



Le progrès, une passion à partager

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

LA CONSERVATION DES DONNEES NUMERIQUES SUR DVDR

**Recherche dans le cadre du Groupement d'Intérêt Scientifique
sur les Supports Pérennes d'Archivage des Données Numériques
(GIS SPADON)**

Auteur : Jean-Michel LAMBERT

Juin 2013

Financement :

Laboratoire National de Métrologie et d'Essais

Fiche R&D N° 202 / 2009

Résumé

Reprenant des analyses réalisées sur de nombreux modèles de DVD enregistrables, on tente d'établir un lien entre le vieillissement sous l'effet de la lumière, le vieillissement accéléré par la température combinée à une forte hygrométrie et le vieillissement naturel en conditions climatiques normales.

L'effet de la lumière est modélisé en prenant pour hypothèse une évolution de l'indice optique du colorant qui est lentement décomposé au cours de l'exposition à la lumière.

Vieillissement en température et naturel font apparaître des points communs. Plusieurs processus sont à l'origine des dégradations observées. L'un d'eux produit une dégradation qui s'amplifie progressivement du centre vers le bord externe du disque. La cause physique de ce type de dégradation n'a pas pu être identifiée précisément, mais elle ne semble pas liée à une transformation chimique du colorant.

Abstract

Analyzes of many models of DVD recordable media are summarized, in order to establish a link between three types of ageing : ageing under the influence of light, accelerated ageing by temperature and humidity, natural ageing in normal climatic conditions.

The effect of light is modeled assuming a change in the refractive index of the dye that is slowly decomposed during exposure to light.

Accelerated ageing by temperature and natural ageing show similarities. Several processes are at the origin of the observed degradations. One of them generates degradation that gradually amplifies from the center to the outer edge of the disk. The physical cause of this type of damage could not be identified precisely, but it does not seem related to a chemical transformation of the dye.

SOMMAIRE

	Page
1 INTRODUCTION.....	4
2 DESCRIPTION DES DVD ENREGISTRABLES (DVDR)	5
2.1 CONSTITUTION ET FABRICATION D'UN DVDR.....	5
2.2 DVD-R ET DVD+R	7
2.3 EVOLUTION DES MODELES DE DVDR.....	7
3 LE CODAGE DE L'INFORMATION NUMERIQUE.....	9
3.1 PRINCIPE.....	9
3.2 LE CODE DE MODULATION	9
3.3 LES CODES CORRECTEURS D'ERREURS	10
3.4 LE DECODAGE DE L'INFORMATION NUMERIQUE	10
4 ANALYSE DES DVD.....	13
4.1 ANALYSEURS UTILISES	13
4.2 ANALYSE DES ERREURS NUMERIQUES	14
4.3 ANALYSE DU SIGNAL OPTIQUE	14
4.3 PARAMETRES DE TRACKING	18
5 LA GRAVURE DES DVDR.....	19
5.1 PRINCIPE.....	19
5.2 AJUSTEMENT DE LA PUISSANCE DU LASER	19
5.3 STRATEGIE DE GRAVURE	20
5.4 PRECISION DE GRAVURE.....	21
6 VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE	23
6.1 DESCRIPTION DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE	23
6.2 EVOLUTION DES PARAMETRES DE 6 MODELES DE DVD-R	24
6.3 EFFET DE LA LUMIERE SUR LA TRANSPARENCE DU POLYCARBONATE	27
6.4 MODELISATION DE L'EVOLUTION DES AMPLITUDES ET DU CONTRASTE DU SIGNAL HF	28
6.5 VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE ET ERREURS NUMERIQUES.....	30
6.6 INFLUENCE DE LA LUMIERE SUR LES ZONES GRAVEES (PITS)	31
6.7 SYNTHESE DU VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE	32
7 VIEILLISSEMENT ACCELERE EN ETUVE	33
7.1 DESCRIPTION DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ACCELERE	33
7.2 MODELES TESTES EN VIEILLISSEMENT ACCELERE	34
7.3 EVOLUTION DES ERREURS NUMERIQUES PI8.....	35
7.4 EVOLUTION DES PARAMETRES	36
7.4 DEGRADATION AUGMENTANT AVEC LA DISTANCE AU CENTRE DU DISQUE.....	39
7.5 TACHES PRODUISANT LA DISPARITION DE LA MODULATION HF	41
7.6 SYNTHESE RELATIVE AU VIEILLISSEMENT EN ETUVE	42
8 VIEILLISSEMENT NATUREL	43
8.1 ANALYSES REALISEES POUR L'ETUDE DU VIEILLISSEMENT NATUREL DES DVD±R	43
8.2 EVOLUTION DES PARAMETRES DU SIGNAL HF.....	43
8.3 COLLECTION LNE - MODELES A EVOLUTION RAPIDE.....	46
8.4 COLLECTION INA - EVOLUTION D'UN MODELE	47
8.5 SYNTHESE DU VIEILLISSEMENT NATUREL.....	48
9 CONCLUSION	49
ANNEXE 1 – CALCUL DE LA REFLECTIVITE DES ZONES GRAVEES ET NON GRAVEES D'UN DVD ENREGISTRABLE (DVD±R).....	51

1 INTRODUCTION

Le Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE) réalise des mesures sur la qualité des disques optiques enregistrables depuis plus de dix ans. Un rapport de 2010 (Typologie du vieillissement des CD-R) fait la synthèse des connaissances acquises sur les CD-R et en particulier sur leur vieillissement.

