BLER de deux CD-R– Analyseur CATS SA300



2.2 ANALYSE DU SIGNAL OPTIQUE

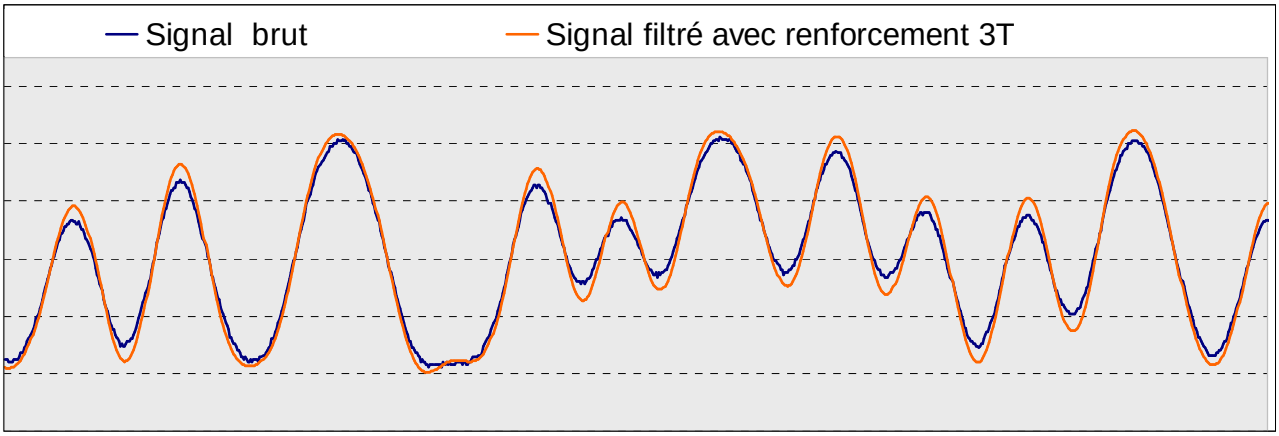
Le décodage du signal optique

Afin d'appréhender les relations entre la dégradation du signal optique et l'apparition d'erreurs numériques, il est nécessaire de connaître les processus de décodage qui permettent d'obtenir le code EFM à partir du signal optique. Trois processus sont en cause :

La mise en forme du signal optique

Le signal optique est filtré pour éliminer des hautes fréquences parasites. Celles-ci pourraient en effet générer des transitions indésirables au voisinage des transitions principales. On peut utiliser également un égaliseur fréquentiel qui renforce les fréquences proches de celle de la modulation 3T (0,72 MHz en lecture 1x). Cela permet une meilleure précision de positionnement des transitions associées aux pits et lands courts (3T, 4T). Un tel renforcement n'est à priori pas obligatoire pour la lecture des CD-R (il l'est pour la lecture des DVD-R et des CD-RW). Il peut toutefois améliorer la lecture de CD-R ayant subi une dégradation avec atténuation du contraste pits / lands. La figure ci-dessous illustre cet effet.

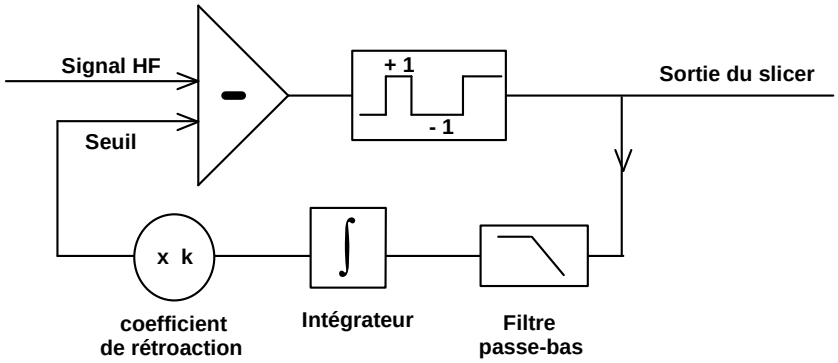
Renforcement de la modulation 3T du signal optique à l'aide d'un égaliseur adapté



La détermination du seuil de décision

Elle se fait grâce à une boucle de rétroaction qui ajuste le niveau du seuil pour que la durée cumulée du signal optique situé au-dessus du seuil soit égale à celle du signal optique situé en-dessous. Le signal optique est pour cela transformé par un « slicer » qui lui fait prendre les valeurs +1 et –1 selon qu'il est supérieur ou inférieur au seuil. La composante continue résiduelle en sortie du slicer est utilisée comme information de régulation du niveau du seuil.

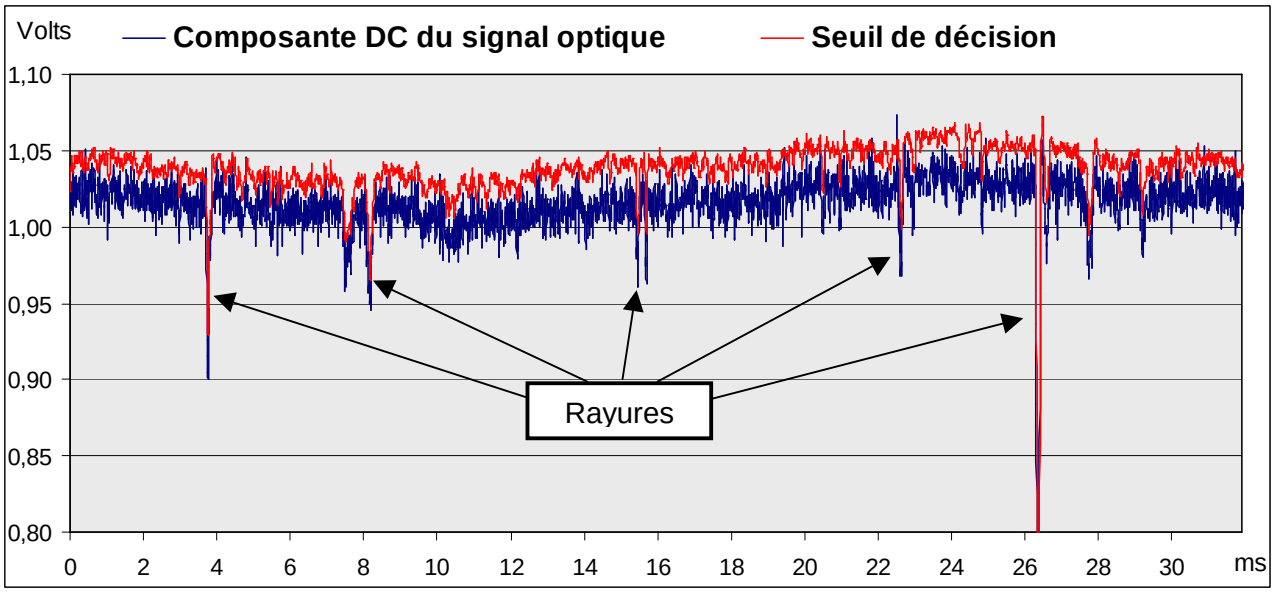
Principe de la boucle de rétroaction permettant l'ajustement du seuil de décision



L'ajustement du seuil de décision permet de compenser les fluctuations du niveau global du signal optique et les défauts de symétrie de ce signal. Le graphique ci-dessous montre un exemple d'évolution du seuil de décision sur un peu moins d'1 tour de sillon (lecture 8x), comparée avec celle de la composante continue du signal optique. Sur cet exemple, le seuil de décision est supérieur d'environ 3% à la composante continue, ce qui correspond à une dissymétrie positive du signal optique (voir page 12).

On repère aussi des chutes brutales du niveau qui sont liées à des rayures à la surface du disque. Le choix de la constante de temps d'intégration dans la boucle de rétroaction conditionne la capacité de décodage des données lors du passage de la tête de lecture sur une rayure.

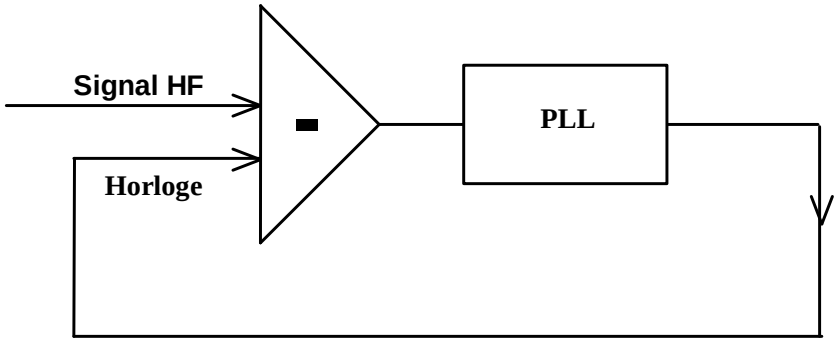
Exemple d'évolution sur un tour de sillon
de la composante continue du signal optique et du seuil de décision



La mise en place de l'horloge

La fréquence de l'horloge utilisée pour le décodage de l'information numérique est asservie au signal optique par une boucle de rétroaction de type PLL (« Phase-Locked Loop »). Cette boucle minimise le déphasage moyen entre l'horloge et le signal. Elle ne peut fonctionner qu'en partant d'une fréquence déjà proche de la fréquence idéale. Elle est définie par une constante de temps d'intégration et un coefficient de rétroaction.

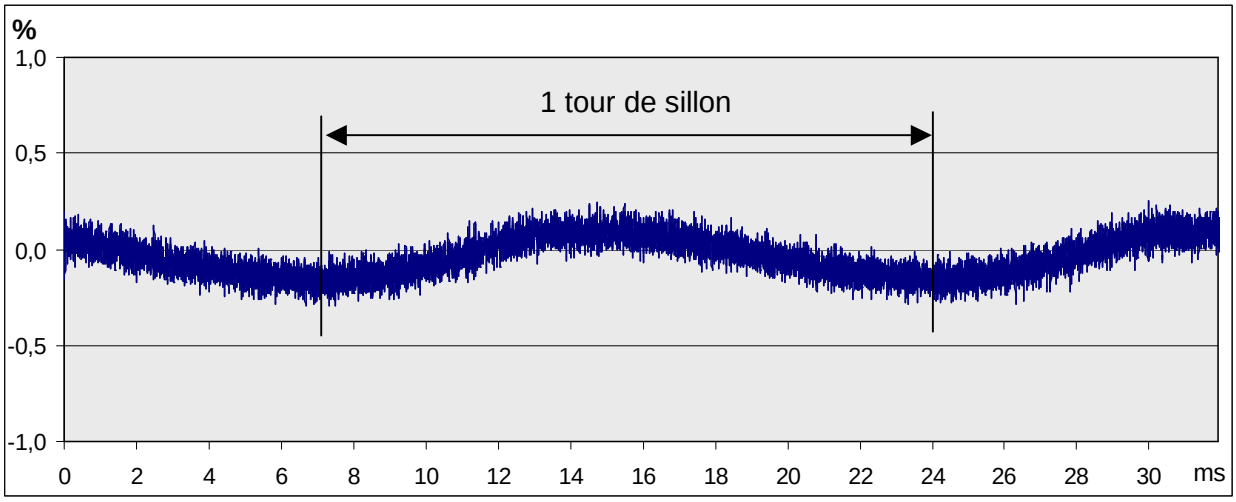
Principe de la boucle de rétroaction permettant la définition de l'horloge



L'ajustement de l'horloge permet, entre autre, de suivre les changements de vitesse de défilement en lecture CAV. Les fluctuations dues aux vibrations du disque ou à une légère excentricité du sillon sont également compensées par cet ajustement.

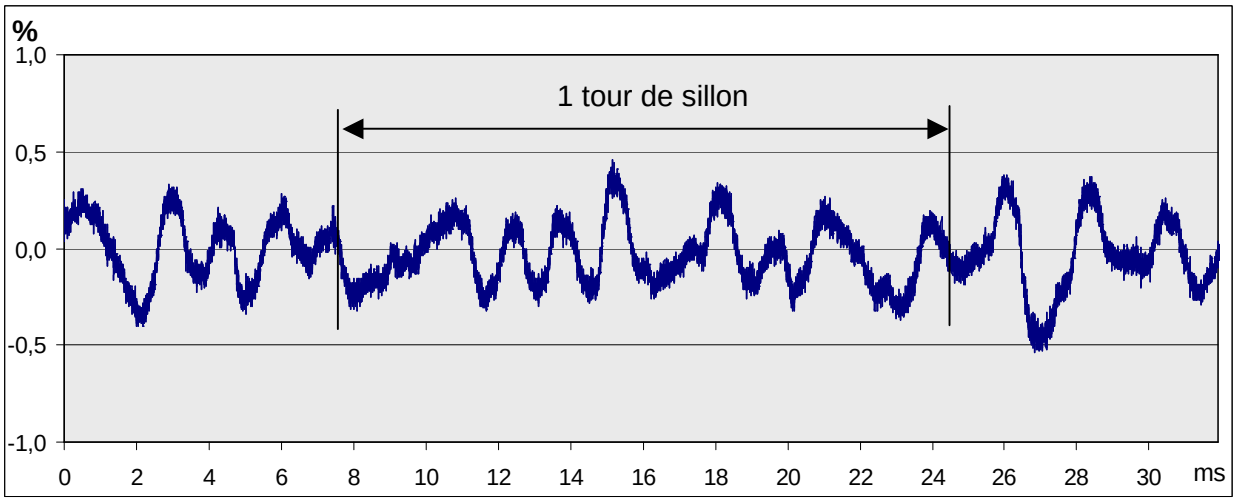
Le graphique ci-dessous donne un exemple pour lequel la fréquence d'horloge varie avec la période de rotation du disque (amplitude ± 0,15%), sans doute en raison de l'excentricité du sillon.

Exemple 1 d'évolution de la fréquence d'horloge – Lecture 8x - Début du disque



Le graphique ci-dessous donne un autre exemple pour lequel la fréquence d'horloge subit des variations rapides (amplitude ± 0,4 %), sans doute en raison de phénomènes vibratoires pendant la gravure. Ces fluctuations n'ont dans ce cas pas de relation avec la période de rotation.

Exemple 2 d'évolution de la fréquence d'horloge – Lecture 8x - Début du disque



La mise en forme du signal optique, la détermination du seuil de décision et la mise en place de l'horloge conditionnent la performance obtenue sur le décodage du signal optique. Ceci explique qu'en fonction du lecteur, on puisse avoir des taux d'erreurs différents.

Les paramètres caractéristiques du signal optique

Les paramètres d'amplitude et de contraste

La valeur maximale A_{max} du signal optique se produit sur les lands de grande longueur (11T). Elle dépend de la réflectivité de la couche métallique et de la transparence de la couche sensible et du substrat en polycarbonate. On mesure cette valeur maximale en pourcentage d'une valeur de référence. Les normes ont fixé la valeur minimale de $A_{\max}$ à 70% dans le cas des CD pressés. Pour les CD-R, cette valeur minimale est réduite à 60%. Une valeur de 65% ou plus reste cependant recommandée.

La valeur minimale A_{min} du signal optique se produit sur les pits de grande longueur (11T). Le paramètre qui est caractéristique du contraste de la gravure, noté **I11R**, est défini par :

$$I_{11R} = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max}}$$

La valeur minimale de I_{11R} est fixée à 0,6 pour les CD-R. Elle est généralement comprise entre 0,65 et 0,75.

La modulation 3T est de plus faible amplitude que la modulation 11T. $A_{\max 3T}$ étant la valeur maximale du signal optique pour les lands 3T et $A_{\min 3T}$ la valeur minimale pour les pits 3T, le paramètre, qui est caractéristique du contraste de la modulation 3T, noté **I3R**, est défini par :

$$I_{3R} = \frac{A_{\max 3T} - A_{\min 3T}}{A_{\max}}$$

Les normes indiquent que le paramètre I3R doit être compris entre 0,3 et 0,7. Pour les CD-R, il est généralement compris entre 0,35 et 0,45.

Dissymétrie du signal optique

Le signal optique est considéré comme symétrique lorsque la forme de la modulation pour un pit est symétrique de celle d'un land. Cela suppose que le noircissement de la couche sensible est proportionnel à l'énergie injectée par le laser lors de la gravure. La dissymétrie est caractérisée par un décalage entre la composante continue de la modulation 3T ($A_{moy\,3T}$) et celle de la modulation 11T ($A_{moy\,3T}$). On définit un paramètre de dissymétrie, noté **SYM**, par :

$$SYM = \frac{A_{moy\,3T} - A_{moy\,11T}}{A_{\max} - A_{\min}}$$

Le paramètre SYM est un rapport qui généralement exprimé en %. Il vaut 0% pour un signal symétrique. Les normes indiquent qu'il doit être compris entre –15% et +10%. Il est généralement compris entre – 5% et + 5%.

Les valeurs négatives du paramètre SYM peuvent être dues à une puissance du laser trop forte lors de la gravure, avec saturation de l'assombrissement des zones gravées. Le paramètre SYM est très lié à l'écart entre le seuil de décision et la composante continue du signal optique. Cet écart (paramètre β) peut être utilisé par les graveurs pour ajuster la puissance du laser en cours de gravure.

Jitter

Le terme « jitter », quelquefois traduit en français par « gigue » caractérise les fluctuations temporelles d'un système fournissant des impulsions régulières (horloge électronique). Plus précisément, il s'agit de l'écart-type de la distribution des écarts temporels des impulsions vis à vis des impulsions d'une horloge idéale. On ne peut pas appliquer strictement cette définition au signal optique qui, contrairement à une horloge, n'a pas une période unique.

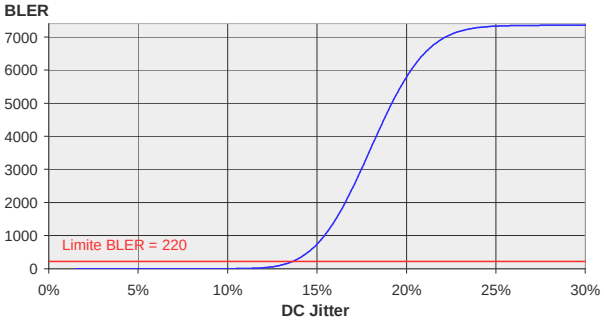
On définit deux sortes de jitter :

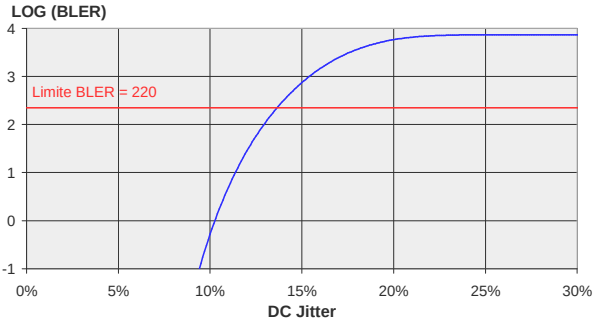
- Un jitter associé à la longueur, ou la durée en lecture 1x, de chaque type d'intervalle (lands et pits). Ce jitter est de type « Data to Data » (DD jitter). Il est défini par l'écart-type de la distribution de l'écart temporel entre deux transitions successives pour un type d'intervalle (lands 3T, …, 11T, pits 3T, … 11T). Une valeur globale (**DD Jitter MOY**) est obtenue par moyenne sur les 18 types d'intervalle.
- Un jitter relatif à l'horloge qui caractérise les fluctuations de position des transitions par rapport aux tops d'horloge. Ce jitter est de type « Data to Clock » (**DC jitter**). Il est défini par l'écart-type de la distribution des écarts entre transitions et tops d'horloge.

Le DD jitter ne dépend que du seuil de décision. Il est généralement exprimé en unité de temps (ns). Dans le cas d'une lecture à vitesse supérieure à 1x, on se ramène à la vitesse 1x en multipliant la valeur mesurée par la vitesse de lecture. La valeur maximale acceptable est généralement fixée à 35ns, bien que des jitters plus importants soient parfois compatibles avec un faible taux d'erreurs.

Le DC jitter dépend à la fois du seuil de décision et de l'horloge reconstituée. Il est généralement exprimé en pourcentage de l'intervalle de temps entre deux tops d'horloge. Pour un CD correctement gravé, il est de l'ordre de 6 à 8%. Il est possible d'établir une relation entre le taux d'erreur BLER et le DC jitter, dans le cas d'une distribution gaussienne des écarts. Le principe du calcul est donné en annexe 2. Les courbes ci-dessous illustrent les résultats de ce calcul.

Relation entre DC jitter et BLER dans le cas d'une distribution gaussienne des écarts





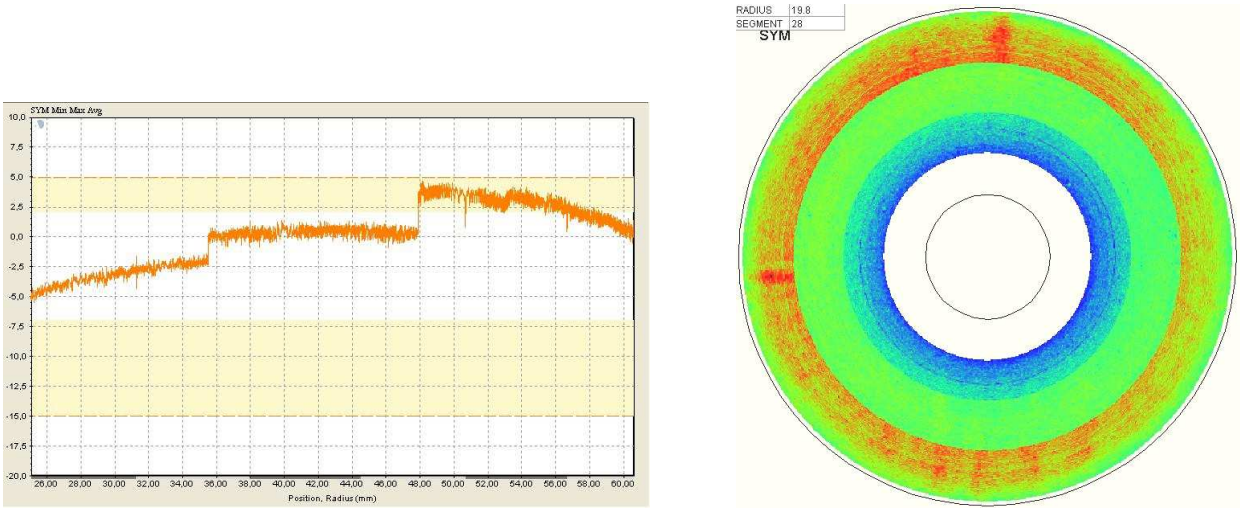
Le BLER atteint la limite normalisée de 220 pour un DC jitter égal à 14%. Au-delà de 15%, les taux d'erreurs montent rapidement avec apparition d'erreurs incorrigibles. En pratique, la distribution présente souvent un excès d'écarts élevés par rapport à une distribution gaussienne et les taux d'erreurs numériques sont plus élevés que ceux prévus par le calcul.