Le présent rapport a pour objet de présenter les connaissances acquises sur les DVD enregistrables (DVDR). Les données proviennent d'essais et études réalisées depuis 2002 au LNE. L'enregistrement sur disque réinscriptible (DVDRW) n'est pas abordé parce qu'il s'agit de supports qui ne sont normalement pas utilisés pour l'archivage des données numériques en raison de la possibilité d'effacement. La couche enregistrable de ce type de disque est de nature très différente de celle des DVDR.

Bien qu'il y ait une similitude sur de nombreux points avec les CD-R, l'analyse des DVDR montre que leur gravure est plus difficile à réaliser, avec une plus grande sensibilité vis à vis de l'ajustement de la puissance et de la forme des impulsions du laser de gravure. Les conditions de gravure initiales ont un impact plus important sur le devenir des données enregistrées sur DVDR que sur CD-R.

Dans une première partie (chapitres 2, 3, 4 et 5), on fait une présentation de la constitution des DVDR, de leur gravure, du codage et du décodage des données numériques. L'évaluation de la qualité de gravure est également décrite avec la signification des principaux paramètres délivrés par les analyseurs.

Dans une seconde partie (chapitres 6, 7 et 8), on donne une description des essais ainsi que les évolutions constatées au cours du vieillissement des disques. On aborde successivement le vieillissement sous l'effet de la lumière, le vieillissement par exposition à température et hygrométrie élevées et le vieillissement naturel en conditions normales.

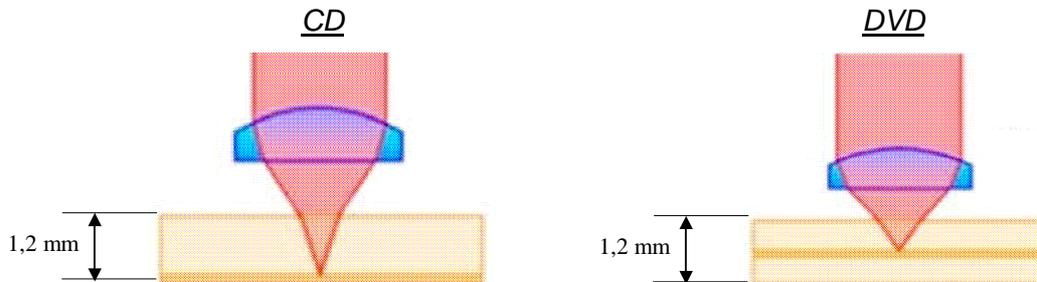
Les résultats sont synthétisés pour faire ressortir les similitude et les différences de comportement selon les modes de vieillissement. On réalise une classification des différents types d'évolution en tentant d'en donner l'origine ou tout au moins en formulant des hypothèses sur cette origine. Dans le cas du vieillissement à la lumière, une modélisation a été faite pour expliquer les évolution constatées.

2 DESCRIPTION DES DVD ENREGISTRABLES (DVDR)

2.1 CONSTITUTION ET FABRICATION D'UN DVDR

Un DVD est constitué de deux disques en polycarbonate de même épaisseur. L'épaisseur totale du polycarbonate est, comme pour le CD, de 1,2 mm mais la surface porteuse de l'information se trouve à mi-profondeur, à l'interface des deux disques qui sont assemblés par collage.

Fig. 2.1 - Position de la surface sensible d'un CD et d'un DVD



La fabrication d'un DVDR commence par celle du disque frontal, c'est à dire celui qui sera traversé par le laser en lecture. Ce disque est pressé à chaud avec une matrice qui imprime sur la surface un fin sillon en forme de spirale. La spirale couvre une grande partie du disque, depuis le rayon de 24mm jusqu'à un rayon de 58 mm environ. Le sillon a une largeur de l'ordre de $0,3 \mu\text{m}$ et une profondeur de l'ordre de $0,17 \mu\text{m}$. Le pas de la spirale est de $0,74 \mu\text{m}$, ce qui laisse une partie plate (inter-sillon ou plateau) d'une largeur de l'ordre de $0,44 \mu\text{m}$.

Après refroidissement, le disque frontal en polycarbonate est recouvert de la couche sensible qui est un colorant (ou « dye ») du type cyanine. Mitsubishi avec Verbatim développe des disques dont la couche sensible est un colorant dit « azoïque ». La couleur visible du colorant est dans tous les cas bleutée. Le dépôt du colorant s'effectue après l'avoir incorporé dans un solvant qui le rend fluide. La méthode est celle du « spin coating ». Elle consiste à déposer quelques gouttes près du centre du disque et à jouer sur la vitesse de rotation pour réaliser un étalement sur toute la surface par l'action de la force centrifuge. Le colorant remplit partiellement le sillon et se dépose en une couche plus fine sur le plateau. L'épaisseur du colorant déposé est de l'ordre de $0,11 \mu\text{m}$ dans le sillon et seulement $0,015 \mu\text{m}$ sur le plateau. Le réglage de l'épaisseur déposée se fait en variant la vitesse de rotation. L'épaisseur du colorant tant dans le sillon que sur le plateau conditionne la réflectivité vis à vis du faisceau laser. Il s'agit donc d'un paramètre très important pour l'usage du DVDR.

Après l'étalement par « spin coating », le solvant est évaporé et le colorant reste déposé sur le polycarbonate sous forme solide. On effectue alors le dépôt de la couche métallique par pulvérisation cathodique (ou « sputtering »). Le métal peut être soit un alliage composé principalement d'argent, soit de l'or. Pour certains modèles de DVDR on dépose d'abord une couche à base d'argent ayant un coefficient de réflexion de la lumière élevé, puis une couche d'or qui assure une meilleure protection vis à vis de l'oxydation. L'épaisseur de la couche métallique est de l'ordre de $0,02 \mu\text{m}$.

La dernière phase de la fabrication est le collage du second disque en polycarbonate sur le disque frontal. Pour cela la colle (résine) est déposée sur toute la surface. Cependant le collage est le plus efficace sur l'anneau interne et sur le bord externe (1mm) où il n'y a ni colorant ni métal et où les deux disques de polycarbonate sont en contact direct. Le film de colle a une épaisseur de l'ordre de $50 \mu\text{m}$ et vient remplir les irrégularités de surface liées au sillon.

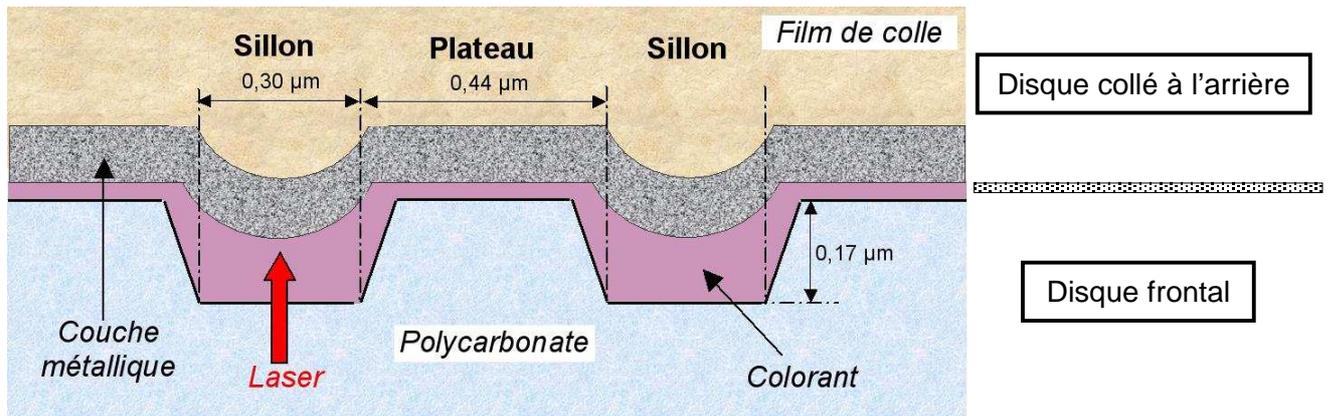
Les process de fabrication ont été mis au point par de grandes sociétés comme Mitsubishi-Verbatim, Taiyo Yuden, Sony, etc. Actuellement, la fabrication est le plus souvent faite sous licence, dans des usines implantées dans différents pays d'Asie.

Les paramètres les plus importants caractérisant un modèle de DVDR sont les suivants :

- composition chimique du colorant,
- forme géométrique du sillon (profondeur, profil),
- épaisseur du colorant sur le sillon et sur le plateau,
- nature et épaisseur de la couche métallique réfléchissante.