Les taux d'erreurs sont parfois dus à un très faible pourcentage de transitions fortement décalées, dues par exemple à des micro-taches, qui n'affectent que la queue de la distribution. Il n'y a alors aucune relation entre DC jitter et taux d'erreur (§ 3.4).

Paramètres du signal optique et analyseurs

L'analyseur donne les valeurs moyennes par seconde des paramètres d'amplitude et de contraste du signal optique (REF, I11R, I3R) et du paramètre SYM. On a également des représentations de surface de ces paramètres. L'exemple ci-dessous montre un disque présentant des variations brusques du paramètre SYM, liées au fonctionnement du graveur.

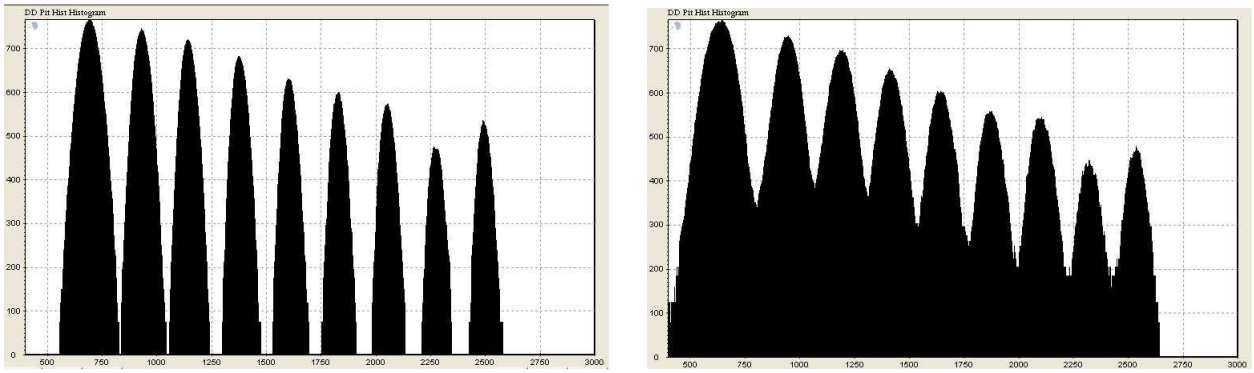
Exemple de représentation du paramètre SYM



L'analyseur Audiodev CATS donne, par période de 30 secondes, l'histogramme des longueurs des pits et l'histogramme des longueurs des lands ainsi que les valeurs moyennes des DD jitters pour chaque type de pit et land. La figure ci-dessous donne un exemple d'histogramme des longueurs des pits pour une bonne gravure et pour une gravure dégradée. L'échelle en ordonnée est une échelle logarithmique qui transforme une distribution gaussienne en distribution parabolique.

Deux exemples d'histogrammes des longueurs des pits

DD jitter compris entre 20 et 25 ns *DD jitter de l'ordre de 35 ns*



L'analyseur Audiodev CATS ne fournit pas de données relatives à la distribution des écarts des transitions vis à vis des tops d'horloge.

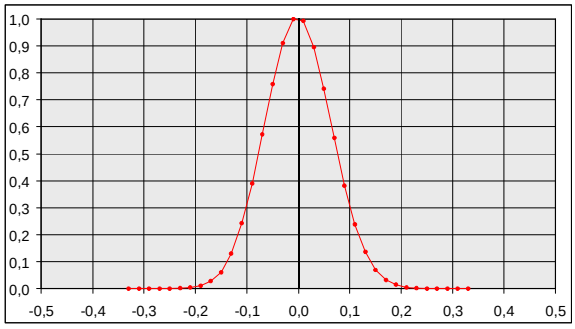
2.3 ANALYSE DETAILLEE DU SIGNAL OPTIQUE PAR UN LOGICIEL SPECIFIQUE

On a fréquemment constaté l'absence de corrélation entre les erreurs numériques et les paramètres du signal optique fournis par l'analyseur Audiodev CATS. Cette absence de corrélation est surprenante dans la mesure où les erreurs numériques relèvent du décodage du signal optique. Afin de comprendre l'origine de certaines erreurs numériques, on a été amené à développer une analyse plus détaillée du signal optique. Cette analyse est faite pour des portions de signal échantillonnées sur 8 millions de points. On utilise la sortie de l'analyseur Clover en lecture à la vitesse constante linéaire de 8x. Avec un pas d'échantillonnage typique de 4 ns, la durée totale du signal échantillonné est de 32 ms, ce qui correspond à une portion de sillon de longueur 300 mm. On a ainsi une analyse sur environ deux tours en début de disque et un peu moins d'un tour en fin de disque.

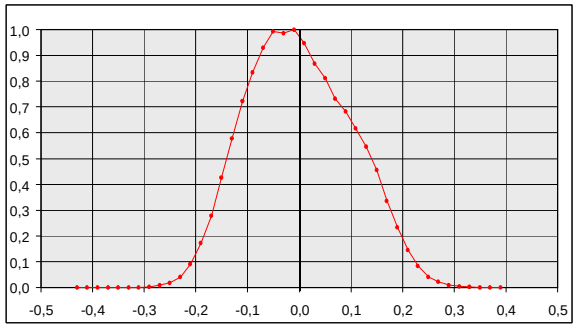
La distribution des écarts entre transitions et tops d'horloge

Après avoir simulé les trois processus permettant le décodage du signal optique (filtrage, détermination du seuil de décision, mise en place d'une horloge), on détermine l'écart entre chaque transition et le top d'horloge le plus proche. Chacun des écarts est ainsi compris dans l'intervalle [-0,5 ; +0,5] en unité d'horloge. On dispose d'environ 225 000 valeurs d'écarts dont on peut déduire la courbe de distribution (histogramme). Les figures ci-dessous montrent les histogrammes obtenus avec deux disques dont l'un est de bonne qualité de gravure. On notera cependant que dans les deux cas, les écarts excédant 0,4 sont inexistants et de ce fait, les taux d'erreurs numériques sont très faibles. La deuxième distribution présente une dissymétrie liée à des déviations de longueur de certains lands et pits.

Gravure de bonne qualité
DC jitter = 0,06 (6%)



Gravure de qualité moyenne
DC jitter = 0,1 (10%)



Les erreurs numériques sont associées aux transitions dont l'écart excède 0,5 en valeur absolue. L'histogramme mesuré ne donne pas une estimation directe du nombre de telles transitions, car les transitions ayant un écart supérieur à un demi intervalle d'horloge se retrouvent plus proche d'un autre top d'horloge. Toutefois l'allure de la distribution permet un prolongement à l'extérieur de l'intervalle [-0,5 ; +0,5].

Pour effectuer ce prolongement on réalise la transformation suivante de l'histogramme initial $H(x)$:

$$H(x) \quad \rightarrow \quad F(x) = -\sqrt{-2\,Ln\left[\frac{H(x)}{H(0)}\right]}$$

Dans le cas d'une distribution gaussienne, l'histogramme transformé est constitué de deux droites issues de l'origine et dont la pente est égale à l'inverse de l'écart-type σ qui est le DC jitter.

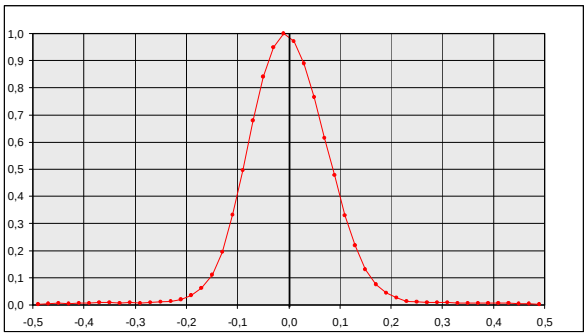
$$H(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\,\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad \rightarrow \quad F(x) = -\frac{|x|}{\sigma}$$

La transformation $H(x) \longrightarrow F(x)$ permet de visualiser les ailes de la distribution. Ces ailes ont une importance primordiale car ce sont elles qui engendrent les erreurs numériques. La partie principale caractérisée par le DC jitter peut être élargie jusqu'à une valeur de12% sans produire beaucoup d'erreurs si la distribution est gaussienne. En pratique, les ailes de la distribution sont très souvent supérieures à celles d'une distribution gaussienne de même écart-type.

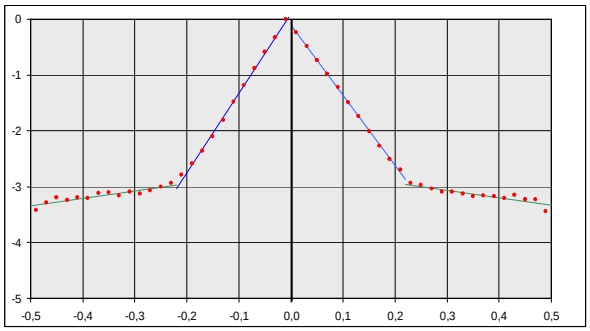
L'exemple ci-dessous correspond à une distribution dont la partie principale reflète une qualité de gravure correcte avec un DC jitter égal à 8%. Il s'agit toutefois d'un disque présentant un très fort taux d'erreurs numériques (BLER supérieur à 3500). L'origine des erreurs est liée à une distribution secondaire n'affectant qu'une faible partie des transitions, mais avec un écart type extrêmement élevé. Cette distribution secondaire n'est visible que sur la distribution transformée $F(x)$. Il est possible de prolonger par extrapolation linéaire la fonction $F(x)$ en dehors de l'intervalle [-0,5 ; +0,5] pour estimer le taux d'erreurs numériques. Le détail des calculs est donné en annexe 3.

Exemple d'une distribution à faible jitter mais produisant un fort taux d'erreurs numériques

Distribution $H(x)$



Distribution transformée $F(x)$



L'analyse des débuts de trame

La production des erreurs numériques est liée à des déformations du signal optique par rapport à une forme idéale. Pour appréhender ces déformations, il est nécessaire de connaître le code numérique car une modulation 4T par exemple peut être suffisamment déformée pour être décodée en 3T. Le code numérique vrai est accessible grâce aux correcteurs d'erreurs, mais le décodage associé, trop complexe, n'a pas été implémenté dans notre logiciel de traitement du signal optique.

On s'intéresse donc aux débuts de trame pour les raisons suivantes :

- les débuts de trame sont régulièrement espacés et donc facilement repérables,
- on en connaît le code numérique qui est constitué de deux 11T successifs,
- ils présentent un pit et un land suffisamment long pour permettre l'observation des défauts de taille micrométrique.

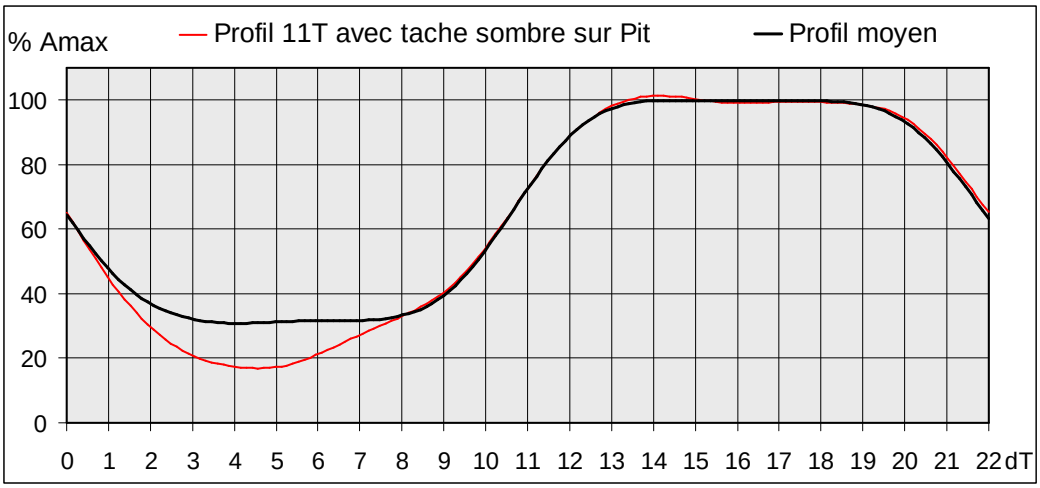
La longueur du signal optique prélevé permet l'étude d'environ 1800 trames. On détermine un profil moyen des débuts de trame, en distinguant les trames commençant par un land 11T et celles commençant par un pit 11T. On élimine pour le calcul du profil moyen les profils les plus déformés. Il est alors possible de comparer chaque début de trame à ce profil moyen.

Des statistiques sur les écarts au profil moyen sont réalisées séparément sur les pits 11T et les lands 11T pour :

- donner un profil moyen des taches (profondeur, largeur),
- réaliser l'histogramme des écarts au profil moyen.

La figure ci-dessous montre la superposition du profil moyen et d'un début de trame déformé par une tache sombre sur le pit 11T.

Exemple de début de trame avec tache sombre comparé à un profil moyen

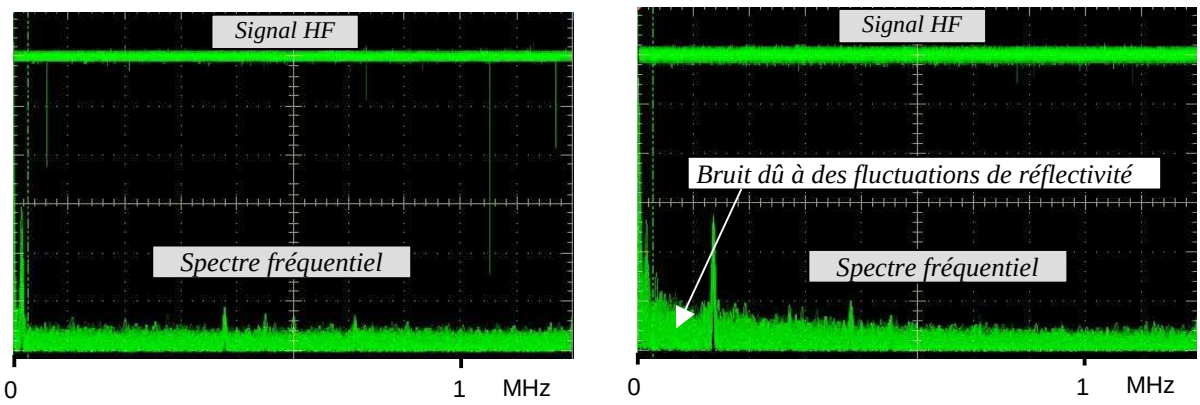


L'analyse des fluctuations de réflectivité sur disque vierge

Sur un disque gravé, il est difficile d'étudier les fluctuations du signal optique qui seraient dues à une dégradation, car elles se superposent aux fluctuations liées à la gravure qui contiennent l'information numérique à décoder. Cela est possible sur un disque non encore enregistré (vierge), à partir du signal optique délivré par certains analyseurs qui permettent la lecture des disques vierges. Un disque vierge parfait devrait fournir un signal optique constant (non bruité) correspondant au niveau de réflectivité du sillon non gravé.

On présente ci-dessous deux images d'écran d'oscilloscope, avec en haut le signal optique et en bas le spectre fréquentiel de ce signal sur la bande 0 - 1,25 MHz. L'image de droite fait apparaître la présence de fluctuations qui sont dues à une dégradation du disque.

Analyses spectrales du signal optique de deux CD-R vierges (normal et dégradé)



Ce type d'analyse ne permet pas de caractériser des dégradations qui seraient liées à la gravure.

3 DIFFERENTS TYPES DE DEGRADATION OBSERVES

L'ensemble des moyens d'analyse décrits au chapitre précédent nous a permis de classifier les dégradations des CD-R observées soit après vieillissement naturel, soit après vieillissement accéléré en étuve, soit après exposition à la lumière. Les catégories de dégradation décrites sont les plus caractéristiques. Un même CD-R peut présenter plusieurs types de dégradation simultanément.

3.1 DECOLLEMENT DU VERNIS ET DE LA COUCHE METALLIQUE (D)

Ce type de dégradation est assez rarement observé. Il l'a été sur un modèle de CD-R en vieillissement accéléré. Tous les disques du modèle ont fait apparaître ce type de dégradation plus ou moins prononcée. Des CD-R avec décollement du vernis ont également été observés en vieillissement naturel. Le décollement du vernis entraîne ou non la couche métallisée. Dans tous les cas, le disque est illisible sur la partie présentant un décollement.

L'exemple ci-dessous montre deux CD-R du même modèle ayant subi un vieillissement accéléré en étuve. Le décollement du vernis n'a pas entraîné la couche métallique.

Exemple de CD-R présentant un décollement du vernis sans décollement de la couche métallique

L'exemple ci-dessous montre les deux faces d'un CD-R avec décollement du vernis et de la couche métallique obtenu en vieillissement naturel.

Exemple de CD-R avec décollement du vernis et de la couche métallique

Vue du dos du disque

Vue du côté lecture

3.2 DEFAUTS LOCALISES (L)

L'identification de défauts localisés sur un disque, à partir des analyses, peut être faite en comparant les erreurs de niveau 2 (E12, E22, E32) avec celles de niveau 1 (BLER). La présence d'erreurs de niveau 2 avec un taux de BLER faible signale des défauts localisés. Ceux-ci peuvent être également décelés à l'aide de la représentation de surface du BLER.

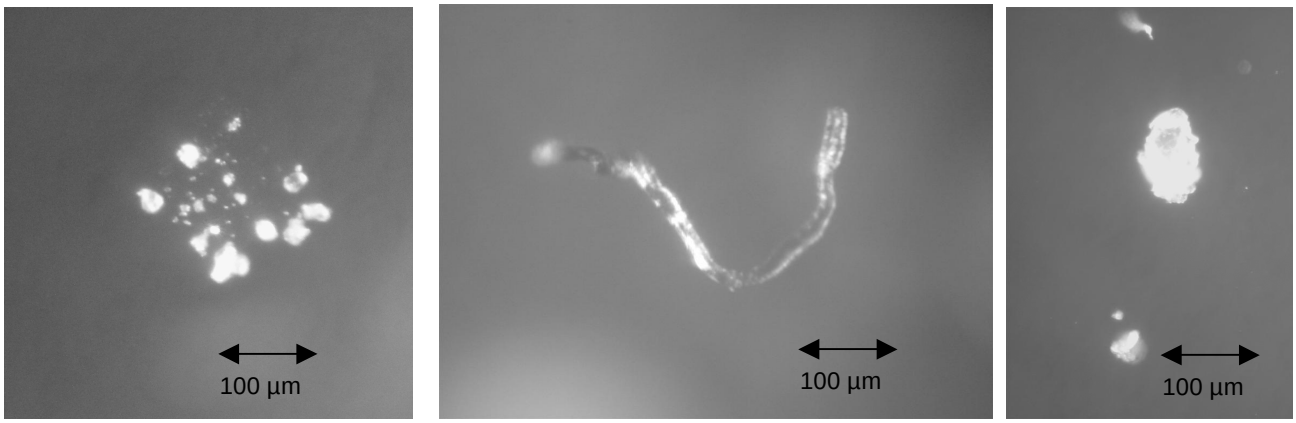
Les défauts localisés peuvent être :

- des rayures ou poinçonnement à la surface du disque côté lecture,
- des lacunes dans le polycarbonate,
- des taches au niveau de la couche sensible dues par exemple à des poussières piégées lors de la fabrication.

Certains défauts localisés sont visibles à l'œil nu ou au microscope, mais il arrive également que des défauts localisés détectés par les taux d'erreurs ne soient pas visibles.

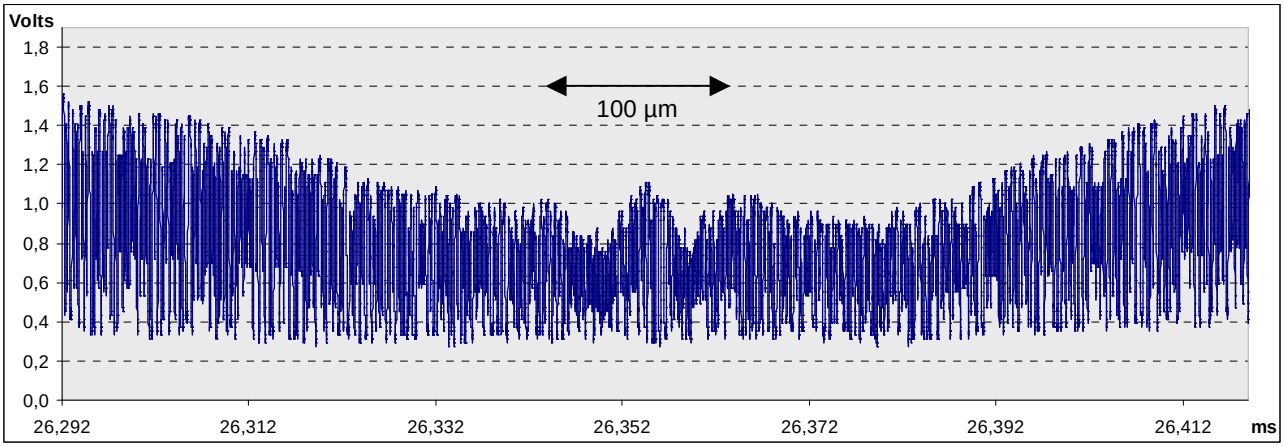
Les photographies ci-dessous prises au microscope montrent des défauts à l'intérieur du polycarbonate. Ces défauts semblent être des anfractuosités (lacunes) qui ont peut être été produites par l'effet de contraintes internes.

Défauts dans le polycarbonate vus au microscope



La figure ci-dessous montre le signal optique au passage du laser sur une rayure à la surface d'un disque. On constate une atténuation importante mais progressive des valeurs maximales du signal (lands). La zone affectée dépasse 500µm ce qui est plus large que la rayure elle-même. Ceci est dû au fait que la focalisation du faisceau laser ne se fait pas à la surface du disque, mais au niveau de la couche gravée. L'effet sur les erreurs numériques est localement important. Il peut dépendre de la rapidité d'adaptation du seuil de décision et donc éventuellement du lecteur. La qualité de gravure initiale peut également jouer sur l'impact d'une rayure en terme d'erreurs numriques.

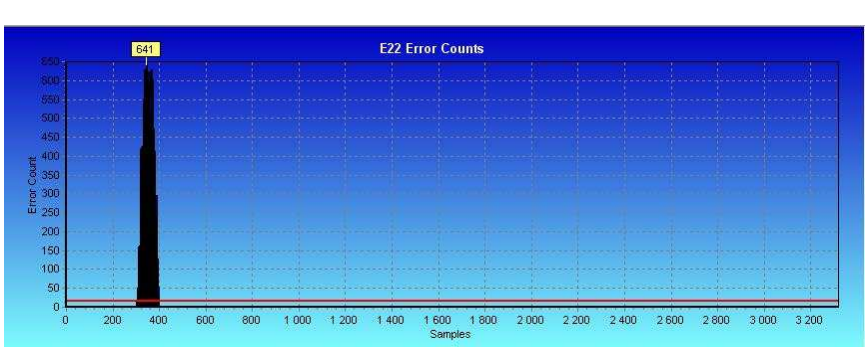
Atténuation du signal optique au passage sur une rayure

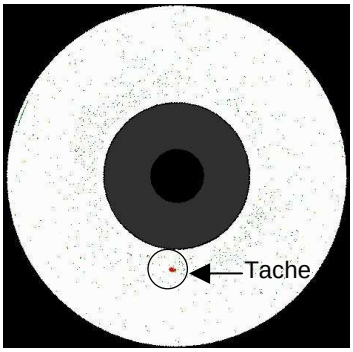


Les figures ci-dessous montrent l'effet d'une tache sur les erreurs de type E22 (nulles en dehors de la partie concernée par la tache). La tache apparaît sur la représentation de surface du BLER. Elle est visible à l'œil nu, de forme circulaire avec un diamètre de l'ordre du mm. Il s'agit d'une tache au niveau de la couche sensible ayant grandi à partir d'un défaut plus fin impliquant la couche métallique (piqûre).