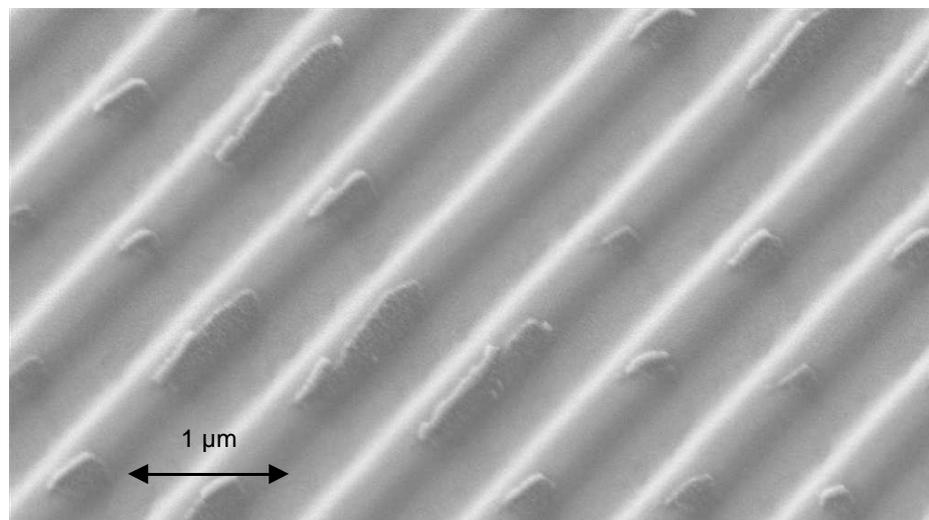
La figure 2.2 montre la constitution de la surface enregistrable d'un DVDR.

Fig. 2.2 - Représentation de l'interface entre les deux disques de polycarbonate d'un DVDR



L'image de la figure 2.3 a été obtenue au microscope électronique à balayage (MEB) sur un DVDR déjà enregistré. Les deux disques en polycarbonate constituant le DVDR ont été séparés afin que le faisceau d'électron du MEB puisse atteindre la surface métallique. Celle-ci est vue du côté du disque frontal et le sillon apparaît en relief positif (bosse). On remarque sur le sillon la présence de morceaux de colorant qui ont adhéré au métal au moment de la séparation du disque frontal. Ces morceaux sont situés sur les marques de gravure, là où le colorant a été décomposé par le laser.

*Fig. 2.3 - Image de la surface métallisée d'un DVDR
(MEB LNE – plateforme CARMEN)*



2.2 DVD-R ET DVD+R

Il existe deux formats de DVD enregistrables. Le plus ancien est le DVD-R. Il a été développé par Pioneer et finalisé en 1997. Le DVD+R a été développé par Philips, Sony et Hewlett-Packard. Il est finalisé en 2002. Les deux formats coexistent actuellement et tous les lecteurs et graveurs récents sont compatibles avec ces deux formats.

Les deux formats diffèrent principalement par le repérage de position sur la spirale du sillon. Dans les deux formats, le sillon présente une légère oscillation radiale (« wobble »), détectable par le système d'asservissement radial qui maintient le faisceau laser sur le sillon.

Dans le cas du DVD-R cette oscillation permet seulement l'asservissement de l'horloge lors de la gravure. Dans le cas du DVD+R l'oscillation est modulée en phase de façon à contenir en plus l'information de position sur le sillon. Le système de repérage de position du DVD-R est basé sur des marques en creux (« pré-pits ») imprimées dans l'inter-sillon.

Il n'y a pas de différence fondamentale entre les modes de fabrication et les constituants pour les deux formats. Les phénomènes de vieillissement qui peuvent affecter les DVD-R et les DVD+R sont à priori les mêmes.

2.3 EVOLUTION DES MODELES DE DVDR

Les modèles de DVDR ont évolué depuis leur origine, au début des années 2000, jusqu'à aujourd'hui. Cette évolution concerne tout d'abord la vitesse de gravure que les fabricants ont continuellement cherché à augmenter jusqu'à atteindre une limite vers 2006.

Vitesses de gravure

La vitesse de 1x est définie par une période d'horloge égale à 38,2 ns, soit une fréquence de 26,16 MHz. Pour obtenir la vitesse de gravure de 1x sur la totalité d'un DVD, la vitesse de rotation doit être comprise entre 1400 tours/min en début de disque et 575 tours/min en fin de disque. La durée de lecture d'un DVD complètement enregistré est dans ce cas d'un peu moins d'une heure.

La vitesse maximale de gravure des premiers modèles de DVDR était de 1x ou 2x, ce qui nécessitait une durée de gravure de l'ordre de 30 minutes, peu commode pour l'utilisateur. Les performances de gravure, au niveau de la conception des DVDR, ont pu être améliorées jusqu'à atteindre une vitesse de gravure de 20x à partir de 2006.

La limite de la vitesse de gravure ne provient alors plus des performances des modèles de DVDR, mais des capacités mécaniques des graveurs. Il est en effet difficile de dépasser une vitesse de rotation de 12 000 tours par minute, sous peine de mettre en péril l'intégrité du disque en raison de la force centrifuge.