CD-R présentant une tache au niveau de la couche sensible

Erreurs E22 *BLER (représentation de surface)*





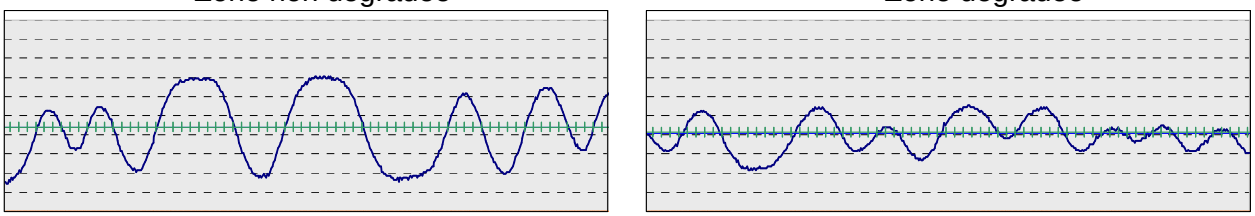
3.3 DIMINUTION DE LA REFLECTIVITE ET DU CONTRASTE ENTRE PITS ET LANDS (RC)

Certains disques présentent une dégradation liée à la diminution du contraste entre pits et lands. Cette diminution est principalement due à l'assombrissement des lands. Lorsqu'elle est très prononcée, elle s'accompagne parfois d'un éclaircissement des pits, mais qui est moins prononcé que l'assombrissement des lands.

Les figures ci-dessous montre l'aspect du signal optique dans une zone du disque non dégradée et dans une zone fortement dégradée. Pour cette dernière, la modulation 3T est tellement affaiblie que des erreurs sont générées systématiquement (apparition de 2T).

Aspect du signal optique

Zone non dégradée Zone dégradée



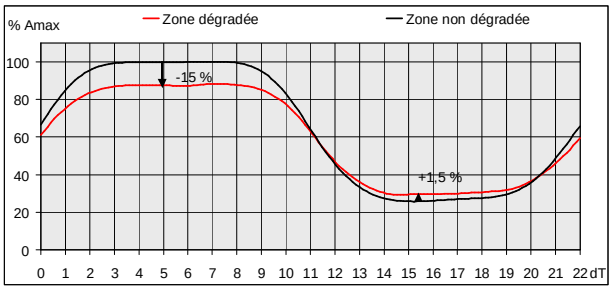
La dégradation se manifeste sur le signal optique par des variations des paramètres d'amplitude, de contraste et de dissymétrie. On observe une baisse de la réflectivité des zones non gravées (Amax) pouvant parfois atteindre 20%, une baisse de contraste entre les zones gravées et non gravées (I3R et I11R), et généralement une baisse du paramètre de dissymétrie (SYM). Dans certains cas le paramètre SYM peut augmenter ou présenter une baisse suivie d'une augmentation en fonction du niveau de dégradation.

Typiquement, ce type de dégradation est homogène à l'échelle micrométrique, c'est à dire que le signal optique ne présente pas de fluctuations à des échelles inférieures à 100 µm. Cette homogénéité fait que la dégradation a peu d'impact sur les erreurs numériques. En effet le lecteur a la capacité à s'adapter à des signaux peu contrastés ou ayant un paramètre de symétrie non idéal. Au delà d'un certain seuil de dégradation, les erreurs numériques apparaissent en grand nombre, le signal devenant rapidement indécodable.

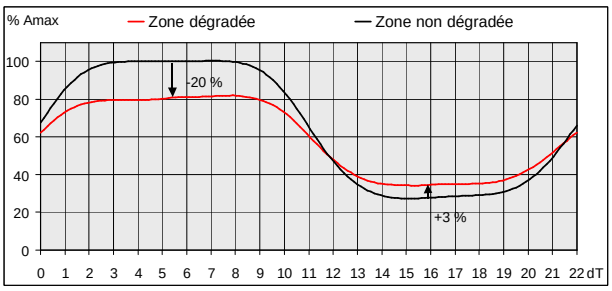
Les graphiques ci-dessous illustrent l'effet de seuil de la dégradation sur les erreurs numériques, dans le cas d'un disque présentant des zones inégalement dégradées. Sur la figure de gauche, malgré une chute de réflectivité des lands de 15%, le BLER reste inférieur à 50. Sur la figure de droite, une chute de réflectivité de 20% entraîne une augmentation du BLER jusqu'à des valeurs supérieures à 4000.

Débuts de trames dans des zones ayant des taux d'erreurs très différents

BLER < 50

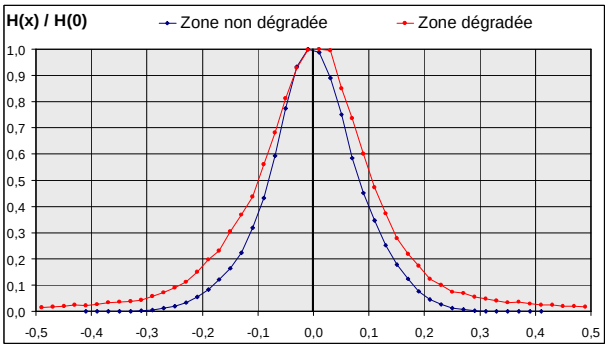


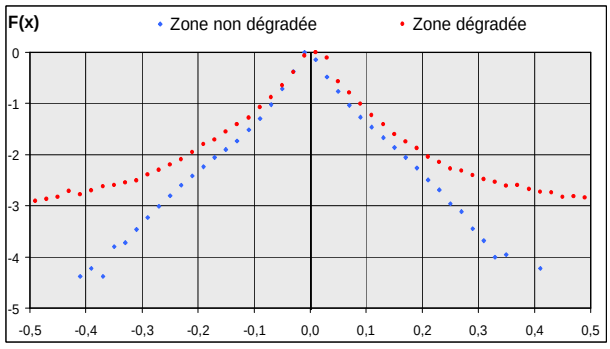
BLER > 4000



Les graphiques ci-dessous présentent les histogrammes transformés et non transformés obtenus dans des zones sans dégradation ou fortement dégradées. La dégradation se traduit par une déformation globale de l'histogramme avec augmentation du jitter : on passe d'un histogramme gaussien à un histogramme dont les ailes sont renforcées. L'écart avec un histogramme gaussien est progressif (sans discontinuité) lorsqu'on va de la partie centrale vers les ailes.

Histogramme des zones dégradées et non dégradées



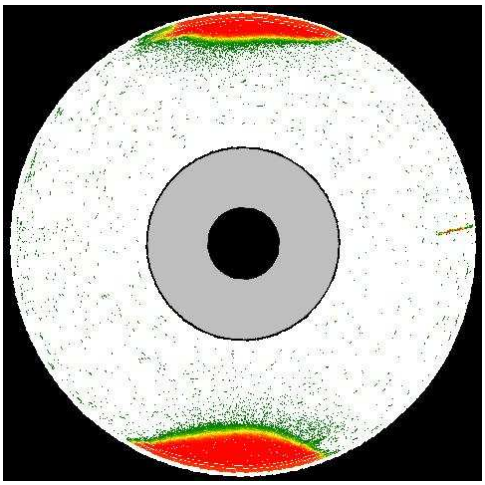


La dégradation liée à la baisse de réflectivité et de contraste (type RC) est souvent observée en relation avec un vieillissement dû à l'effet de la lumière, en particulier après exposition à des intensités lumineuses élevées (cf. § 5.3).

L'effet de la lumière a également été observé, mais plus rarement, en vieillissement naturel. On en décrit un exemple particulier où, du fait de la conservation dans un boîtier, l'éclairement du disque n'a pas été homogène sur l'ensemble de la surface. La lumière pénétrant dans le boîtier par des fentes transparentes sur les deux côtés opposés du boîtier, la dégradation est alors la plus importante sur deux lunules diamétralement opposées. Les figures de la page suivante montrent, d'une part une photographie faisant apparaître un jaunissement du disque sur la face de lecture et d'autre part la représentation de surface du BLER. Cette dernière est très contrastée avec des valeurs très élevées du BLER (en rouge) sur les zones les plus exposées et des valeurs excellentes (inférieures à 1) sur la plus grande partie du disque. L'analyse des paramètres du signal optique Amax, I11R, I3R montre que la dégradation atteint une partie du disque beaucoup plus large que la zone ayant des taux d'erreur élevés, et qu'elle va jusqu'à la partie centrale du disque. Ceci met en évidence l'effet de seuil sur les erreurs numériques pour une dégradation de ce type.

Disque conservé dans un boîtier et présentant une dégradation due à l'effet de la lumière

Photographie de la face côté lecture *Taux d'erreur BLER*



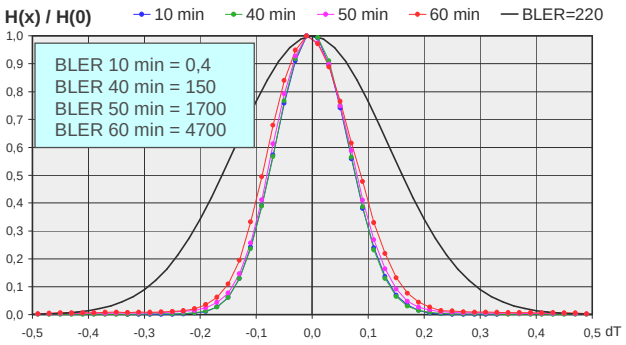
3.4 TACHES DE TAILLE MICROMETRIQUE (MT)

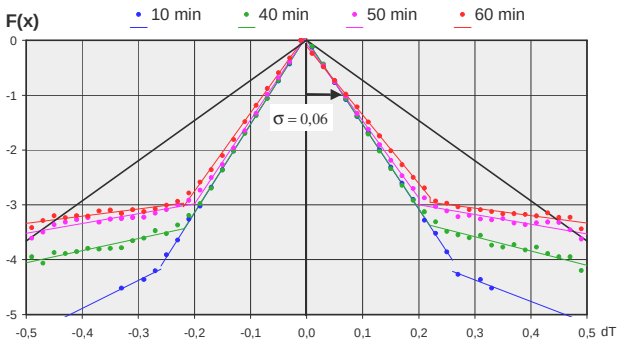
Certains modèles de disque présentent une dégradation qui apparaît homogène à une échelle pas trop petite, mais qui est en fait constituée de taches dont les dimensions sont de l'ordre de l'interpiste (1,6 µm). De telles taches ont été mises en évidence par l'analyse détaillée du signal optique et sont parfois visibles au microscope. Elles affectent la couche très mince du colorant au contact de la couche métallique.

Pour les disques présentant ce type de dégradation, on a été surpris de constater que l'évolution des erreurs numériques n'était reliée à aucune évolution des paramètres du signal optique fournis par les analyseurs, y compris le jitter. En étudiant l'histogramme des écarts des transitions, on constate qu'il est constitué de deux parties bien distinctes : une partie centrale stable qui concerne 99% des transitions et une partie secondaire (ailes) dont l'évolution est associée à celle des erreurs numériques.

Sur les figures ci-après, on montre les histogrammes obtenus pour différentes positions sur un CD-R présentant des micro-taches d'autant plus marquées que l'on s'approche du bord externe du disque. Le taux d'erreur BLER augmente fortement, passant d'une valeur inférieure à 1 (excellent) près du bord interne à des valeurs supérieures à 4000 près du bord externe. La différence entre les zones non dégradés et dégradées ne se voit que sur les histogrammes transformés F(x).

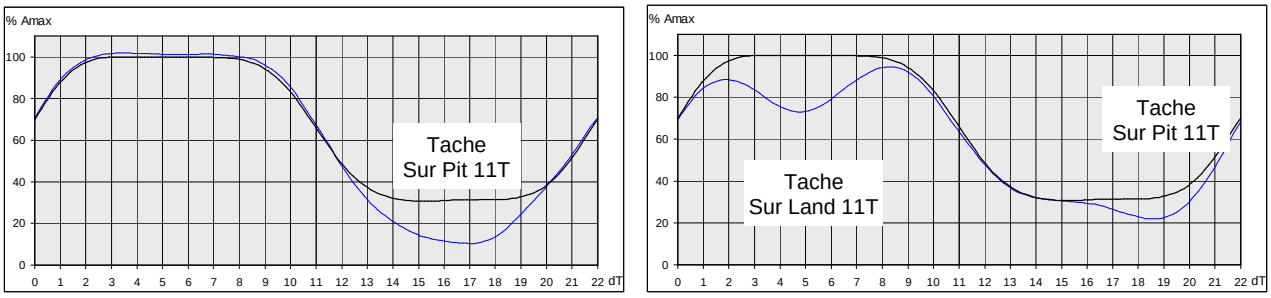
Histogrammes obtenus pour différentes positions sur le disque
(dégradation s'amplifiant vers le bord externe)



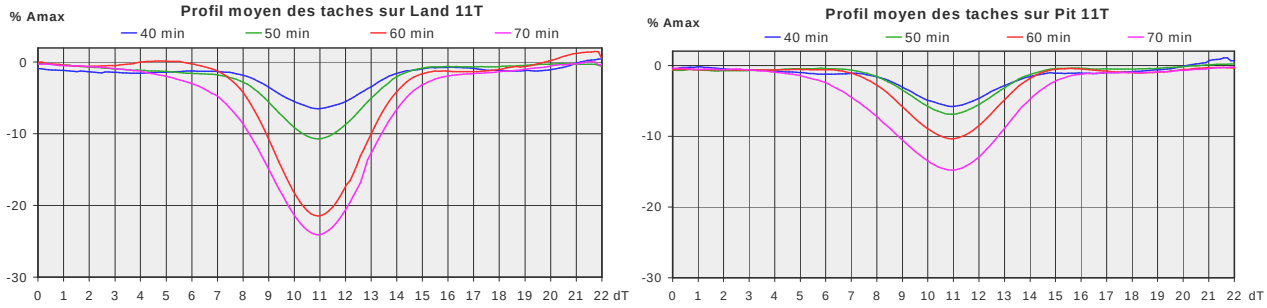


L'étude des débuts de trame est également instructive. Elle fait apparaître des creux à la fois sur les lands et sur les pits comme le montrent les figures suivantes.

Débuts de trame faisant apparaître des creux dans le signal optique

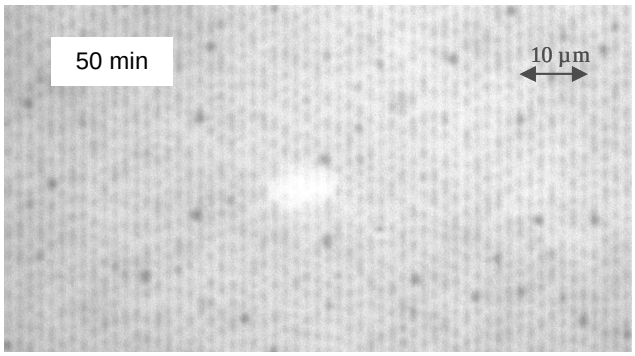


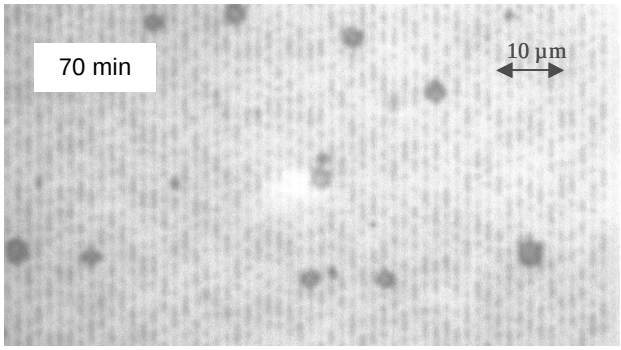
Les figures ci-dessous montrent les profils moyens des creux (micro-taches), selon la position sur le disque. Les taches sont d'autant plus profondes que l'on va vers le bord externe du disque. L'amplitude des creux est plus grande sur les lands que sur les pits.

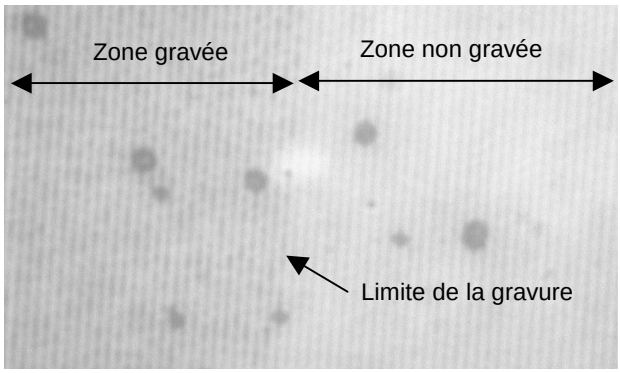


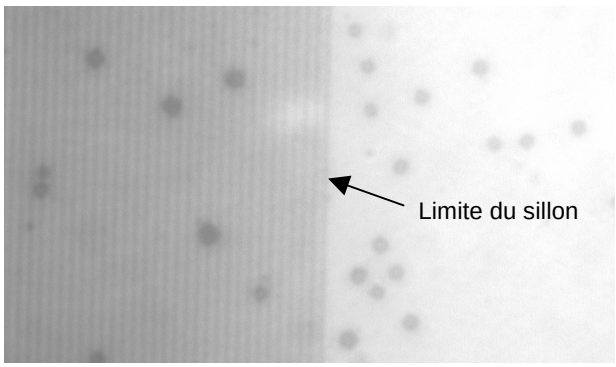
Lorsque les taches sont bien marquées, il est possible de les observer au microscope. Les photographies ci-dessous ont été obtenues sur le disque de l'exemple ci-dessus. Les taches sont visibles à la fois sur les zones gravées, non gravées et même sur l'extrême bord du disque, au-delà du sillon. La mise au point du microscope indique que les taches se situent au niveau de la couche sensible, mais il n'est pas possible de savoir si elles ne concernent que cette couche ou si la couche métallique est également impliquée.

Photographies de micro-taches prises au microscope en différant endroits d'un même disque







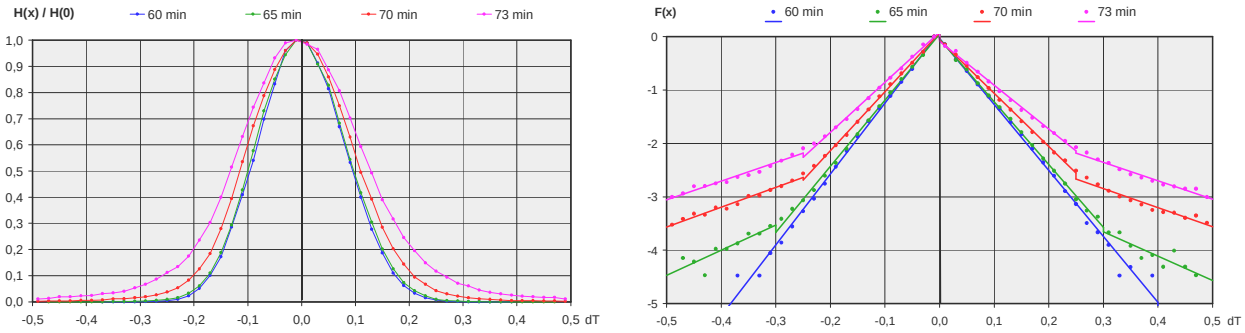


3.5 FLUCTUATIONS DE REFLECTIVITE (F)

Dans un certain nombre de cas, l'histogramme des transitions ne comprend pas, comme dans l'exemple précédent, une partie centrale stable. En comparant les zones les moins dégradées avec les zones les plus dégradées, on constate que l'ensemble de l'histogramme se déforme, avec une augmentation des ailes responsable des erreurs numériques, mais aussi un élargissement de la partie centrale qui se traduit par une augmentation du jitter.

Les graphiques ci-dessous illustrent un tel cas pour un disque présentant une dégradation près du bord externe (au delà de 60 minutes).

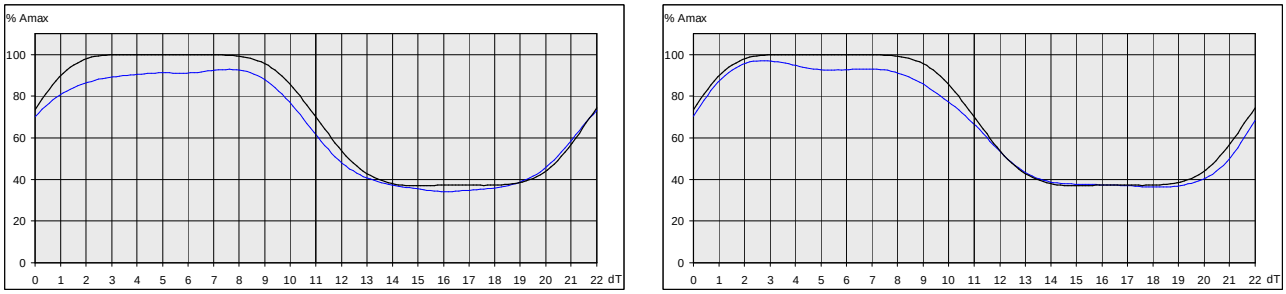
Histogrammes obtenus pour différentes positions sur le disque (dégradation s'amplifiant vers le bord externe)



Contrairement au cas des taches micrométriques bien séparées et n'affectant qu'un faible pourcentage des transitions, il semble que le phénomène de dégradation s'exprime sur l'ensemble des transitions.

L'étude des débuts de trame fait apparaître des assombrissements des lands, moins marqués que pour les taches micrométriques, mais généralisés à tous les lands. On peut les décrire comme une fluctuation de réflectivité des zones non gravées. Elle serait due soit à une diminution de la transparence de la couche sensible soit à une baisse de réflectivité de la couche métallique. La longueur caractéristique de ces fluctuations est de l'ordre d'une dizaine de micromètres.

Débuts de trame avec fluctuations de niveau du signal optique (assombrissements)



Dans d'autres cas les fluctuations existent aussi sur les pits, avec des parties éclaircies. La caractéristique principale des dégradations de type F est l'existence de fluctuations du signal optique à l'échelle micrométrique, par opposition aux dégradations de type RC pour les quelles les variations sont beaucoup plus globales.