La gravure d'un DVDR en « 20x » s'effectue avec une vitesse de rotation constante (mode CAV) de l'ordre de 11 500 tours par minute. La vitesse de gravure réelle est alors de 8x en début de disque et n'atteint 20x qu'en toute fin de disque. La durée de gravure d'un DVDR complètement rempli est dans ce cas de 4 minutes, sans compter la préparation de la gravure qui prend environ 1 minute supplémentaire, soit 5 minutes au total.

La plupart des modèles de DVDR actuellement commercialisés supportent une vitesse de gravure de 16x, à l'exception des modèles spécifiquement conçus pour l'archivage (Archival) dont la vitesse de gravure est généralement limitée à 8x. Pour ces modèles, la durée de gravure d'un DVD complet est de l'ordre de 8 minutes.

Modèles de DVDR sans couche métallique

En 2010, sont apparus sur le marché des modèles de DVD+R d'une conception très différente de celle des DVDR classiques. Il s'agit des modèles suivants :

- M-Disc de la société Millenniatta
- DataTresorDisc de la société Northern Star

La réflectivité du sillon n'est plus assurée par dépôt d'une couche métallique, mais par la couche enregistrable elle-même. Celle-ci n'est plus un colorant comme dans le cas des DVDR classiques mais un composé inorganique. Ces modèles de disque sont supposés avoir une tenue dans le temps supérieure à celle des DVDR classiques, grâce à la meilleure stabilité des composants inorganiques vis à vis des composants organiques.

La réflectivité de ces modèles est inférieure de moitié à celle des DVDR classiques, ce qui peut poser des problèmes de compatibilité avec les lecteurs. La gravure est également particulière et Millenniatta fournit un graveur spécifique pour le M-Disc. Pour les deux modèles la vitesse de gravure est limitée à 4x.

3 LE CODAGE DE L'INFORMATION NUMERIQUE

3.1 PRINCIPE

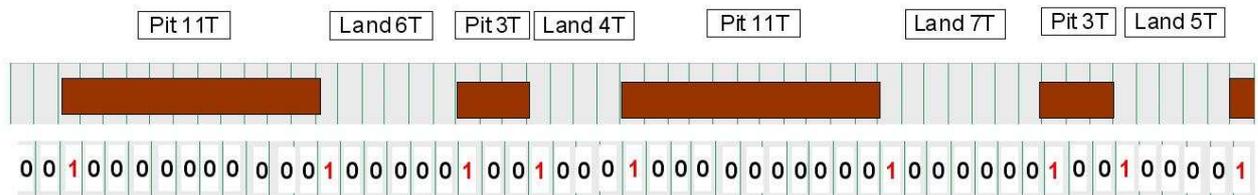
L'information numérique sur les disques optiques est liée à l'alternance de zones gravées (pits) et non gravées (lands) sur la piste. Celle-ci est une spirale dont la longueur est de près de 12 km. Les longueurs des marques sont comprises entre 0,4 et 1,5 μm . Il est ainsi possible d'enregistrer sur un DVDR des milliards de bits d'information.

La façon la plus simple d'encoder l'information serait de faire correspondre 0 à un land et 1 à un pit, avec la même longueur pour chacun. Afin d'augmenter la capacité du disque, cette longueur serait choisie la plus petite possible, tout en étant détectable compte tenu du diamètre du spot laser. En réalité l'encodage retenu est un peu plus compliqué. Il est en effet possible de détecter des différences de longueur ΔL (d'un pit ou d'un land) nettement plus petites en excluant les longueurs ΔL et $2 \Delta L$. On a ainsi choisi un codage dans lequel les lands et les pits ont des longueurs pouvant prendre 10 valeurs discrètes différentes : 3 ΔL , 4 ΔL , ..., 11 ΔL et 14 ΔL . La longueur 14 ΔL n'est pas utilisée pour l'encodage des données numériques, mais seulement pour le repérage des débuts de trame

Plutôt que d'associer des 0 aux lands et des 1 aux pits, on associe 1 à chaque changement, c'est-à-dire au passage d'un pit à un land ou d'un land à un pit. Ceci rend le codage symétrique vis-à-vis des lands et des pits, c'est à dire que le remplacement des pits par des lands et vice et versa ne modifie pas le code numérique enregistré.

Le schéma de la figure 3.1 donne une représentation de la relation entre les marques et le code numérique binaire associé.

Fig. 3.1 - Représentation schématique d'une portion de piste et du code binaire associé



3.2 LE CODE DE MODULATION

Le code numérique inscrit sur la piste d'un DVD est une succession de 0 et de 1 dans laquelle :

- Les 1 sont toujours isolés (encadrés par deux 0),
- Les 0 ne sont jamais isolés et forment des groupes comprenant de deux à dix 0 successifs.