Des fluctuations ont pu être mis en évidence aussi sur des disques vierges ayant subi un vieillissement naturel. Le spectre de ces fluctuations couvre une large bande de fréquences, jusqu'à 300 kHz en lecture à la vitesse 1x (voir figure page 17). Les longueurs sur le sillon associées à ces fréquences vont de quelques micromètres à plusieurs dizaines de micromètres.

Remarque : il peut être difficile de distinguer une dégradation de type MT, lorsque les micro-taches sont peu marquées, d'une dégradation de type F.

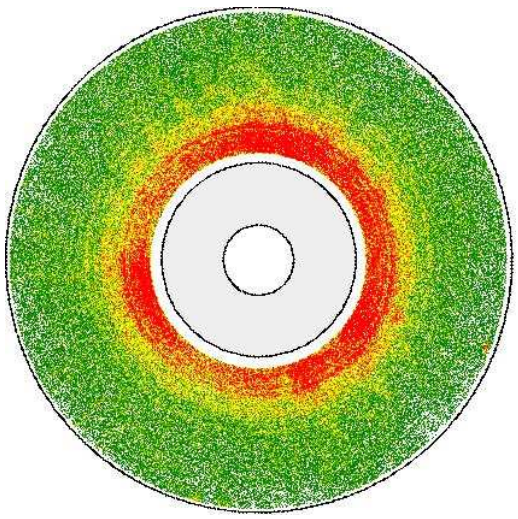
4 REPARTITION DES DEGRADATIONS SUR LA SURFACE DES DISQUES

Il est assez rare que la dégradation se produise de manière égale sur toute la surface du disque. Faisant abstraction des défauts localisés, on peut répertorier les répartitions les plus fréquentes en s'appuyant sur les représentations de surface du BLER.

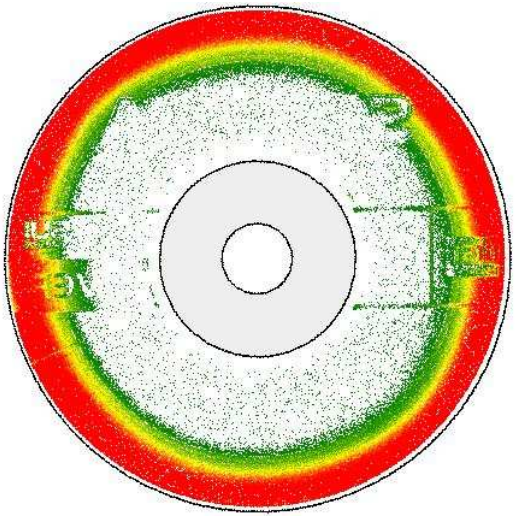
4.1 DEGRADATION A PARTIR DES BORDS

On s'intéresse ici aux dégradations qui s'amplifient régulièrement soit lorsqu'on s'approche du bord externe du disque, soit lorsqu'on s'approche du bord interne, sans présenter de différences notables en fonction de l'angle sur le sillon. Les représentations de surface ci-dessous en donnent deux exemples.

Dégradation à partir du bord interne



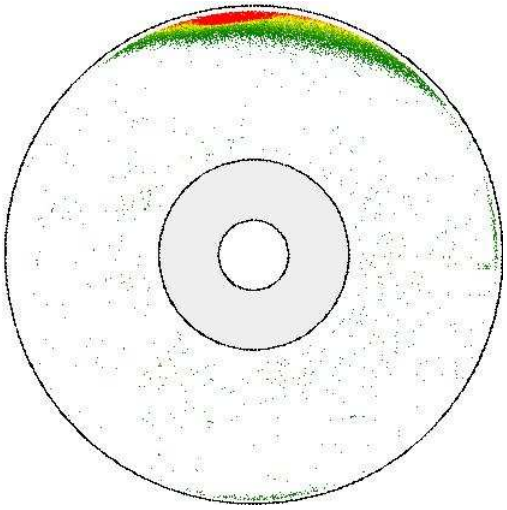
Dégradation à partir du bord externe



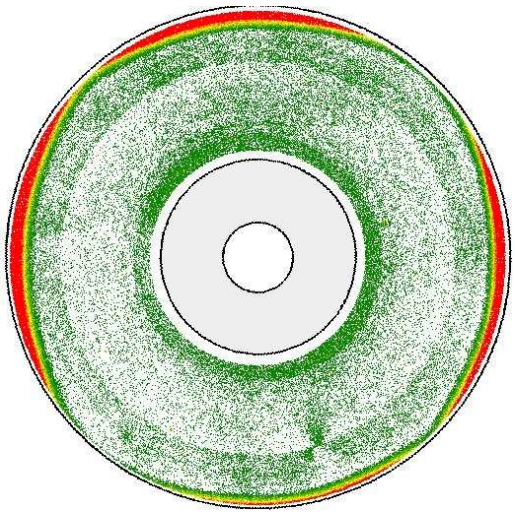
4.2 DEGRADATION A PARTIR DU BORD EXTERNE LIMITEEE A DES SECTEURS

De telles dégradations sont limitées à un ou plusieurs secteurs et s'amplifient près du bord externe. Il est fréquent que la ou les zone(s) dégradée(s) soient très minces (quelques mm). Les représentations de surface ci-dessous en donnent deux exemples.

Dégradation sur un secteur



Dégradation sur plusieurs secteurs

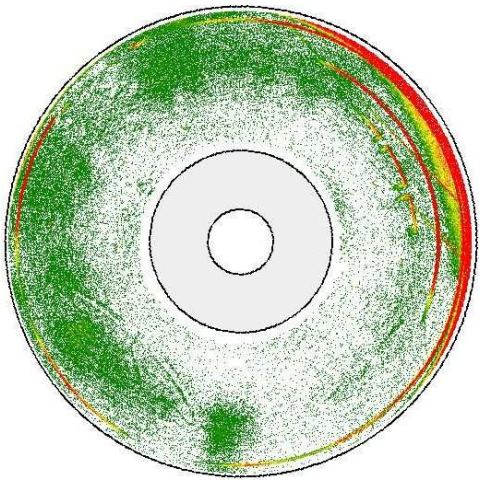


4.3 DEGRADATION SUR UN ANNEAU

On observe parfois une dégradation sur un anneau ou sur des portions d'anneaux comme montré sur les figures ci-dessous.

Dégradation sur un anneau près du bord externe

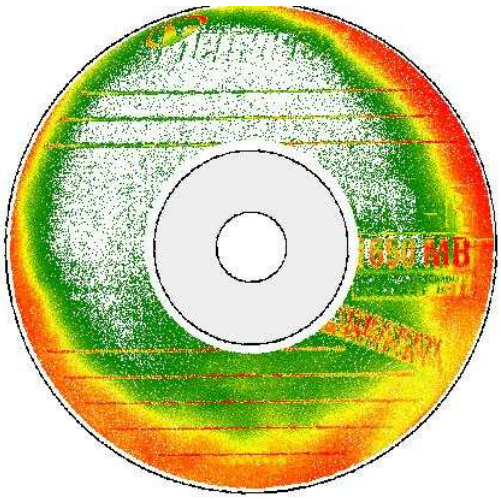
Dégradation sur des arcs

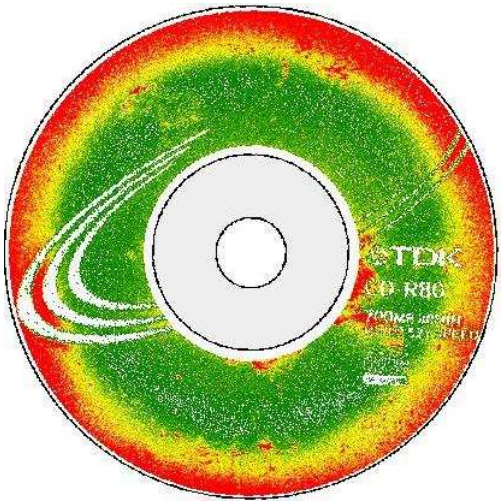


4.4 MODULATION DE LA DEGRADATION PAR LA SERIGRAPHIE

La sérigraphie sur le dos du disque, avec la marque du disque ou des logos, est assez fréquemment visible sur les représentations de surface du BLER. Généralement la dégradation n'est pas uniquement liée à la sérigraphie, mais les erreurs sont amplifiées, en particulier par les traits fins figurant sur les dos de certains disques. Les deux représentations de surface du taux d'erreur BLER ci-dessous montrent une dégradation à partir du bord externe, sur laquelle se superpose l'effet de la sérigraphie. Les inscriptions apparaissent soit sous forme d'une augmentation des erreurs (en rouge), soit sous forme d'une absence d'erreurs (en blanc).

Deux exemples d'influence de la sérigraphie sur le taux d'erreurs BLER





5 ETUDE DU VIEILLISSEMENT SUR DIFFERENTES COLLECTIONS

5.1 VIEILLISSEMENT NATUREL

CD-R étudiés

Les données proviennent de trois collections de CD-R :

1. 68 CD-R gravés entre 2000 et 2002, issus d'essais réalisés au LNE,
2. 57 CD-R gravés entre 2004 et 2008, issus d'études réalisées au LNE,
3. 98 CD-R gravés entre 1994 et 2004, issus d'une collection privée.

Les CD-R issus d'essais ou études réalisées au LNE ont été conservés à température comprise entre 20 et 25°C, dans des boîtiers disposés dans des armoires et ont donc été peu exposés à la lumière. L'hygrométrie relative, bien que non régulée, était comprise entre 25 et 50%.

Les conditions de conservation des CD-R issus d'une collection privée étaient celles d'un appartement. L'exposition à la lumière était également réduite (stockage à l'intérieur d'un meuble).

Chaque ensemble comporte de nombreuses références de CD-R différentes. Des disques d'une même référence sont d'un même modèle et ont été approvisionnés simultanément tout au moins dans le cas des disques issus d'essais ou études réalisées au LNE. La première collection comporte 53 références différentes pour 68 disques, ce qui fait qu'une référence est souvent représentée par un seul disque. Cette collection représente assez bien l'offre de CD-R existant sur le marché entre 2000 et 2002. La deuxième collection comporte 21 références avec au moins 2 disques par référence. Enfin la troisième collection comporte 34 références dont près de la moitié ne sont représentées que par un seul disque.

Analyses réalisées

Pour les disques issus d'essais et études réalisées au LNE, on dispose d'analyses effectuées juste après gravure et d'analyses effectuées en 2009 ou 2010. Dans le cas de la première collection, on dispose en plus d'analyses effectuées en septembre 2003 et avril 2004.

Pour les disques issus de la collection privée on ne dispose que d'une série d'analyses faites en 2009 après vieillissement naturel sur 5 à 10 ans.

Rapports

Les analyses relatives aux collections N°1 et 3 ont fait l'objet de rapports disponibles sur le site Internet du LNE : http://www.lne.fr/fr/r_et_d/gis-don/conservation-donnees-numeriques-gis-don.asp

« Etude de la dégradation naturelle d'une collection de CD-R gravés entre 2000 et 2002 »
Jean-Michel LAMBERT - Octobre 2009 – Fiche R&D N° 2 02/2009

« Etat d'une collection de 98 CD-R gravés entre 1994 et 2004 »
Jean-Michel LAMBERT - Novembre 2009 – Fiche R&D N° 202/2009

Ces rapports décrivent de manière détaillée les disques et les références ainsi que toutes les analyses réalisées.

Les disques dégradés en terme d'erreurs numériques

Une majorité de CD-R fait apparaître peu ou pas d'évolution des taux d'erreur sur les durées de conservation concernées (entre 2 ans et plus de 10 ans). A contrario, certains CD-R montrent une évolution très importante avec des taux d'erreurs numériques élevés et éventuellement une perte partielle ou totale des données enregistrées. Le tableau de la page suivante fait un bilan des modèles présentant des dégradations significatives.

Vieillissement naturel - Disques dégradés en terme d'erreurs numériques

IDENTIFICATION DU CD		MODELE			DATE DE GRAVURE	AGE (ans)	DEGRADATION									
							NIVEAU	REPARTITION					TYPE			
Collection	N°	MARQUE	Code ATIP	Fabricant				BI	BE	BES	A	S	L	RC	MT	F
COLLECTION PRIVEE (1996 - 2002) 98 disques	60	Memorex	15 17	Ritek	2002	7	E									
	81	Hi Space	16 32	Grand Adv. Tech.	2000	9	D					X			**X**	
	14	Philips	24 01	Taiyo Yuden	1998	11	C			X						X
	17															
	53	Hi Space	24 24	Computer Support It	2002	7	B					X			X*	
	55						C									
	39	AMS	25 50	AMS Tech.	2000	9	B			X		X				
	45				2001	8	C		X							X
	29	?	26 40	Fuji	2000	9	C			X					**X**	
	99	Fuji	26 45	Fuji	2003	6	B		X							
	11	?	26 50	Lead Data	1997	12	C									
	12				1997	12										
	77				2002	7				X				X		
	82				1997	12										
	98				?	?										
	18	Rimax	26 50	Lead Data	1999	10	D									
	19				1999	10						X			**X**	
	31				2000	9										
	76	Memorex	26 66	CMC Magnetics	2001	8	D		X			X			**X**	
	83	Imation	26 66	CMC Magnetics	2000	9	B									
	47	Kodak	27 45	Kodak	2001	8	B									
	51								X							
	58	Kodak	27 46	Kodak	2002	7	B									
	22	Mitsui	27 55	Mitsui	1999	10	D									
	95	Sony	27 55	Mitsui	1999	10	B									
	33	Mitsui	27 56	Mitsui	2000	9	C			X					X	
	2	Master	31 00	Ritek	?	?	C			X		X		X	**X**	X
	92						B									
	89						E									
	26	FNAC	31 07	Ritek	2000	9	C									
	32	Traxdata	31 07	Ritek	2000	9	B		X							
	1	Verbatim	34 20	Mitsubishi	?	?	C			X						X
	20				1999	10	B									
	25				1999	10	C			X						
	79				?	?	B									
LNE (2000 - 2002) 68 disques	45	TDK	15 05	TDK	juin-02	6,8	B									
	34	MPO Hollande	23 61	Cust. Pres. Oost.	juil-02	6,8	B	X	X						X*	X
	35															
	36															
	37	Exel	24 24	Computer Support It	juil-00	8,8	C		X			X			**X**	
	20	MPO	25 07	MPO	mai-02	6,9	C			X						X
	21															
	23	Hi Space	25 07	MPO	déc-02	6,3	C				X	X			**X**	X
	38	Silver Pro	26 40	Fuji	juil-00	8,8	B				X	X			X	X
	39						C									
	13	Basf	26 60	CMC Magnetics	oct-00	8,5	B	X								
	14	Mitsui	27 57	Mitsui	mai-02	6,9	C		X			X			**X**	
	42	Acer	28 12	Gigastorage	oct-00	8,5	B			X			X			
	41	Sun	28 26	Multi media	juil-00	8,8	B			X		X				
	27	Verbatim	34 23	Mitsubishi	janv-03	6,3	B	X								
LNE (2004 - 2008) 57 disques	33	Hi Space	00 06	Moser Baer	mars-04	5,7	B					X				
	31	Think Xtra	16 29	Shenzehn	mars-04	5,7	B					X				
	53	Fnac	24 26	Computer Support It	mars-04	5,7	B						X			
	56	Auchan	25 07	MPO	mars-04	5,7	B			X		X				
	29	Xeo	27 19	Plasmon	mars-04	5,7	C					X	X			

Niveaux de dégradation

- B Dégradation légère ou amorce de dégradation
- C Dégradation importante avec E32 limités à une portion du disque
- D Dégradation importante avec E32 sur la totalité du disque
- E Disque non lisible

Répartition de la dégradation

- BI A partir du bord interne
- BE A partir du bord externe
- BES A partir du bord externe, limité à des secteurs
- A Anneaux de dégradation
- S Influence visible de la sérigraphie du dos du disque

Types de dégradation

- L Défauts localisés
- RC Diminution de réflectivité et de contraste
- MT Micro-taches sombres ou claires (*) - Noté en gras si les taches sont visibles au microscope
- F Fluctuations de réflectivité

En 2009, la proportion des disques dégradés (niveau B ou plus) ou fortement dégradés (niveau C ou plus) est différente selon les collections :

Collection privée	(1996 – 2002) :	35%	de disques dégradés	23%	de disques fortement dégradés
Collection LNE	(2000 – 2002) :	22%	de disques dégradés	9%	de disques fortement dégradés
Collection LNE	(2004 – 2008) :	9%	de disques dégradés	2%	de disques fortement dégradés

On note que les collections de CD-R les plus âgées ont des taux de disques défectueux plus élevés. Cependant il n'est pas possible de savoir si cela est dû à l'âge des disques, à l'évolution en qualité des modèles de CD-R ou à la sélection des modèles faites pour la constitution de chaque collection. On peut retenir que la dégradation sévère de CD-R ayant une dizaine d'années n'est pas un phénomène rare.

La répartition des dégradations à la surface des disques est dans les proportions suivantes :

Dégradation à partir du bord interne :	9%
Dégradation à partir du bord externe :	23%
Idem mais limitées à des secteurs :	34%
Dégradation sur un ou plusieurs anneaux :	6%
Influence de la sérigraphie du dos du disque :	43%

La somme de ces pourcentages est supérieure à 100% car un même disque peut être concerné par plus d'un critère. Pour plus de 40% des disques dégradés, les inscriptions sur le dos du disque (sérigraphie) sont visibles sur les représentations de surface des erreurs. Cela ne signifie pas que la sérigraphie soit à l'origine des dégradations, mais elle interfère avec le phénomène de dégradation en amplifiant les taux d'erreurs sur certaines zones.

Les dégradations à partir du bord externe, qu'elles soient généralisées sur le pourtour ou limitées à un secteur du disque sont très fréquentes (plus de 50% des disques dégradés). On peut suspecter que le bon maintient des couches fonctionnelles (métallisation, dye) sur le polycarbonate par le vernis du dos du disque joue un rôle important. Ainsi un défaut d'adhérence de ce vernis sur le bord externe pourrait être à l'origine d'une majorité des dégradations sévères des CD-R.

Les types de dégradation se répartissent comme suit :

Décollement de couches :	0%
Défauts localisés :	9%
Diminution de réflectivité et de contraste :	6%
Micro-taches :	29%
Fluctuations de réflectivité :	23%

La somme de ces pourcentages est inférieure à 100% car il n'a pas toujours été possible d'identifier le type de dégradation selon l'un des quatre critères. On retiendra que les micro-taches concernent presque un tiers des dégradations. Il s'agit, dans la plupart des cas, de micro-taches sombres, qui sont plus facilement détectables sur les lands que sur les pits.

<u>L'évolution des paramètres du signal optique</u>

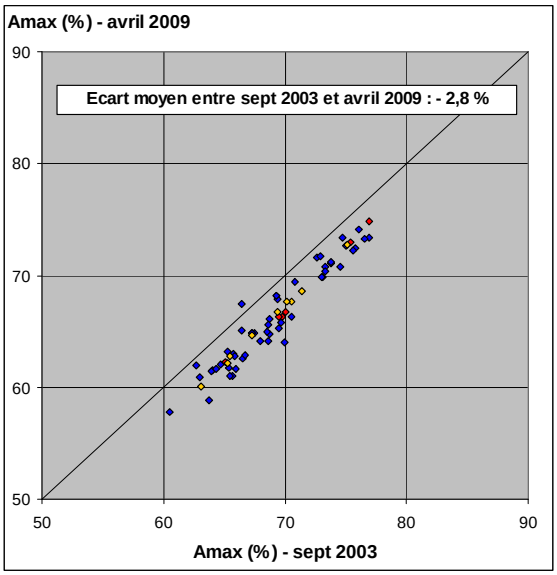
Les graphes de la page suivante montrent l'évolution globale des paramètres A_{max}, A_{min}, **I11R, I3R, SYM et DD Jitter**. Sur chaque graphique on a porté en abscisses les valeurs de ces paramètres peu de temps après la gravure et en ordonnée les valeurs mesurées après un laps de temps de l'ordre de 6 ans. Chaque point représente un disque. Ses coordonnées représentent une moyenne sur l'ensemble du disque. Un point situé au-dessus de la diagonale correspond à une augmentation du paramètre, un point situé en-dessous à une diminution. Les disques pris en compte sont la totalité des collections 1 et 2.

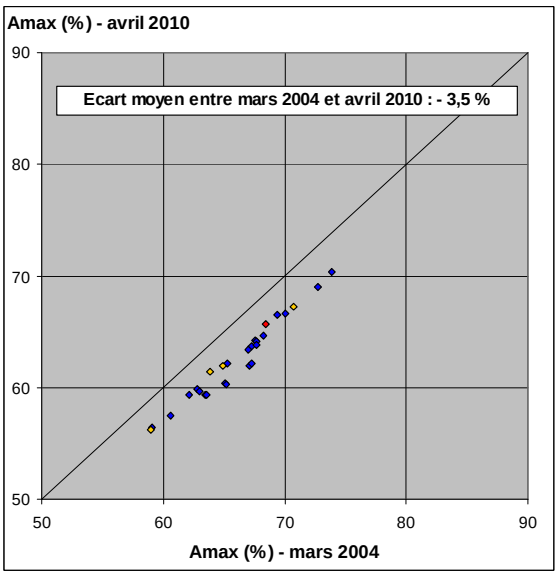
Les disques significativement dégradés en terme d'erreurs numériques sont représentés par des points jaunes (dégradation légère) ou rouges (dégradations importantes).

Variation des paramètres du signal optique sur une durée de 6 ans de vieillissement naturel

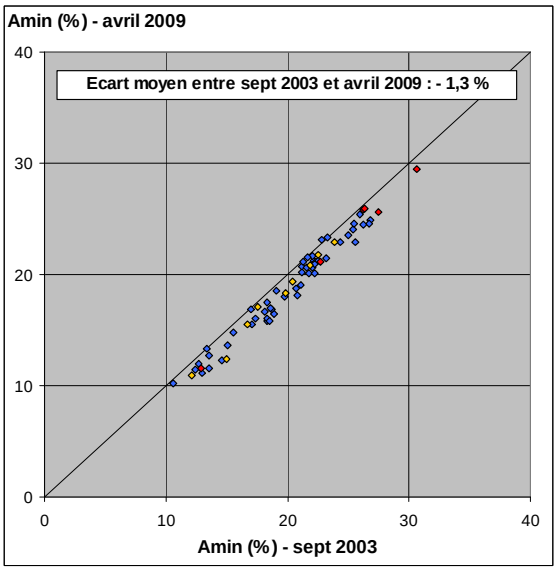
68 CD-R gravés entre 2000 et 2002 — *27 CD-R gravés en mars 2004*

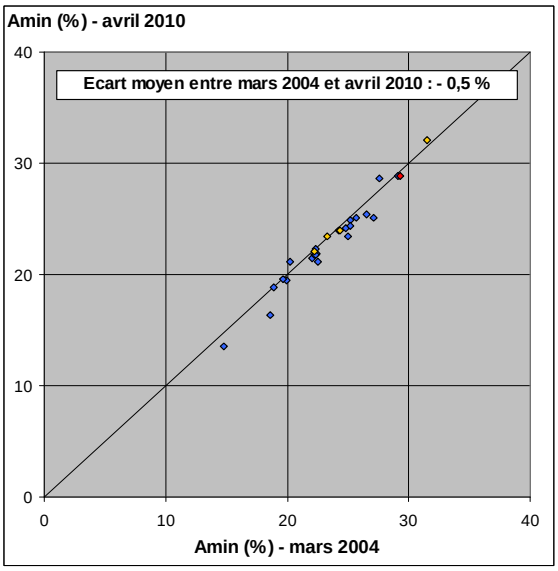
Amax



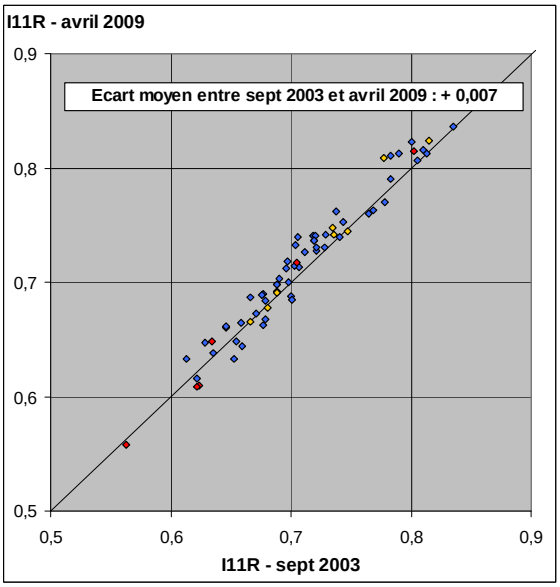


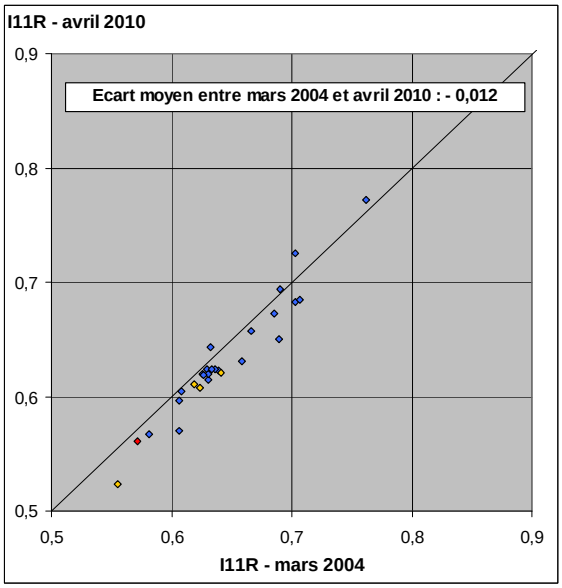
Amin





I11R

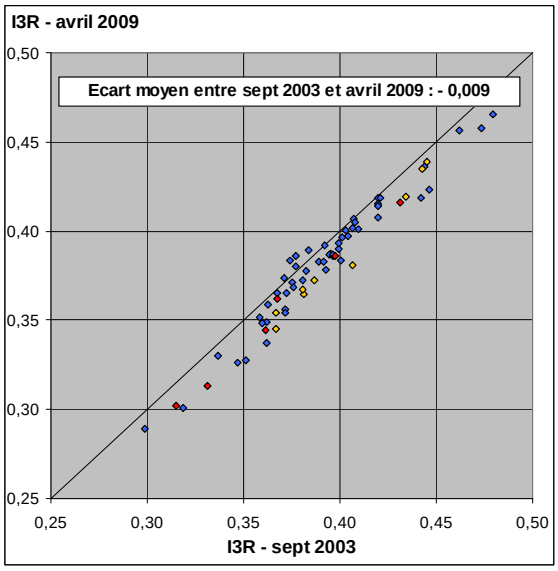


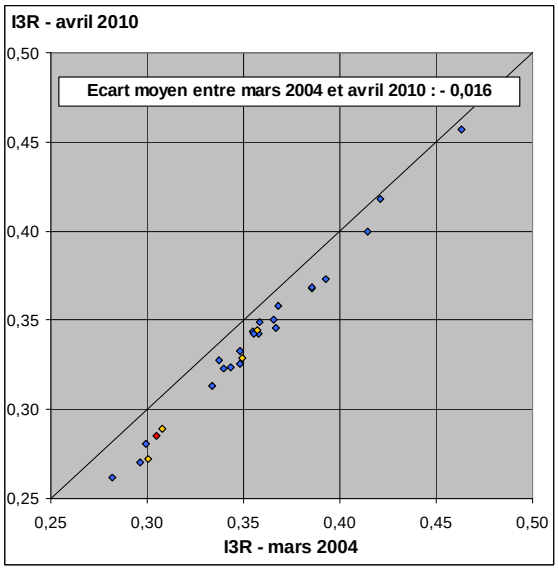


Variation des paramètres du signal optique sur une durée de 6 ans (suite)

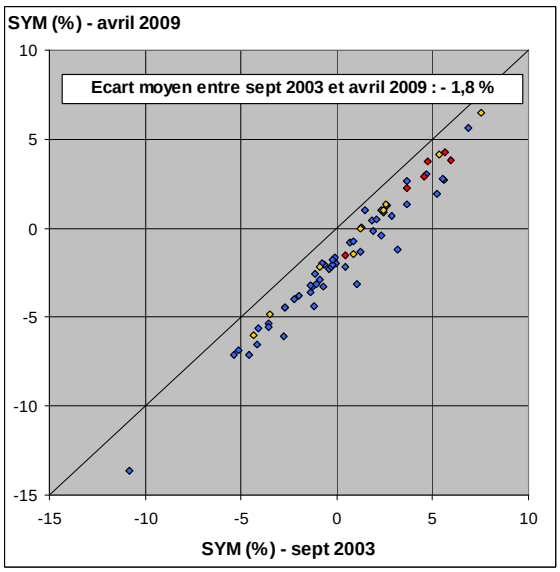
68 CD-R gravés entre 2000 et 2002 *27 CD-R gravés en 2004*

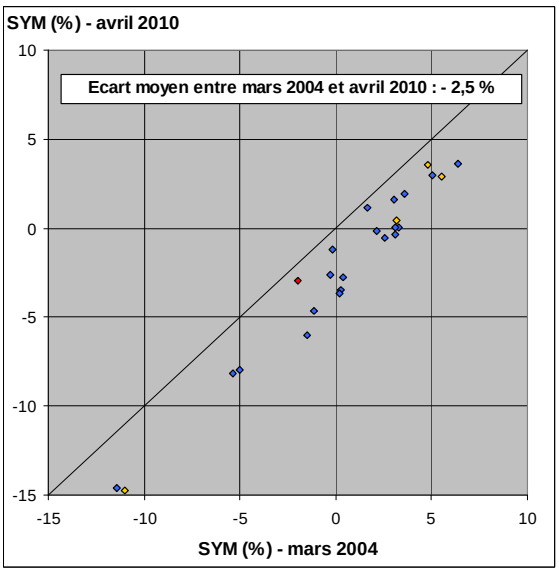
I3R



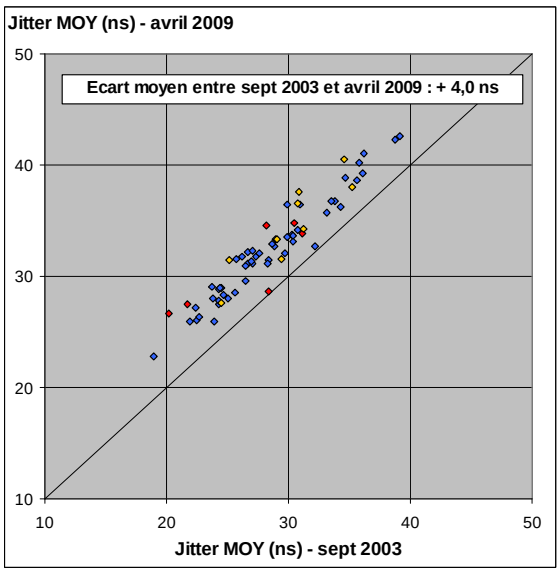


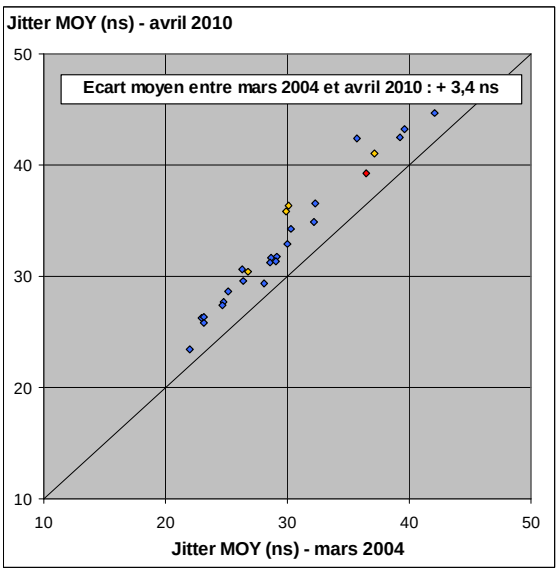
SYM





DD jitter





Les évolutions observées sur 6 ans de vieillissement naturel sont similaires pour les deux collections de disques. Dans chaque collection, l'évolution des paramètres est assez homogène. Les disques dégradés en terme d'erreurs numériques (points jaunes et rouges) ne se distinguent pas des disques ne présentant pas de dégradation numérique significative.

On note les points suivants :

- Une baisse moyenne du niveau de réflectivité des zones non gravées (Amax) d'environ 3% du niveau de réflectivité de référence, ce qui correspond à une baisse d'environ 4% en valeur relative.
- Une baisse moyenne du niveau de réflectivité des zones gravées (Amin) d'environ 1% du niveau de réflectivité de référence, ce qui correspond également à une baisse d'environ 4% en valeur relative.
- Le contraste relatif I11R des zones gravées et non gravées est pratiquement inchangé.
- Le paramètre de symétrie (SYM) subit une baisse d'environ 2%.
- Le jitter global sur les longueurs des lands et des pits (Jitter MOY) augmente de 3,5 ns soit d'environ 10% en valeur relative .

Les évolutions moyennes de tous les disques vont dans le sens d'un assombrissement à la fois des zones gravées (pits) et des zones non gravées (lands). On pourrait penser que cet assombrissement est dû au polycarbonate qui perdrait de sa transparence au cours du temps ou à la couche métallique qui deviendrait moins réfléchissante. Cependant ces deux phénomènes ne devraient pas faire varier le paramètre de symétrie. La baisse du paramètre SYM observée pour tous les disques indique une différence de comportement des zones gravées et non gravées. Le signal optique a tendance à se tasser vers le bas, ce qui s'explique si les zones non gravées (lands) sont plus affectées par le vieillissement que les zones gravées (pits).

Ces caractéristiques de vieillissement, qui concernent de manière similaire à peu près tous les disques, se rapprochent de celles du type RC. La différence est d'abord dans l'amplitude de la dégradation qui reste faible : la baisse de réflectivité des zones non gravées n'excède pas 5% (3% en moyenne), alors que les dégradations de type RC observées en vieillissement accéléré présentent une diminution de réflectivité pouvant dépasser 10 ou 15%. La durée d'étude de 6 ans est sans doute insuffisante pour atteindre le seuil de déclenchement des erreurs numériques.

La diminution d'amplitude et de contraste du signal optique semble trop faible pour expliquer l'augmentation significative du jitter. Cette augmentation pourrait refléter aussi une dégradation dans l'homogénéité de la réflectivité à une échelle microscopique (dégradation de type F).

Une autre différence avec la dégradation de type RC est la baisse systématique du paramètre SYM, alors que la dégradation de type RC fait assez souvent apparaître une augmentation de ce paramètre.

5.2 VIEILLISSEMENT ACCELERE EN ETUVE

CD-R étudiés

Les données proviennent de trois études et essais réalisés au LNE :

(1) – Essai comparatif réalisé en 2004 portant sur 15 modèles de CD-R
(2) – Etude pour la Direction des archives de France réalisée en 2006 sur 7 modèles de CD-R
(3) - Etude pour la Direction des archives de France réalisée en 2008 sur 8 modèles de CD-R

Conditions du vieillissement

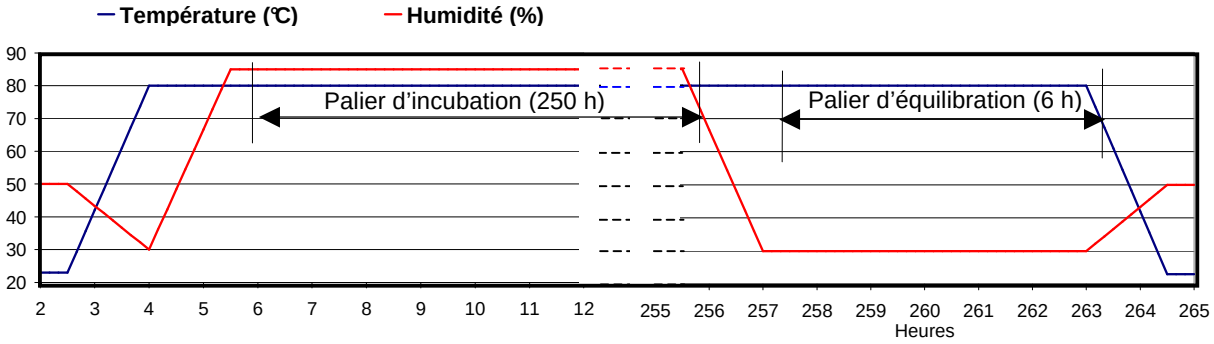
Le vieillissement accéléré est réalisé dans une enceinte climatique à température et hygrométrie contrôlées. Les conditions étaient les suivantes :

(1) -	Température 60°C	Hygrométrie relative 85%	Du rée maximale : 128 jours
(2) -	Température 80°C	Hygrométrie relative 85%	Du rée maximale : 30 jours
(3) -	Température 80°C	Hygrométrie relative 85%	Du rée maximale : 62 jours (1500 h)

Dans chaque cas, des analyses intermédiaires sont réalisées pour suivre l'état des disques. Le passage en température et hygrométrie élevées est fait progressivement. Il en est de même du retour aux conditions ambiantes avant chaque analyse. Les cycles utilisés sont conformes à ceux décrits dans la norme ISO 18927 : 2002 « Méthode pour l'estimation de la durée de vie des CD-R basée sur les effets de la température et de l'hygrométrie relative ».

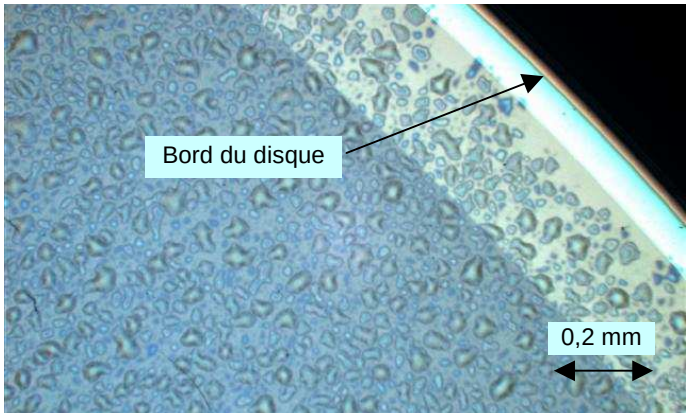
Le graphique ci-dessous montre l'évolution de la température et du degré hygrométrique pour un cycle de 250 heures à 80°C et 85% d'humidité.

Cycle Température-Hygrométrie pour une exposition de 250 heure à 80°C et 85% d'humidité



Le palier d'équilibration en fin de cycle permet l'évacuation des molécules d'eau piégées dans le polycarbonate, avant le retour à la température ambiante. Si ce palier n'est pas effectué ou si sa durée est insuffisante, des bulles d'eau peuvent se former à l'intérieur du polycarbonate, souvent au contact de la couche sensible. Un exemple de telles bulles est présenté sur la photographie ci-dessous.

Photographie de bulles d'eau piégées dans le polycarbonate, en l'absence de palier d'équilibration



Rapports

L'étude (2) a fait l'objet d'un rapport LNE :
« Qualité des disques optiques enregistrables disponibles sur le marché pour l'archivage des données numériques » JM LAMBERT – J Perdereau – Décembre 2006 – G010665 / C431X06

L'étude (3) a fait l'objet d'un rapport accessible sur le site Internet du LNE :
« Qualité des CD-R disponibles sur le marché pour l'archivage des données numériques »
Jean-Michel LAMBERT – Jacques Perdereau - Juillet 2008 – C431X07
http://www.lne.fr/publications/recherche/etude-qualite-CD-R.pdf

Ces rapports décrivent en particulier les essais de vieillissement accéléré en étuve.

Une étude complémentaire de vieillissement accéléré a été réalisée sur deux des références ayant montré une dégradation importante lors de l'étude (2). Ce complément d'étude a fait l'objet d'un rapport interne, accessible sur le site Internet du LNE :

« Etude du vieillissement en conditions climatiques sévères de 2 références de CD-R »
Jean-Michel LAMBERT - Avril 2007 – Fiche R&D N° 202 /2005
http://www.lne.fr/publications/recherche/etude-vieillissement-CD-R.pdf

Résultats pour les modèles de CD-R ayant une dégradation importante en fin d'exposition

Certains disques présentent une dégradation faible ou peu significative en fin d'essai, alors que d'autres présentent des taux d'erreurs numériques élevés. Les dégradations des 8 modèles fortement dégradés (sur un total de 30 modèles) sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Vieillissement accéléré en étuve –Caractéristiques des dégradations

ETUDE	MODELE DE CD-R				DUREE pour une dégradation		NATURE DE LA DEGRADATION									
							REPARTITION					TYPE				
	MARQUE	Code ATIP	Fabricant	Imprimable jet d'encre	significative	avec E32	BI	BE	BES	A	S	D	L	RC	MT	F
(1) - ESSAI COMPARATIF Exposition : 16 - 32 - 48 - 64 - 96 - 128 jours 60°C - 85%RH	Hi Space	00 06	Moser Baer		32 jours	64 jours							X			
	TDK	15 06	TDK		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Maxell	15 17	Ritek		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ThinkXtra	16 19	Shenzehn		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Imation	17 06	Moser Baer		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mémorex	17 06	Moser Baer		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mmore	17 06	Moser Baer		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Surcouf	22 67	Daxon		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sony	24 16	Sony		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bluesky	24 26	Computer Support It.		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	FNAC	24 26	Computer Support It.		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Auchan	25 07	MPO		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Xeo	27 19	Plasmon data sys.		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verbatim	34 23	Mitsubishi		96 jours	128 jours		X			X			X		X
	Philips	43 37	?		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
(2) - DAF 2006 10 - 15 - 20 - 30 jours 80°C - 85%RH	TDK	15 05	TDK		10 jours	15 jours		X			X				X	
	Fujifilm	22 67	Daxon Technologies		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Taiyo Yuden	24 01	Taiyo Yuden	X	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Sony	24 16	Sony		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MPO	25 07	MPO		---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MAM-E	27 56	Mitsui	X	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verbatim	34 23	Mitsubishi		10 jours	15 jours		X			X			X		X
(3) - DAF 2008 10 - 21 - 31 - 42 - 52 - 62 jours 80°C - 85%RH	Falcon Media	15 05	Falcon Technologie		21 jours	52 jours		X								X
	Kodak	17 06	Moser Baer	X	21 jours	31 jours	X	X					X			X
	Sony	24 16	Sony	X	10 jours	20 jours	X	X		X					X	X
	MPO	25 07	MPO	X	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fujifilm	26 26	SKC		---	10 jours						X				
	Fujifilm (pro)	26 45	Fuji	X	10 jours	10 jours										
	Delkin	27 58	Mitsui	X	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verbatim (Medi)	34 23	Mitsubishi		10 jours	21 jours	X	X		X				X		X

La proportion de modèles à forte dégradation en fin d'essai est plus importante dans les études (2) et surtout (3) que dans l'essai (1), en raisons des conditions d'essai plus sévères (80°C au lieu de 60°C).

Lors de l'étude (3), tous les échantillons du modèle Fujifilm pro de code 2645 étaient illisibles après le premier palier de 10 jours. En l'absence d'analyse, on n'a aucune information sur les caractéristiques de la dégradation. Les échantillons du modèle Fujifilm de code 2626 ont présenté un décollement de la couche de vernis du dos du disque. Bien que ce décollement n'ait pas entraîné celui de la couche métallique, les disques sont illisibles sur les parties décollées. Le décollement s'est produit dès 10 jours sur certains disques, alors que d'autres n'étaient pratiquement pas atteints au bout de 62 jours.

Le modèle Verbatim (code 3423) est représenté dans chacun des trois essais, la référence des disques n'étant toutefois pas la même (approvisionnements différents). On constate une dégradation importante, de même type dans les 3 cas. Pour les essais (2) et (3) à 80°C les durées pour l'obtention d'une dégradation significative sont identiques (10 jours). Pour l'essai (1) à 60°C, cette durée atteint 96 jours. Le facteur d'accélération à 80°C est donc presque 10 fois plus important qu'à 60°C. Ce résultat semble indiquer que pour un même taux d'hygrométrie relative (85%), l'accélération dépend fortement de la température.

Concernant la répartition de la dégradation sur la surface des disques, on retrouve, comme en vieillissement naturel, une proportion importante de disques se dégradant à partir du bord externe.

<u>L'évolution des paramètres du signal optique</u>

Les graphes de la page suivante montrent l'évolution globale des paramètres A_{max}, A_{min}, **I11R, I3R, SYM et DD Jitter**. Sur chaque graphique on a porté en abscisses les valeurs de ces paramètres peu de temps après la gravure et en ordonnée les valeurs mesurées après une exposition de 128 jours à 60°C (disques de l'essai 1) ou de 20 jours à 80°C (disques des essais 2 et 3).

On a représenté la totalité des disques. Les points rouges correspondent aux disques présentant des erreurs de type E32 à 128 jours (essai 1) ou à 20 jours (essais 2 et 3). Les points jaunes correspondent aux disques ayant une dégradation numérique significative mais sans erreur E32.

Les évolutions observées sont plus ou moins similaires pour les deux ensembles de disques, des disques à très forte évolution étant un peu plus nombreux pour l'exposition de 20 jours à 80°C que pour l'exposition de 128 jours à 60°C. Les évolutions les plus importantes correspondent à des disques avec dégradation numérique significative. Toutefois certains disques à forte dégradation numérique ne présentent pas ou peu d'évolutions des paramètres du signal optique.