L'information à enregistrer se présente sous forme d'octets contenant chacun 8 bits. L'encodage de cette information se fait par un code dit EFM+ (Eight To Fourteen Modulation). Ce code associe à chaque octet un ensemble de 16 bits satisfaisant aux contraintes ci-dessus. Une table de correspondance est donnée pour les 256 octets possibles. Un même octet peut être représenté par 4 ensembles de 16 bits. Le choix de l'une ou l'autre de ces 4 possibilités est fait de manière à assurer, sur la jonction de deux ensembles de 16 bits, les contraintes mentionnées ci-dessus.

La table de conversion, ainsi que le principe de jonction conduit à ce que la longueur totale des lands soit égale à celle des pits. C'est une propriété qui facilite le décodage du signal en lecture.

3.3 LES CODES CORRECTEURS D'ERREURS

La lecture d'un enregistrement numérique doit permettre de retrouver l'intégralité des octets de données. Cependant, quelle que soit la qualité de l'enregistrement, il existe un pourcentage d'octets enregistrés qui ne seront pas lus correctement. Par exemple le taux d'erreurs directes en lecture d'un disque optique très bien gravé est au mieux de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-6} . On remédie à ce problème par l'enregistrement d'octets additionnels (codes correcteurs) calculés à partir des octets de données. En cas d'erreur de lecture, les codes correcteurs permettent de recalculer les octets erronés. Il faut pour cela que les taux d'erreurs soient suffisamment faibles.

Les codes correcteurs traduisent une certaine redondance de l'information enregistrée, l'augmentation correspondante du volume de données étant de l'ordre de 15% pour le DVD.

On distingue deux types d'erreurs :

- des erreurs de type aléatoire réparties tout au long de la piste,
- des erreurs en rafale dues à un défaut ponctuel, comme par exemple une rayure ou une poussière sur la surface du disque.

Le système de correction d'erreur des DVD doit palier à ces deux types d'erreurs. Pour cela, une première série de codes correcteurs est calculée sur des octets consécutifs sur la piste, tandis qu'une seconde série de codes correcteurs est calculée sur des octets éparpillés. Le premier niveau de correction concerne des octets enregistrés sur une longueur de 0,4 mm sur la piste. Le second niveau de correction concerne des octets éparpillés sur une distance de 83 mm.

Les octets auxquels s'appliquent les deux corrections peuvent être vus sous forme d'un bloc (ECC), incluant les données et les codes correcteurs d'erreur. Chaque bloc comporte 208 lignes de 182 octets.

Chaque ligne contient des octets qui sont adjacents sur le sillon du DVD. Le premier niveau de correction s'effectue ligne par ligne. Le code correcteur correspondant (« Inner Parity ») a la capacité de corriger 5 octets faux dans une ligne.

Les octets situés dans une même colonne d'un bloc ECC sont, contrairement à ceux d'une ligne, physiquement éparpillés sur le sillon. Les erreurs dues à un défaut ponctuel produisent des concentrations dans une ligne, mais pas dans une colonne. Le second niveau de correction porte sur les colonnes du bloc ECC. Le code correcteur correspondant (« Outer Parity ») a la capacité de corriger 8 octets faux dans une colonne. Si ce second niveau de correction est mis en défaut, on a un POF (Parity Outer Fail). Cette situation ne doit pas se produire pour aucun des blocs ECC d'un DVD, si l'on veut récupérer l'intégralité des données enregistrées.

3.4 LE DECODAGE DE L'INFORMATION NUMERIQUE

Le décodage de l'information numérique s'effectue par un traitement spécifique du signal optique issu de la tête de lecture. Ce signal, appelé aussi **signal HF**, reflète la réflectivité du sillon vis à vis de la lumière du laser de lecture (longueur d'onde 650 nm). Les marques inscrites à la gravure réalisent une modulation en amplitude. Le décodage consiste à associer à chaque marque (pit) et à chaque intervalle (land) le nombre correct de périodes élémentaires, afin de retrouver le code numérique inscrit.

Le principe du dispositif de décodage repose sur trois éléments :