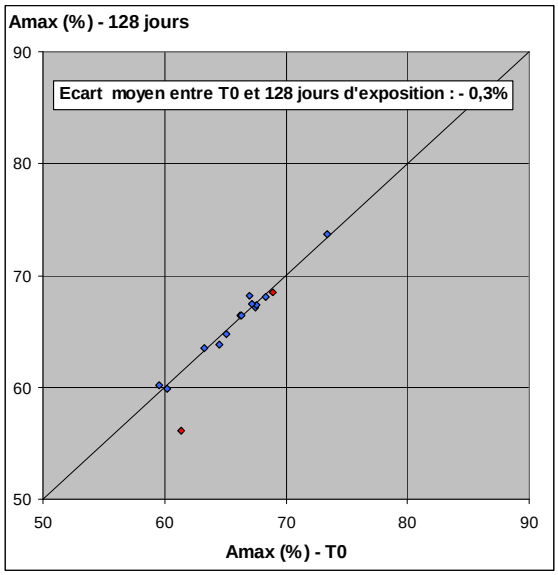
On note les points suivants :

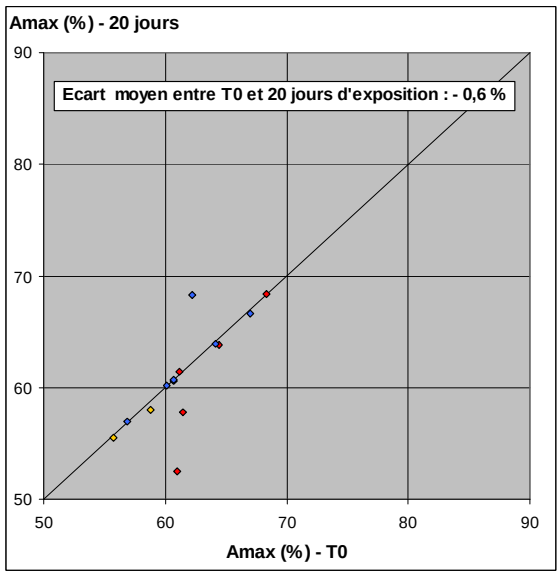
- Sauf exception, le niveau de réflectivité des zones non gravées (Amax) reste quasiment stable.
- Le niveau de réflectivité des zones gravées (Amin) présente une légère augmentation (éclaircissement) qui est, en moyenne, de 1 à 2% du niveau de réflectivité de référence.
- Le contrastes relatif I11R des zones gravées et non gravées subit pour certains disques une baisse importante.
- Le paramètre de symétrie (SYM) subit une baisse pour la plupart des disques (-1% en moyenne).
- Le jitter global (Jitter MOY) varie peu pour la plupart des disques. Parmi les disques ayant des taux d'erreurs élevés, on observe généralement une augmentation importante du jitter.

Variation des paramètres du signal optique (vieillissement en étuve)

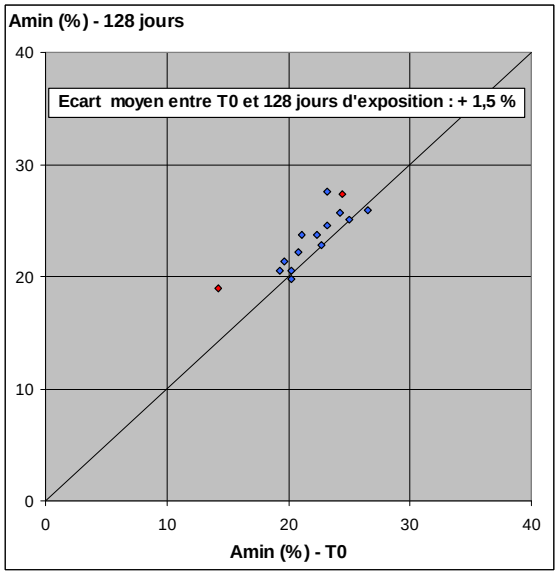
15 CD-R vieillis 128 jours à 60°C et 85%RH *14 CD-R vieillis 21 jours à 80°C et 85%RH*

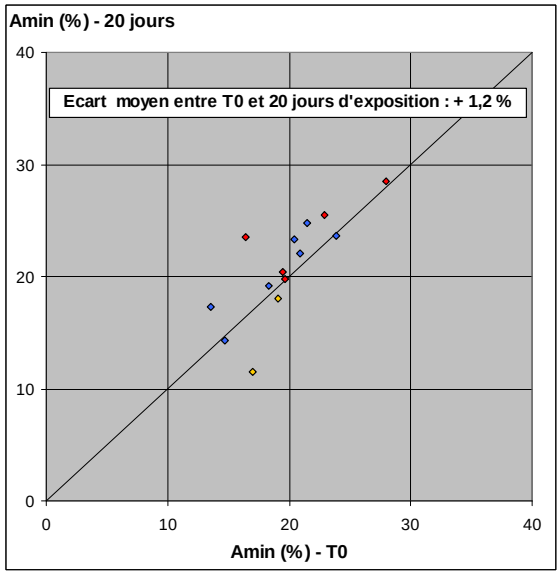
Amax



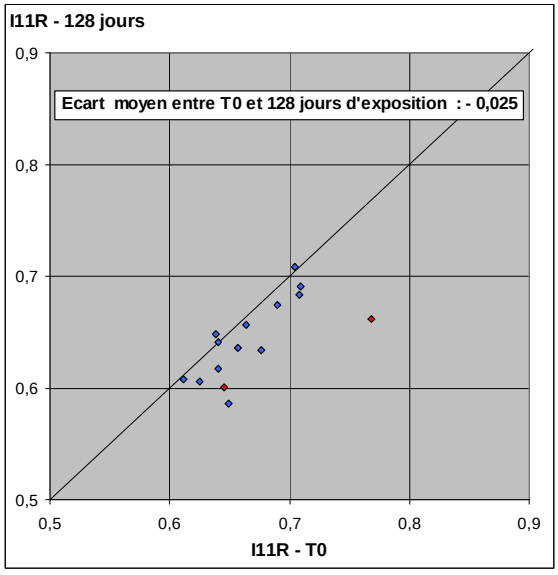


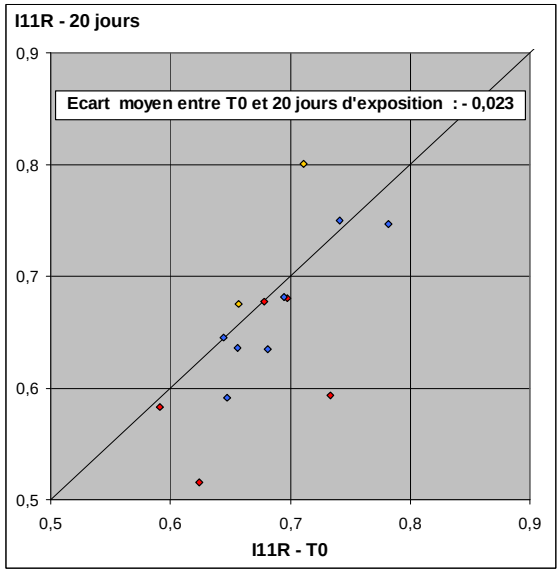
Amin





I11R

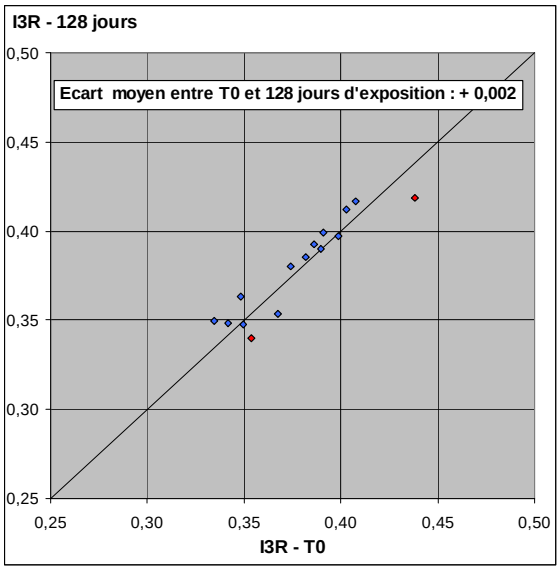


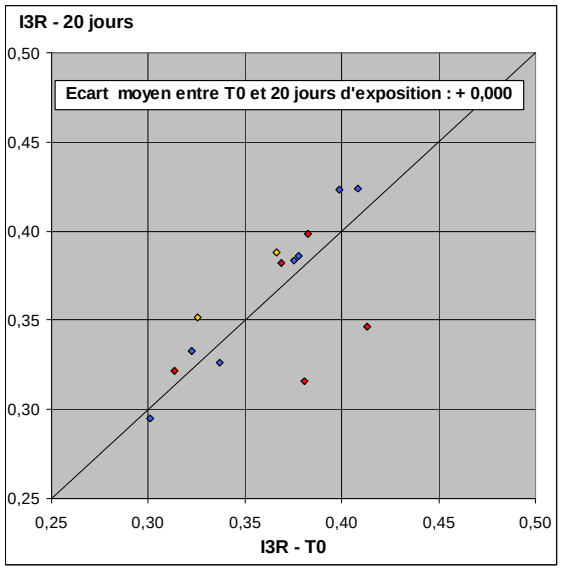


Variation des paramètres du signal optique (vieillissement en étuve)

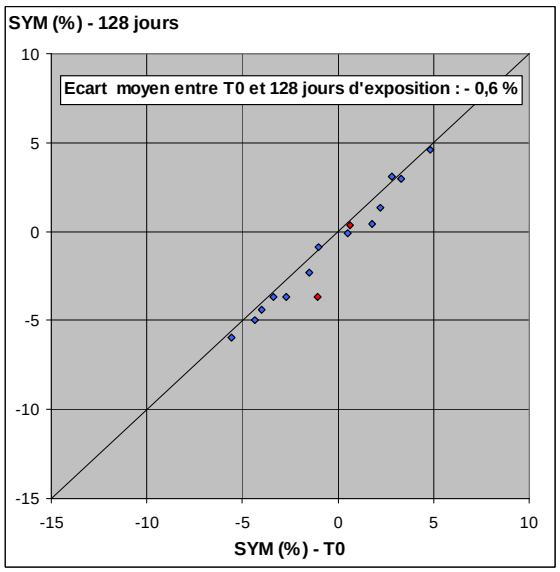
15 CD-R vieillis 128 jours à 60°C et 85%RH | *14 CD-R vieillis 21 jours à 80°C et 85%RH*

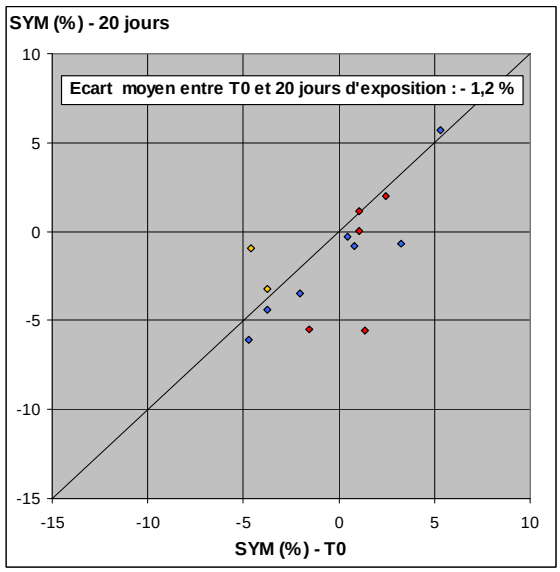
I3R



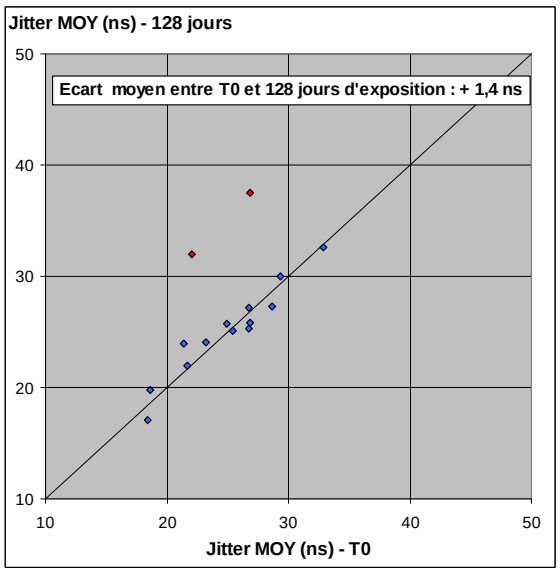


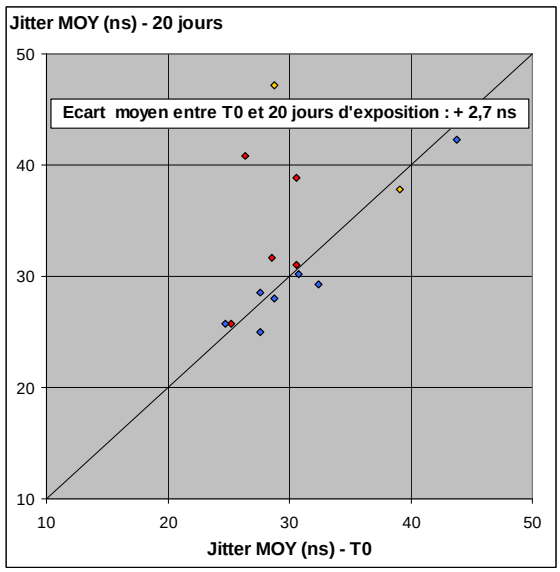
SYM





DD jitter





5.3 VIEILLISSEMENT EN LUMIERE ARTIFICIELLE INTENSE

CD-R étudiés

Les données proviennent de l'essai comparatif (1) réalisé en 2004 et portant sur 15 modèles de CD-R. Un disque par modèle a été soumis au vieillissement à la lumière.

Conditions du vieillissement

Le vieillissement accéléré est réalisé dans une enceinte Suntest modèle XLS fabriquée par la société Atlas. Cet appareil est équipé d'une lampe à arc au xénon de 2200 W. Des filtres IR et UV sont utilisés pour que le spectre de la lumière se rapproche au mieux du spectre solaire filtré par une vitre, comme c'est le cas à l'intérieur des locaux.

Appareil Suntest pour essai en lumière artificielle intense

L'éclairement des disques peut être réglé entre 250 et 765 W/m^2 (énergie sur la bande de longueurs d'onde 300-800 nm). Les disques étudiés ont été soumis à un éclairement de 250 W/m^2 pendant 198 h, soit environ 8 jours.

Analyses réalisées

Pour suivre l'état des disques, des analyses ont été réalisées avant exposition, puis après 6 ,30 , 102 et 198 heures d'exposition.

Les disques dégradés en terme d'erreurs numériques

La nature des dégradations des disques significativement dégradés est indiquée dans le tableau de la page suivante.

Sur les 15 modèles de CD-R, seulement 2 modèles (Surcouf et Verbatim) présentent une dégradation significative en terme d'erreurs numériques après 198 heures d'exposition. Dans les deux cas, la dégradation est localisée près du bord externe du disque sur un secteur assez large.

Pour le modèle Surcouf, on a à la fois une baisse de contraste pits / lands importante (dégradation de type RC) et des fluctuations de réflectivité (dégradation de type F).

Le modèle Verbatim ne fait apparaître de réduction signigicative du contraste pits / lands. On observe un éclaircissement du début des pits 11T (micro-taches claires). L'éclaircissement ne se produit pas à la fin des pits 11T, ce qui fait que le paramètre A_{min} n'est pas affecté.

Vieillissement accéléré à la lumière –Caractéristiques des dégradations

ETUDE	MODELE DE CD-R			DUREE pour une dégradation		NATURE DE LA DEGRADATION									
						REPARTITION					TYPE				
	MARQUE	Code ATIP	Fabricant	significative	avec E32	BI	BE	BES	A	S	D	L	RC	MT	F
(1) - ESSAI COMPARATIF Exposition : 6 - 30 - 102 - 198 heures Eclairement 250 W / m2	Hi Space	00 06	Moser Baer	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TDK	15 06	TDK	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Maxell	15 17	Ritek	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ThinkXtra	16 19	Shenzehn	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Imation	17 06	Moser Baer	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mémorex	17 06	Moser Baer	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Mmore	17 06	Moser Baer	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Surcouf	22 67	Daxon	198 heures	---	-	-	X	-	-	-	-	X	-	X
	Sony	24 16	Sony	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Bluesky	24 26	Computer Support lt.	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	FNAC	24 26	Computer Support lt.	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Auchan	25 07	MPO	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Xeo	27 19	Plasmon data sys.	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Verbatim	34 23	Mitsubishi	198 heures	---	-	-	X	-	-	-	-	-	X*	X
	Philips	43 37	?	---	---	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

L'évolution des paramètres du signal optique

Les graphes des deux pages suivantes montrent la variation des paramètres moyens A_{max}, A_{min}, **I11R, I3R, SYM et DD Jitter** après exposition à la lumière sur une durée de 4 jours (102 heures) et 8 jours (198 heures). A l'exception de deux modèles (Hi Space et Verbatim), on constate une variation des paramètres d'amplitude et de contraste du signal optique avec :

- une baisse de la réflectivité des lands (Amax) pouvant atteindre, après 8 jours d'exposition, 10% de la réflectivité de référence pour certains disques (-6,7% en moyenne),
- une légère augmentation de la réflectivité des pits (Amin) (en moyenne +1,2 % de la réflectivité de référence),
- une baisse du contrastes (I11R et I3R) entraînée à la fois par la baisse de réflectivité des lands et la hausse de réflectivité des pits,
- une légère augmentation du paramètre de symétrie (SYM) qui ne se manifeste qu'au delà de 4 jours d'exposition.

Le jitter est assez peu impacté par le vieillissement à la lumière, sauf pour deux modèles (Bluesky et Fnac).

Les deux modèles dont les paramètres d'amplitude sont stables ont les particularités suivantes :

- Le modèle Verbatim est le seul modèle à couche sensible de type azoïque, tous les autres modèles ayant une couche de type phtalocyanine.
- Le substrat du modèle Hi Space (« Black Devil ») est constitué de polycarbonate teinté lui donnant un aspect complètement noir. Cela permet une protection de la couche sensible vis à vis de la lumière dans la gamme des longueurs d'onde inférieures à celle du laser.

L'évolution des paramètres A_{max}, A_{min}, **I11R, I3R** est représentée, pour chaque disque, en fonction de la durée d'exposition sur les graphes de la page 42. Il s'agit d'une évolution relative, l'accroissement relatif du paramètre P étant calculé selon la formule :

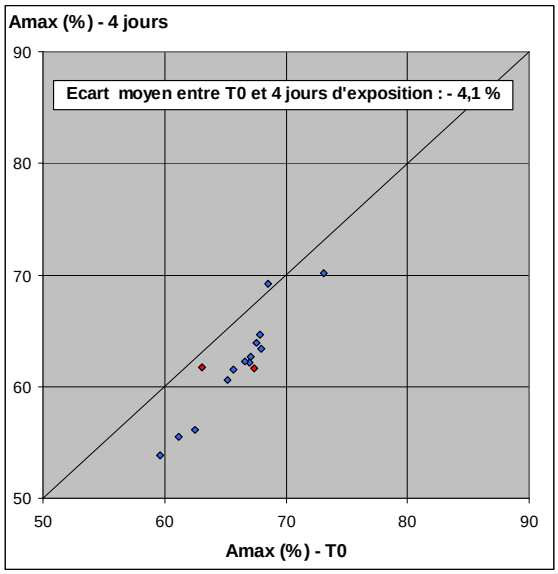
$$\Delta\,(\%) = \frac{P - P_O}{P_O} \times 100 \text{ où } P_O \text{ est la valeur initiale et } P \text{ la valeur après exposition}$$

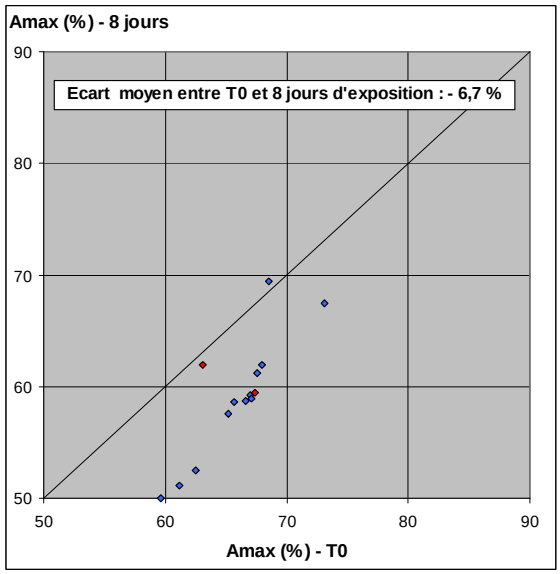
Pour tous les modèles, on constate une évolution des amplitudes et du contraste qui est sensiblement proportionnelle à la durée d'exposition. Par contre la pente est différente selon les modèles. Les deux modèles dont le jitter augmente fortement (Bluesky et Fnac) sont ceux pour lesquels la baisse relative du contraste I3R est la plus élevée.

Variation des paramètres du signal optique (vieillissement à la lumière)

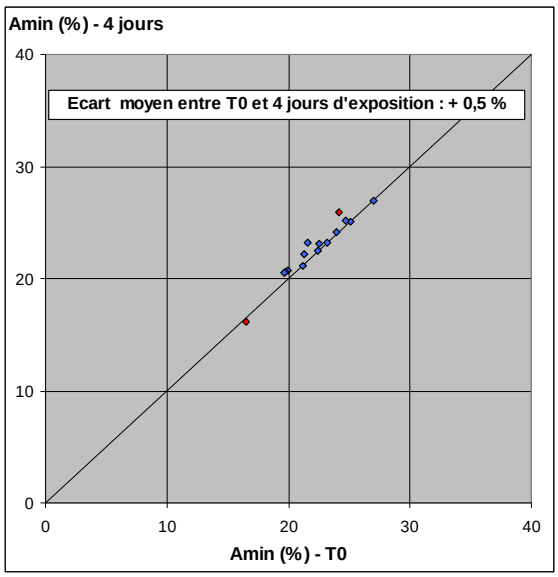
15 CD-R vieillis 4 jours à 250 W/m² *15 CD-R vieillis 8 jours à 250 W/m²*

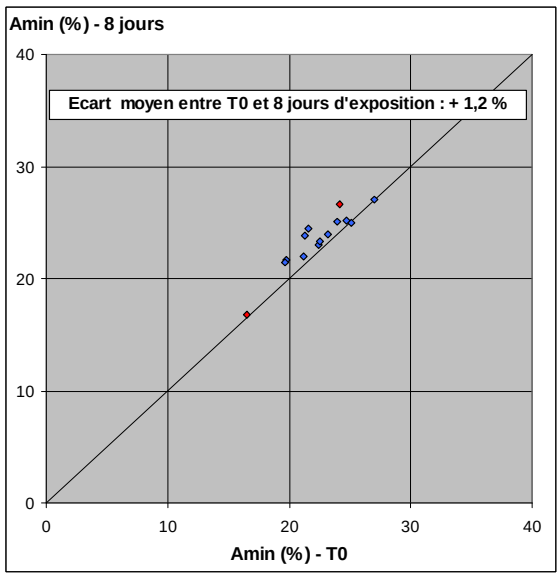
Amax



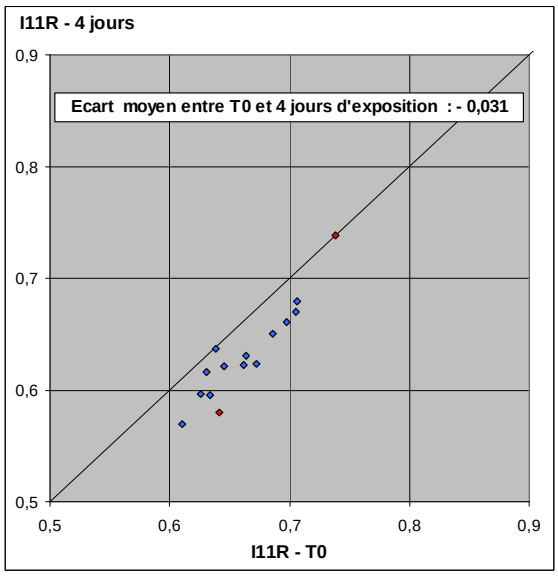


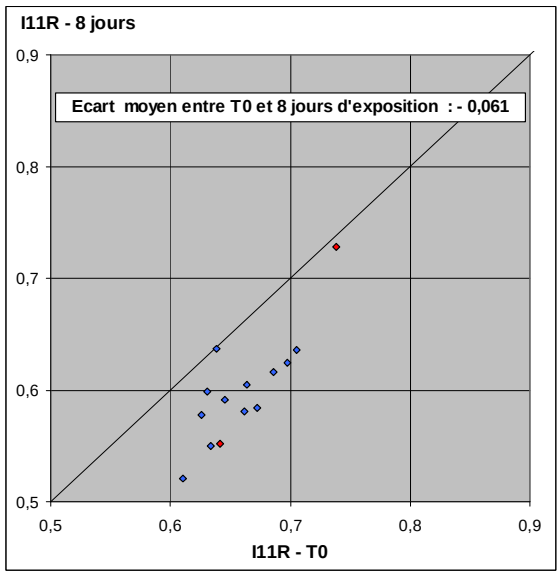
Amin





I11R

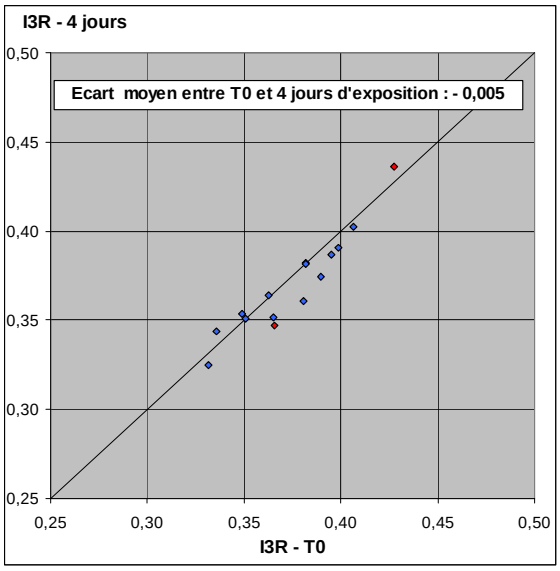


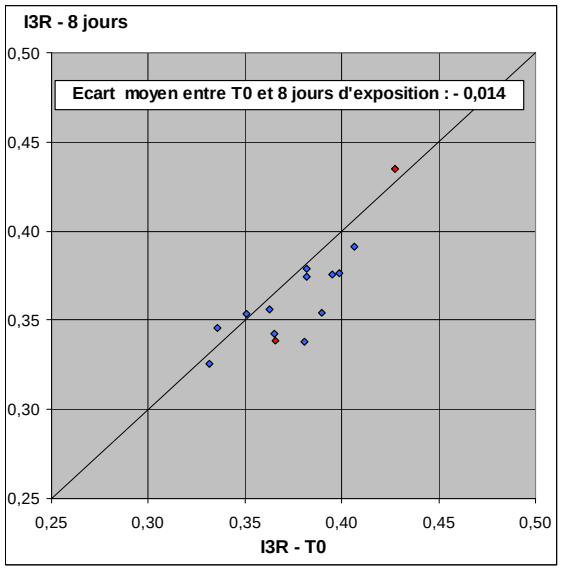


Variation des paramètres du signal optique (vieillissement à la lumière)

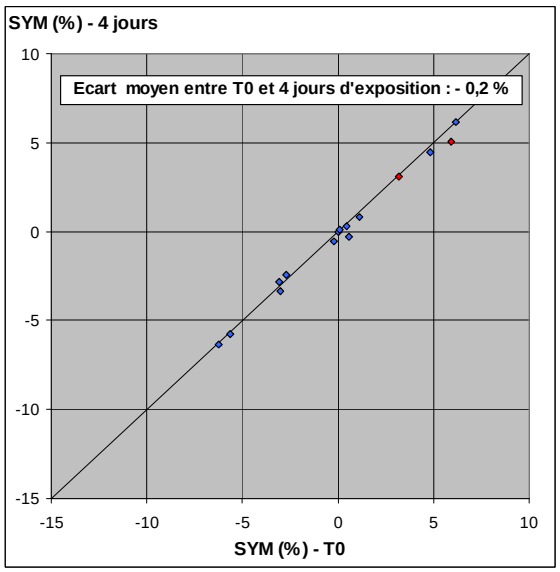
15 CD-R vieillis 4 jours à 250 W/m² *15 CD-R vieillis 8 jours à 250 W/m²*

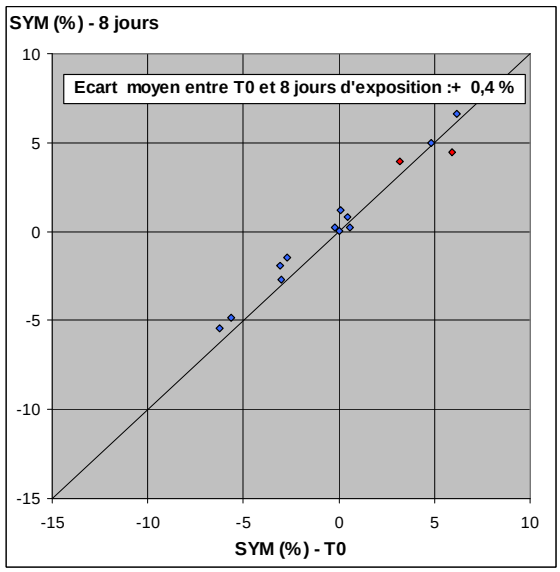
I3R



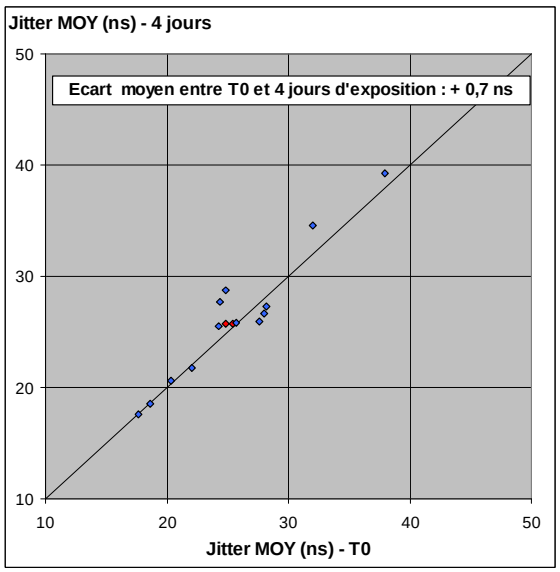


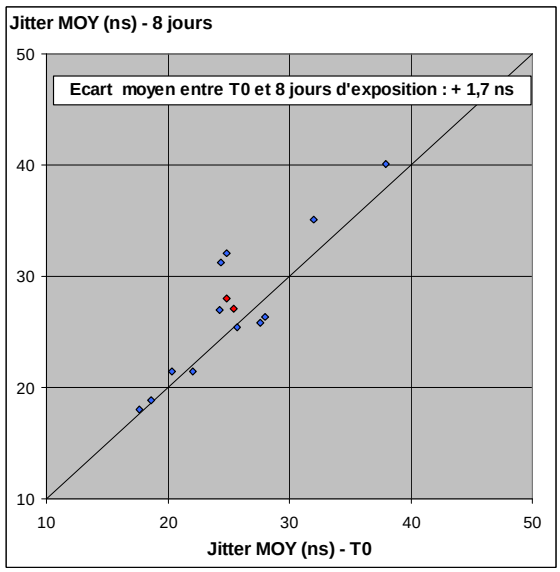
SYM



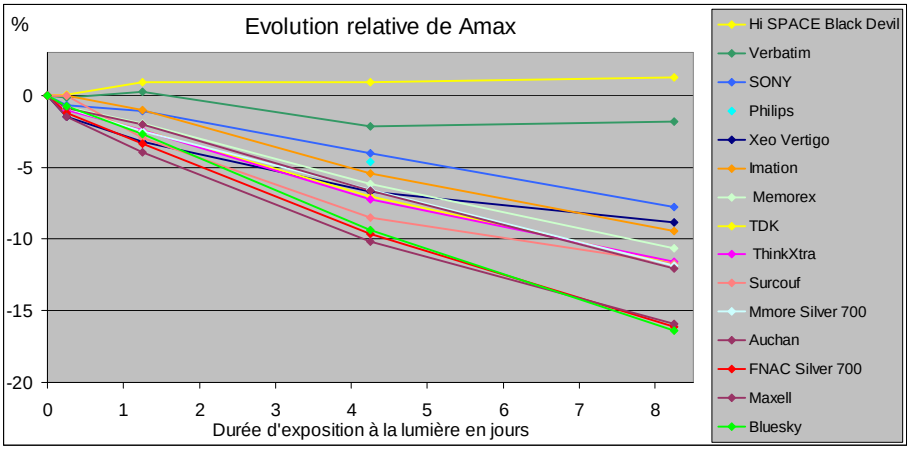


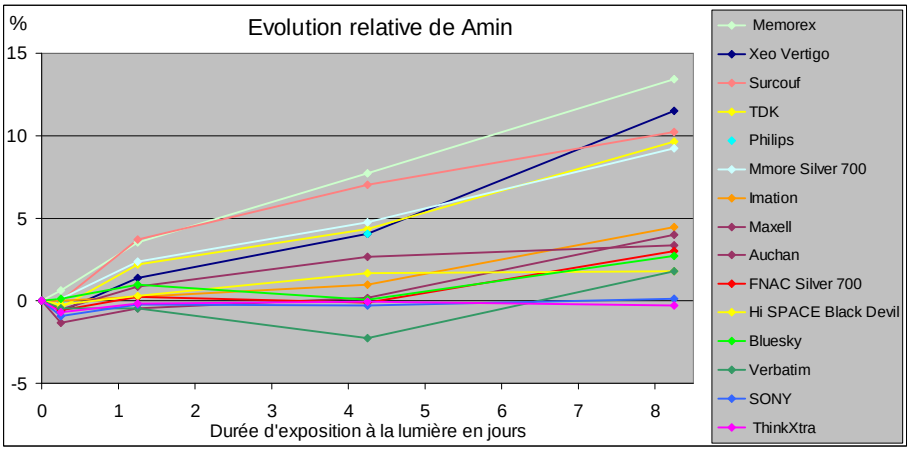
DD jitter

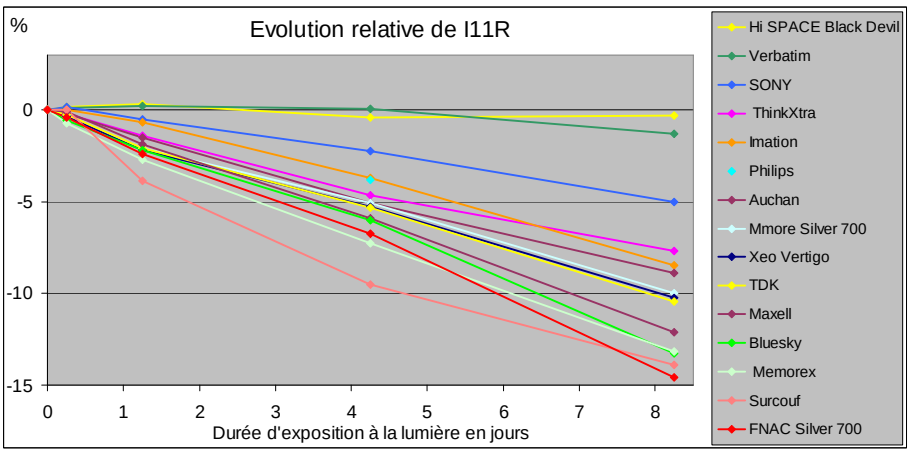


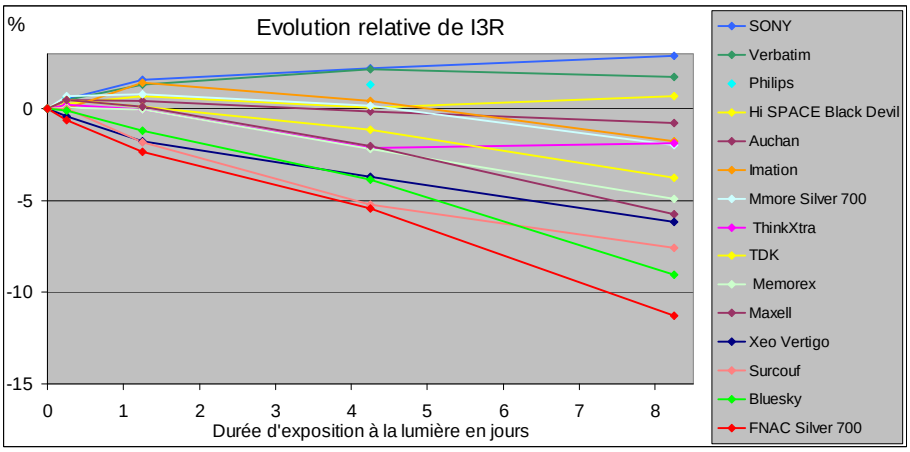


Evolution relative des paramètres d'intensité et de contraste du signal optique (vieillissement à la lumière)









5.4 COMPARAISON DES DIFFERENTS MODES DE VIEILLISSEMENT

Dans tous les modes de vieillissement (naturel, en étuve, à la lumière), on observe une évolution des paramètres d'amplitude et de contraste du signal optique. Cette évolution est plus systématique dans le cas du vieillissement naturel. Avec les durées de vieillissement réalisées, cette évolution n'engendre pas d'augmentation significative des taux erreurs numériques. Cela est sans doute dû à un effet de seuil, les erreurs numériques apparaissant assez brutalement dans ce type de vieillissement (RC) lorsque la chute du contraste est supérieure à 10 ou 15%.

Les dégradations entraînant des erreurs numériques importantes sont de différents types, en particulier des micro-taches ou des fluctuations de réflectivité à une échelle micrométrique. Ces dégradations, inquiétantes pour la conservation des données numériques sur CD-R, ont été observées fréquemment en vieillissement naturel, plus rarement en vieillissement en étuve et à la lumière.

Comparaison entre vieillissement accéléré en étuve et vieillissement à la lumière

Les mêmes disques de l'essai comparatif (1) de 2004 ont été testés en vieillissement accéléré en étuve et à la lumière (15 modèles de disques différents). Dans chaque mode, seulement deux modèles ont présenté une évolution significative des erreurs numériques, le modèle Verbatim à couche azoïque étant concerné dans les deux cas. Pour ce modèle, on retrouve des fluctuations de réflectivité (type F), surtout importante près du bord externe. Par contre il n'y a pratiquement pas d'évolution de réflectivité et de contraste (type RC) en vieillissement à la lumière, alors qu'il y a une évolution assez marquée en vieillissement en étuve.

Pour la majorité des disques, on observe des évolutions de réflectivité et de contraste pour les deux modes de vieillissement. Le contraste pits/lands a tendance à baisser avec la durée d'exposition, mais plus nettement par l'exposition à la lumière. Pour ce mode de vieillissement, la baisse de contraste est surtout due à la baisse de réflectivité des lands, alors que pour le vieillissement en étuve l'éclaircissement des pits est prépondérant. On note aussi une baisse du paramètre de symétrie (SYM) par le vieillissement en étuve et une hausse par le vieillissement à la lumière.

Les deux modes de vieillissement ne semblent donc pas mettre en jeu les mêmes processus physico-chimiques conduisant à la baisse du contraste pits/lands.

Comparaison entre vieillissement naturel et vieillissement accéléré

Tous les types de dégradation rencontrés en vieillissement naturel sont présents en vieillissement en étuve. En particulier, l'apparition de micro-taches assez fréquente dans le vieillissement naturel a également été observée en vieillissement en étuve (modèle TDK).

On n'a malheureusement pratiquement pas de recoupement entre les modèles de disques suivis en vieillissement naturel et en vieillissement en étuve. Ceci tient au manque de recul, les essais de vieillissement accéléré (étuve et lumière) ayant été effectué à partir de 2004 sur des modèles qui n'ont pas eu le temps de beaucoup vieillir en mode naturel. On ne peut donc pas, avec les données disponibles, démontrer que les processus de vieillissement qui sont prépondérants en vieillissement naturel pour un modèle de disque se retrouvent en vieillissement accéléré.

Une étude détaillée du vieillissement en étuve de deux modèles de CD-R (Verbatim et TDK) a été réalisée en 2007, à la suite de l'étude (2) réalisée pour la Direction des Archives de France. Il s'agit de modèles présentant une dégradation importante en terme d'erreurs numériques dès 10 jours d'étuve à 80°C. Il a été montré que les dégra dations n'étaient pas du même type, la dégradation du modèle TDK étant du type MT et celle du modèle Verbatim du type F. Les analyses réalisées en 2010 sur des disques de ces deux modèles, conservés dans des conditions normales depuis 2006, n'ont pas permis de mettre en évidence une dégradation naturelle significative.

6 CONCLUSION

L'étude détaillée du vieillissement des CD-R fait apparaître une situation complexe. Les données fournies par les analyseurs ou par le traitement du signal optique issu de la tête de lecture montrent qu'il n'y a pas un phénomène physique ou chimique unique à l'origine des dégradations des CD-R.

On met en évidence deux classes de phénomènes :

- des évolutions dans l'amplitude et le contraste du signal optique,
- l'apparition de fluctuations de réflectivité ou de taches à une échelle micrométrique.

La première classe de vieillissement est assez générale à tous les modèles de CD-R. On l'observe aussi bien en vieillissement naturel qu'en vieillissement à la lumière ou en étuve. Elle se caractérise toujours par une baisse de réflectivité des zones non gravées (lands). Par contre les zones gravées (pits) s'éclaircissent parfois, mais uniquement en vieillissement en étuve ou à la lumière. Le vieillissement naturel ne fait qu'exceptionnellement apparaître un éclaircissement des pits. Dans tous les cas, le contraste entre zones gravées et non gravées baisse. Cette baisse de contraste s'accompagne en général d'une augmentation du jitter, mais il n'y a pas de conséquence sur les taux d'erreurs numériques, tout au moins dans un premier temps, car les lecteurs restent capables de décoder correctement le signal optique tant que la baisse du contraste n'est pas trop forte. L'apparition des erreurs se fait brutalement au-delà d'un certain seuil. Avec les durées de vieillissement en jeu dans les essais décrits dans le présent rapport, on n'atteint pratiquement jamais ce seuil. On en déduit que cette première classe de vieillissement permet des durées de vie, en conditions de conservation normales, supérieures à 10 ans, pour pratiquement tous les modèles de CD-R.

La seconde classe de phénomènes est celle qui est en cause dans quasiment tous les cas faisant apparaître des taux d'erreurs numériques élevés, voire des pertes des données. L'échelle de temps n'est donc pas la même que pour la première classe. On a ainsi observé des dégradations importantes sur des durées de quelques années en vieillissement naturel ou de moins de 10 jours à forte température (80°C) et forte hygrométrie (85 %). Les dégradations importantes par exposition à la lumière sont plus rares, mais cela peut être dû à une durée d'exposition trop faible (8 jours avec un éclairement de 250 W/m^2).

Cette classe n'affecte pas tous les modèles de CD-R. Toutefois, la proportion des modèles concernés est de l'ordre de 20% de l'ensemble des modèles disponibles sur le marché en 2000-2002. La dégradation n'affecte pratiquement jamais les disques de manière homogène sur toute leur surface. Il est très fréquent d'avoir une amplification à proximité du bord externe du disque. Il est également fréquent d'observer une influence de la sérigraphie sur les taux d'erreurs. Au vu de ces constatations, il semble probable que les phénomènes à l'origine des dégradations soient liés à l'adhérence des couches minces (dye, métal) qui sont maintenues par le vernis du dos du disque. Toutefois la création de micro-taches, qui ont pu être observées dans certains cas au microscope, reste assez mystérieuse.

Globalement, l'étude des phénomènes physico-chimiques à l'origine de la dégradation des CD-R reste un domaine de recherche encore peu développé. La présente étude peut contribuer à orienter les recherches dans ce domaine.

Un dernier point est celui de la similitude ou non des phénomènes agissant dans le vieillissement naturel et dans le vieillissement accéléré. Dans la présente étude, aucun exemple probant n'a pu être exhibé, qui montrerait une similitude des dégradations pour un même modèle de CD-R. On note également que l'éclaircissement des pits qui est observé en vieillissement accéléré n'est quasiment jamais observé en vieillissement naturel. Ceci tend à montrer que le vieillissement à forte température et forte hygrométrie n'est pas une simple accélération du vieillissement en conditions naturelles, comme le présuppose la norme ISO 18927 relative à l'estimation de la durée de vie des CD-R.

ANNEXE 1 - RELATIONS ENTRE PARAMETRES D'ERREURS NUMERIQUES DU 1ER ET DU 2EME NIVEAU

On cherche à trouver une relation entre les taux d'erreurs numériques avant le correcteur C1 (E11, E21, E31, BLER) et avant le correcteur C2 (E12, E22, E32). Pour cela, on se place dans l'hypothèse où la répartition des erreurs est totalement aléatoire, sans corrélations spatiales ou autres. Sous cette hypothèse, la dispersion des octets au niveau du correcteur C2 ne joue pas de rôle.

E11, E21, E31, BLER

Ces paramètres représentent respectivement le nombre de blocs parmi S = 7350 blocs (1 seconde de signal) ayant à l'entrée du correcteur C1 :

- au moins 1 octet erroné (BLER)
- 1 octet erroné (E11)
- 2 octets erronés (E21)
- 3 octets (ou plus) erronés (E31)

On a la relation : $BLER = E11 + E21 + E31$

La valeur maximale des 4 paramètres est 7350. La probabilité qu'elle soit atteinte pour E11 ou E21 est quasi nulle. Elle peut être atteinte par E31 et BLER pour des disques totalement défectueux.