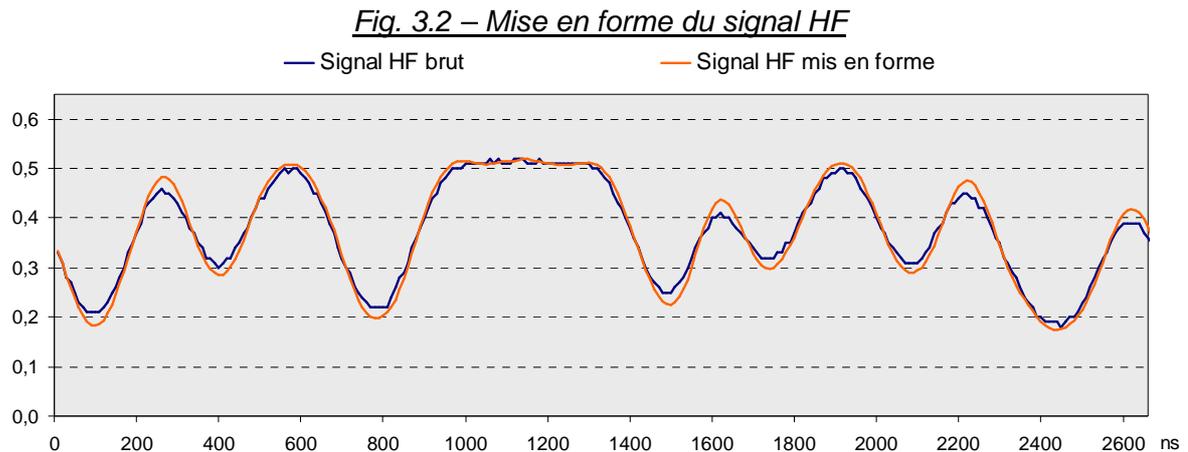
- le filtrage et la mise en forme du signal HF
- l'établissement d'un « seuil de décision », qui est le niveau permettant de déterminer pour chaque élément du signal s'il correspond à un pit (en dessous du seuil) ou à un land (au-dessus du seuil)
- l'asservissement d'une horloge qui définit la cadence de détection des bits élémentaires.

On appelle **transitions** les instants où le signal HF franchit le seuil de décision, soit d'un pit vers un land (transition montante), soit d'un land vers un pit (transition descendante).

Mise en forme du signal HF

Un filtre passe-bas est utilisé pour éliminer le bruit haute fréquence au-delà de la fréquence la plus élevée de la modulation. En lecture à la vitesse 1x, le filtrage s'effectue avec une fréquence de coupure à -3dB qui est de l'ordre de 10 MHz, à comparer avec la fréquence d'horloge qui est de 26 MHz et la fréquence de la modulation 3T qui est de 8,7 MHz.

Afin de renforcer l'amplitude de la modulation 3T, on utilise un filtre de mise en forme qui renforce les fréquences autour de 7 MHz avec un gain maximal de l'ordre de 2. La figure 3.2 montre le signal HF avant et après mise en forme.



Contrairement au cas des CD-R, l'amplification de la modulation 3T s'avère décisive pour les DVDR, particulièrement lorsque le contraste de la gravure est faible. En effet les erreurs de décodage sont souvent liées aux lands et pits 3T qui sont les plus nombreux et les moins contrastés

Seuil de décision

Le seuil de décision est tel que la durée totale des parties du signal HF situées au-dessus du seuil soit égale à celle des parties du signal situées en dessous. Ce niveau est proche de la composante continue du signal mais pas strictement égal à celle-ci. Le seuil de décision s'adapte au signal par un asservissement dont la réactivité est importante. La variabilité du seuil de décision permet, entre autre, de maintenir le décodage du signal lorsque la luminosité du laser est atténuée en raison de la diffusion de la lumière sur des défauts de surface du disque (rayure).

Cadence d'horloge

L'horloge définit la cadence à partir de laquelle est calculé le code numérique. Elle doit s'ajuster sur la cadence utilisée lors de la gravure. Comme pour le seuil de décision, cette cadence n'est pas fixe, mais s'adapte automatiquement au signal HF. L'« accrochage » de l'horloge sur le signal se fait par une boucle à verrouillage de phase du type PLL (Phase-Locked Loop). Les écarts entre les tops d'horloge et les instants où le signal HF franchit le seuil de décision sont statistiquement minimisés par l'asservissement PLL. L'adaptation de la cadence d'horloge permet en particulier la lecture d'un disque à vitesse linéaire non constante.

Variations d'un lecteur à l'autre

Les paramètres relatifs à la mise en forme du signal HF, à l'asservissement du seuil de décision et de l'horloge peuvent différer d'un lecteur à l'autre. Ils peuvent même, pour certains lecteurs, s'adapter aux éventuels défauts du signal HF. Cela explique que les taux d'erreurs résultant du décodage du signal HF diffèrent, parfois très notablement, d'un lecteur à l'autre.

Dans le cas de DVDR ayant subi un vieillissement important, il peut arriver que le système de verrouillage de phase « décroche », la cadence d'horloge dérivant en dehors de la zone dans laquelle l'asservissement est effectif. Le décodage du signal devient alors impossible. Cela ne se produit pas forcément de manière identique sur tous les modèles de lecteur et un disque peut ainsi être illisible avec certains lecteurs et lisible avec d'autres. On a constaté, sur certains types de défauts, un décrochage précoce de l'analyseur Audiodev, en comparaison avec l'analyseur Clover utilisé pourtant à vitesse de lecture plus élevée (cf. § 4.1).

4 ANALYSE DES DVD

Lorsqu'on effectue la lecture d'un disque optique sur un PC, il peut arriver que le disque soit déclaré illisible (ou non formaté). Cela traduit l'incapacité du lecteur à décoder la table (TOC) qui identifie les fichiers et leur position sur le disque. De façon moins dramatique, il peut arriver qu'un fichier soit déclaré corrompu (lors d'une copie par exemple). Cela signifie que des erreurs incorrigibles (POF) ont résisté à plusieurs lectures, même à faible vitesse.