Si p est la probabilité qu'un octet soit erroné, la probabilité qu'un bloc, contenant N=32 octets, comporte n octets erronés suit la loi binomiale :

$$\mathrm{P}_{N,p}(n) = C_N^n \; p^n \, (1-p)^{N-n}$$

En particulier, la probabilité qu'aucun octet soit erroné est :

$$\mathrm{P}_{N,p}(0) = (1-p)^N$$

et :

$$\boxed{BLER = S\left[1-(1-p)^N\right]}$$

on peut calculer p en fonction du BLER : $p = 1 - \left(1 - \frac{BLER}{S}\right)^{\frac{1}{N}}$

La probabilité pour qu'un seul octet soit erroné est :

$$\mathrm{P}_{N,p}(1) = N \;\; p \;\; (1-p)^{N-1}$$

et :

$$\boxed{E11 = S\,\mathrm{P}_{N,p}(1)}$$

La probabilité pour que 2 octets soient erronés est :

$$\mathrm{P}_{N,p}(2) = \frac{1}{2} N\left(N-1\right) p^2 \;\; (1-p)^{N-2}$$

et :

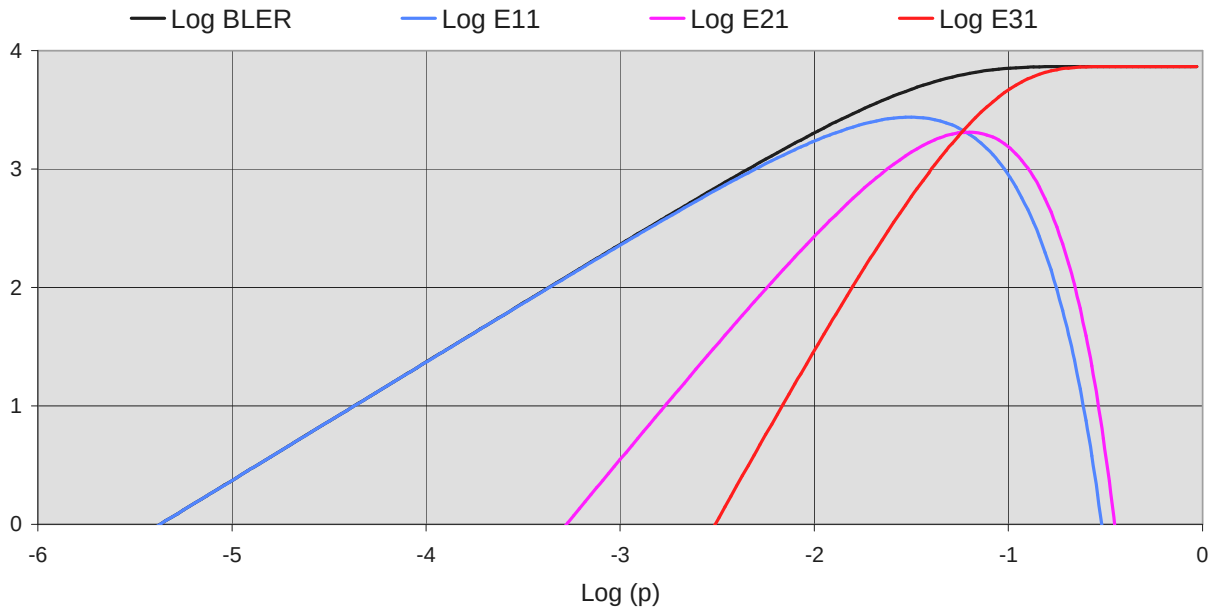
$$\boxed{E21 = S\,\mathrm{P}_{N,p}(2)}$$

La probabilité pour que 3 octets ou plus soient erronés est :

$$\mathrm{P}_{N,p}(3+) = \mathrm{P}_{N,p}(3) + \ldots + \mathrm{P}_{N,p}(N) = 1 - \mathrm{P}_{N,p}(0) - \mathrm{P}_{N,p}(1) - \mathrm{P}_{N,p}(2)$$

$$\boxed{E31 = BLER - E11 - E21}$$

Le graphe ci-dessous montre la relation entre BLER, E11, E21, E31 et p en échelle logarithmique



p est la probabilité qu'un octet soit erroné à l'entrée du correcteur C1

La valeur limite de 220 pour le BLER correspond à une valeur de p de l'ordre de 10^{-3}, soit 1 octet erroné sur 1000.

On remarque qu'Il existe une valeur de p pour laquelle les taux d'erreurs E11, E21 et E31 sont quasiment égaux : $p = \frac{2}{N+1} \approx 0{,}06$

E12, E22, E32

Ces paramètres représentent respectivement le nombre de blocs parmi S=7350 blocs (1 seconde de signal) ayant à l'entrée du correcteur C2 :

- 1 octet erroné (E12)
- 2 octets erronés (E22)
- 3 octets (ou plus) erronés (E32)

Les calculs sont similaires, sauf que la probabilité p doit être remplacée par la probabilité q qu'un octet soit erroné à l'entrée du correcteur C2. Cette probabilité est plus petite que p car tous les octets erronés qui étaient soit isolés soit en couple dans un bloc entrant dans le correcteur C1 ont été corrigés.

Le nombre moyen d'octets erronés par bloc avant C1 est : $N\ p$ (1)

Le nombre moyen d'octets corrigés par C1 est : $\mathrm{P}_{N,p}(1) + 2\,\mathrm{P}_{N,p}(2)$ (2)

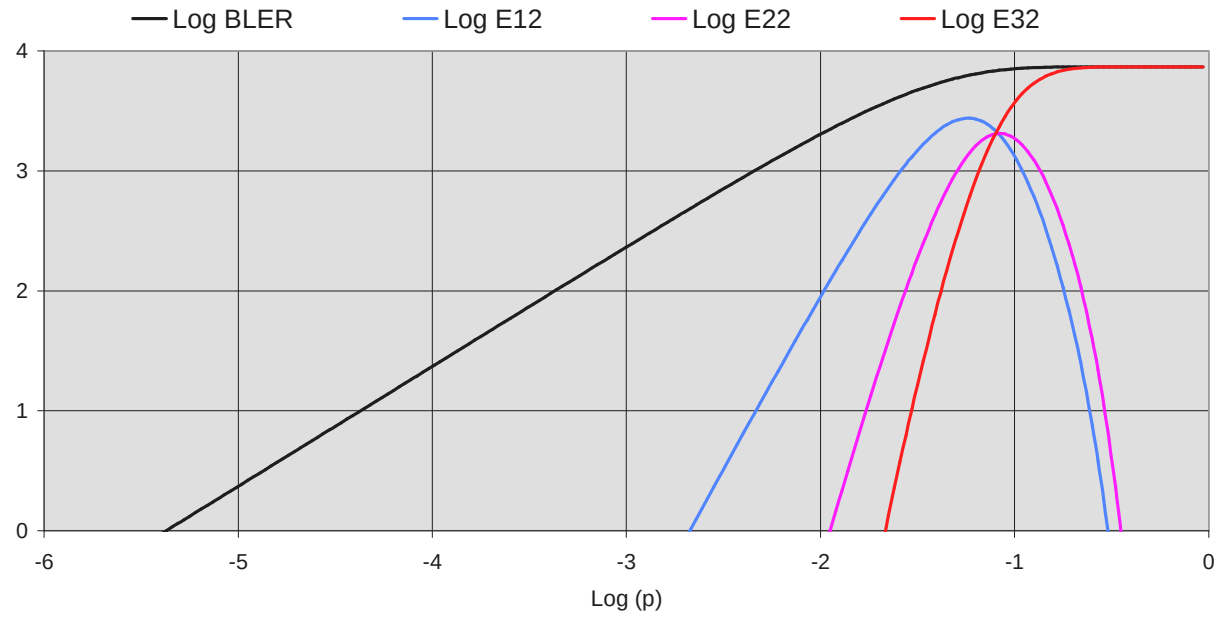
Le nombre moyen d'octets erronés par bloc avant C2 est la différence (1) – (2) et la probabilité qu'un octet soit erroné avant C2 est :

$$q = p - \frac{\mathrm{P}_{N,p}(1) + 2\,\mathrm{P}_{N,p}(2)}{N}$$

Finalement : $\boxed{q = p - p(1-p)^{N-1} - (N-1)\,p^2(1-p)^{N-2}}$

et : $E12 = S\,\mathrm{P}_{N,q}(1)$ $E22 = S\,\mathrm{P}_{N,q}(2)$ $E32 = S\,\mathrm{P}_{N,q}(3+) = S\left(1 - \mathrm{P}_{N,q}(0) - \mathrm{P}_{N,q}(1) - \mathrm{P}_{N,q}(2)\right)$

Le graphe ci-dessous montre la relation entre BLER, E12, E22, E32 et p en échelle logarithmique

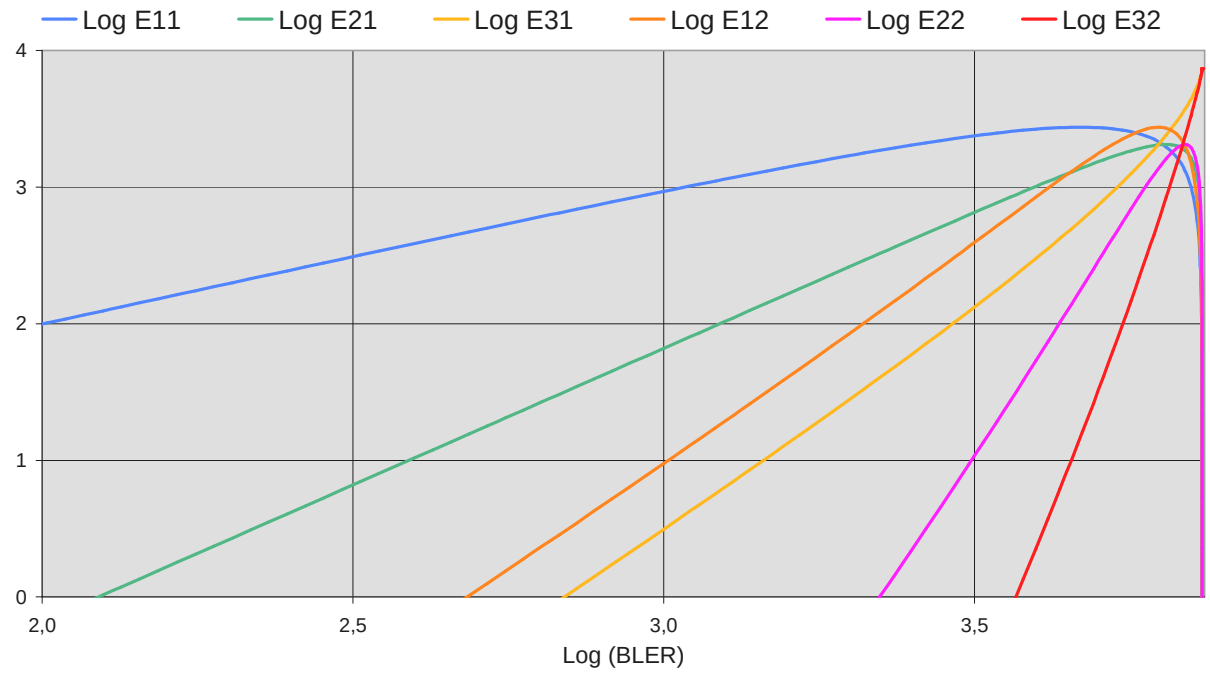


p est la probabilité qu'un octet soit erroné à l'entrée du correcteur C1

On constate que l'apparition de E22 est très tardive, à peu près lorsque le BLER est de l'ordre de 2000. La valeur maximale de E22 est également de l'ordre de 2000.

Ceci ne correspond pas bien aux résultats expérimentaux pour lesquels les E22 apparaissent pour un BLER généralement compris entre 500 et 1000 avec une valeur maximale rarement supérieure à 100. C'est surtout le second point qui expérimentalement s'écarte de la théorie, avec l'apparition de E32 dominants, bien avant que E22 n'atteigne la valeur 2000. Cet écart avec la théorie est sans doute dû au fait que l'hypothèse d'une distribution aléatoire des octets erronés n'est pas vraie.

Graphe des différentes erreurs numériques en fonction du BLER – Echelle logarithmique



ANNEXE 2 - RELATION ENTRE ERREURS NUMERIQUES ET DC JITTER

On se propose de relier le taux d'erreurs numériques la distribution des écarts entre transitions et tops d'horloge. Une erreur, au niveau du premier correcteur d'erreur, est due à un décalage d'une transition hors de l'intervalle [-0,5 dT ; + 0,5 dT] où dT représente la durée entre deux tops d'horloge.

Le paramètre d'erreurs le plus généralement employé est le BLER qui correspond au nombre de blocs erronés par seconde. Malgré son appellation (Block Error Rate), l'expression en nombre de blocs par seconde n'est pas un taux (rate). Sachant qu'il y a environ 7350 blocs par seconde, le taux de blocs erronés est égal à :

$$\tau_{blocs} = \frac{BLER}{7350}$$

Si N_{Tr} est le nombre moyen de transitions par bloc (de l'ordre de 125), le taux de blocs erronés τ_{blocs} est lié au taux de transitions erronées $\tau_{transitions}$ par la relation :

$$1-\tau_{blocs} = (1-\tau_{Transitions})^{N_{Tr}}$$

On en déduit la relation suivante entre le « taux » de BLER et le taux de transitions erronées :

$$\boxed{BLER = 7350\left[1-(1-\tau_{Transitions})^{N_{Tr}}\right]}$$

Pour des taux d'erreurs faibles on peut écrire :

$$BLER = 7350\, N_{Tr}\tau_{Transitions} \approx 0{,}9.10^{6}\tau_{Transitions}$$

La limite de 220 pour le taux de BLER correspond à un taux d'erreurs sur les transitions qui est faible, de l'ordre de 2,5 10^{-4}. Pour un disque correctement gravé, le taux d'erreurs sur les transitions est compris entre 10^{-6} et 10^{-5}.

Cas d'une distribution gaussienne

La distribution des positions des transitions est de la forme :

$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$ où σ est l'écart-type de la distribution (DC jitter)

Une transition engendre une erreur numérique dès lors que sa position s'écarte de sa position théorique de plus de 0,5 dT en valeur absolue. Le taux de transitions erronées s'écrit donc :

$$\tau_{transitions} = \int_{-\infty}^{-0,5} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx + \int_{+0,5}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx = 1-erf\left(\frac{0,5}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

où $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-t^2} dt$ est la fonction d'erreur.

On en déduit : $$\boxed{BLER = 7350\left[1-erf^{N_{Tr}}\left(\frac{0,5}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right]}$$

Pour des taux d'erreurs faibles : $$BLER \approx 0{,}9.10^{6}\left[1-erf\left(\frac{0,5}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right]$$

Dans les expressions ci-dessus, le DC jitter σ est exprimé en unité dT (cadence d'horloge).

ANNEXE 3 – EVALUATION DU TAUX DE BLER A PARTIR DE LA DISTRIBUTION DES ECARTS DES TRANSITIONS PAR RAPPORT AUX TOPS D'HORLOGE

Histogramme mesuré

On considère l'histogramme des écarts des transitions par rapport aux tops d'horloge. L'histogrammes mesuré est normalisé en le divisant par sa valeur maximale (pour x≈0). On obtient un histogramme noté $\tilde{H}(x)$.

Afin d'apprécier le caractère gaussien de l'histogramme mesuré, on réalise la transformation suivante :

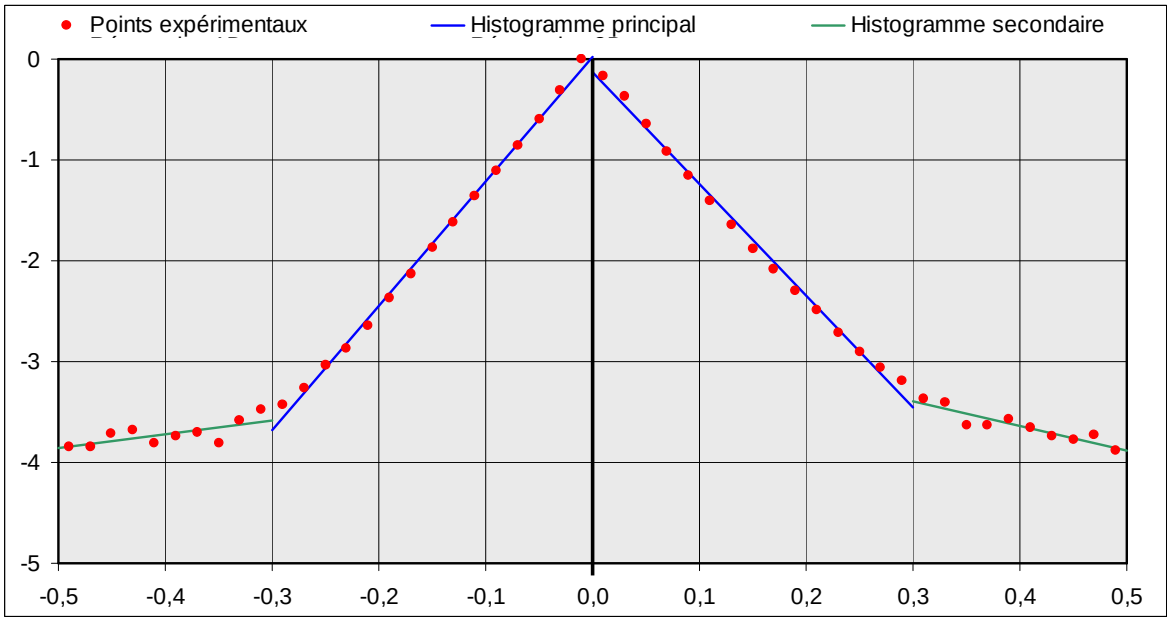
$$\tilde{H}(x) \rightarrow F(x) = -\sqrt{-2Ln(\tilde{H}(x))}$$

Si l'histogramme correspond à une distribution gaussienne d'écart-type σ, la fonction $F(x)$ est constituée de deux droites symétriques de pente $+\frac{1}{\sigma}$ et $-\frac{1}{\sigma}$: $F(x) = -\frac{|x|}{\sigma}$

Approximation de l'histogramme par des fonctions gaussiennes

L'histogramme transformé $F(x)$ est fréquemment constitué d'un histogramme principal dans sa partie centrale et d'un histogramme secondaire pour les ailes de la distribution. On fait une approximation de $F(x)$ par quatre segments de droite, chacun étant obtenu par régression linéaire sur les points expérimentaux comme montré sur la figure suivante.

Exemple d'histogramme $F(x)$ comportant une partie centrale et des ailes de pente différente



Histogramme principal

L'histogramme transformé $F(x)$ est approximé par 2 segments de droite, chacun pouvant être associé à une demi-distribution gaussienne. Chaque segment est caractérisé par sa pente (inverse de l'écart-type) et une constante C. L'équation d'un segment est de la forme :

$$F_{Gauss}(x) = -\frac{|x|}{\sigma} + C$$

L'histogramme associé est de la forme :

$$H_{Gauss}(x) = Exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma} - C\right)^2\right]$$

En principe C est proche de 0. Une valeur non nulle de C correspond à un décentrage de la gaussienne associée. σ est le DC jitter.

Histogramme secondaire

L'histogramme transformé comporte souvent des ailes latérales distinctes de la partie principale. Cela correspond à un histogramme secondaire dont la fonction $F(x)$ est approximée par 2 segments de droite obtenu par régression linéaire pour les valeurs de x appartenant aux intervalles [x_0 , x_1] et [-x_1 , x_0]. x_0 est de l'ordre de 0,2 à 0,3 et x_1 est généralement pris égal à 0,5. Chaque segment de droite est caractérisé par sa pente ±A (A positif) et une constante B, nettement inférieure à 0. L'équation d'un segment est de la forme :

$$F(x) = -A|x| + B$$

L'histogramme gaussien que l'on souhaite associer est de la forme :

$$H^{sec}_{Gauss}(x) = k\ Exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma'}\right)^2\right]$$

Il s'agit d'un histogramme gaussien centré, multiplié par un coefficient k inférieur à 1. L'écart-type σ' est généralement supérieur à l'écart-type σ de l'histogramme principal.

L'histogramme transformé n'est pas une droite :

$$F_{Gauss}(x) = -K\sqrt{1+\left(\frac{x}{K\sigma'}\right)^2}$$ où K est défini par $K^2 = -2Ln(k)$

Toutefois, cette fonction est proche d'une droite sur l'intervalle [x_0 , x_1] et le problème consiste à déterminer K et σ' qui rendent la fonction proche de la droite déterminée expérimentalement sur ce segment et caractérisée par les coefficients A et B. Pour cela, on écrit l'égalité de la fonction linéaire expérimentale $F(x)$ et de la fonction cherchée $F_{Gauss}(x)$ aux deux extrémités de l'intervalle [x_0 , x_1].

On établit ainsi les relations :

$$\sigma' = \frac{1}{\sqrt{A^2 - \frac{2AB}{x_0 + x_1}}}$$ et $$K = \sqrt{B^2 - 2AB\frac{x_0 x_1}{x_0 + x_1}}$$

ce qui permet de calculer le coefficient $k = Exp\left[-\frac{K^2}{2}\right]$

Calcul des taux d'erreurs

On associe à chacune des 4 distributions un taux d'erreurs par prolongement à l'extérieur de l'intervalle [-0,5 ;+0,5]. Pour un segment x>0, le calcul est le suivant :

$$\tau_{erreurs} = \frac{\int_{+0,5}^{+\infty} H_{Gauss}(x)\ dx}{\int_{-0,5}^{+0,5} H_M(x)\ dx}$$ où H_M (x) est l'histogramme mesuré

Pour l'histogramme principal :

$$\int_{+0,5}^{+\infty} H_{Gauss}(x)\ dx = \int_{+0,5}^{+\infty} Exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}-K\right)^2\right] dx = \frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2} Erfc\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{0,5}{\sigma}-K\right)\right]$$

où la fonction $Erfc$ *est définie par* $Erfc(z) = 1 - Erf(z)$

Pour l'histogramme secondaire :

$$\int_{+0,5}^{+\infty} H_{Gauss}(x)\ dx = \int_{+0,5}^{+\infty} k\ Exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma'}\right)^2\right] dx = k\frac{\sigma'\sqrt{2\pi}}{2} Erfc\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{0,5}{\sigma'}\right)\right]$$

Evaluation du pourcentage des transitions associées à l'histogramme secondaire

$$\tau_{transitions} = \frac{\int_{0}^{0,5} H_{Gauss}(x)\ dx}{\int_{-0,5}^{+0,5} H_M(x)\ dx}$$

$$\int_{0}^{0,5} H_{Gauss}(x)\ dx = \int_{0}^{0,5} k\ Exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma'}\right)^2\right] dx = k\frac{\sigma\sqrt{2\pi}}{2}\left\{Erf\left[\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\frac{0,5}{\sigma'}\right)\right]\right\}$$