Ces événements nous avertissent, mais un peu tard, de la dégradation d'un disque. L'analyse des DVD, à l'aide d'analyseurs spécifiques, permet d'accéder au nombre des erreurs numériques corrigées par les codes correcteurs ainsi qu'aux caractéristiques (amplitude, contraste de la modulation, etc.) du signal optique utilisé pour le décodage. Ces informations permettent de porter un jugement nuancé sur la qualité d'un disque gravé, au-delà du simple constat lisible / pas lisible.

Il est ainsi possible :

- d'évaluer la qualité de gravure initiale d'un disque et d'y remédier en changeant de graveur ou de modèle de disque,
- de suivre l'évolution dans le temps de la qualité de gravure (vieillesse naturelle, accéléré en température, à la lumière).

4.1 ANALYSEURS UTILISES

Deux modèles d'analyseurs sont utilisés au LNE :

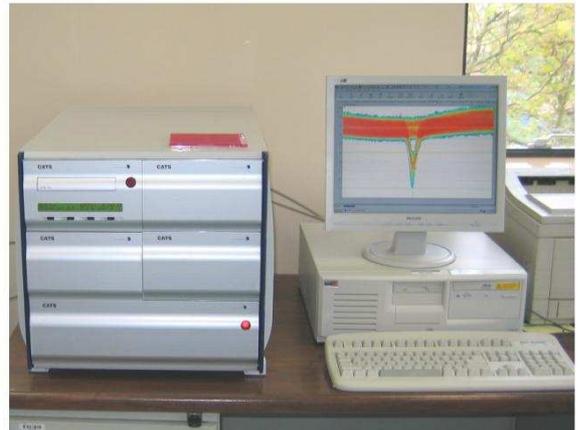
- Analyseur robotisé Clover DVX
- Analyseur Audiodev CATS DVD Pro

Fig. 4.1 – Analyseurs de DVD utilisés

Clover DVX robotisé



Audiodev CATS DVD Pro



Le modèle de marque Clover utilise un lecteur Plextor commercial, modifié pour accéder aux paramètres. Il est robotisé, ce qui permet de tester 100 DVD sans l'intervention d'un opérateur pour insérer chaque disque. Les analyses d'erreurs numériques peuvent être effectuées à différentes vitesses de lecture, jusqu'à 16x. Il est important, pour des analyses comparatives d'utiliser toujours la même vitesse, par exemple 8x qui permet l'analyse d'un disque complet en 20 minutes (2 passages).

Le modèle Audiodev est un analyseur de référence qui ne travaille qu'à la vitesse de lecture 1x. Une analyse d'un disque complet prend près d'une heure. Il délivre les taux d'erreurs numériques, ainsi que de nombreux paramètres relatifs au signal optique et aux signaux de guidage de la tête de lecture (suivi de piste, focalisation).

4.2 ANALYSE DES ERREURS NUMERIQUES

Le paramètre d'erreur le plus utilisé est appelé **PI8** (Inner Parity sur 8 blocs ECC). Le PI8 est lié au premier niveau de correction et il est représentatif du taux d'erreurs aléatoires. Il est défini comme le nombre de lignes avec au moins une erreur dans 8 blocs ECC successifs. Sa valeur maximale est donc de 1664 (8 x 208). La capacité totale d'un DVD est d'environ 143 000 blocs ECC, ce qui correspond à 18 000 valeurs du PI8.

Les courbes de PI8 délivrées par les analyseurs n'ont pas un nombre aussi élevé de points, ce qui signifie qu'un point est une moyenne de plusieurs PI8 successifs. Dans le cas de l'analyseur Clover, il s'agit d'une moyenne sur 2 valeurs successives (courbes ayant jusqu'à 9 000 points). Dans le cas de l'analyseur Audiodev, la moyenne porte sur 1 seconde de signal en lecture 1x correspondant à un peu plus de 5 valeurs de PI8. Le nombre maximal de points d'une courbe fournie par l'analyseur Audiodev est d'environ 3 400. Quel que soit l'analyseur, chaque valeur du PI8 est calculée à partir de plusieurs tours sur le sillon.

La caractérisation des erreurs apparaissant au second niveau de correction est faite par les paramètres suivants :

- **PIF** (Parity Inner Fail) qui est le nombre de lignes non corrigeables dans 1 bloc ECC
- **PO8** (Outer Parity sur 8 blocs ECC) qui est le nombre de colonnes avec au moins une erreur dans 8 blocs ECC successifs
- **POF** (Parity Outer Fail) qui caractérise un bloc ECC non totalement corrigeable

L'apparition d'erreurs au second niveau de correction est soit due à un taux d'erreurs très élevé au premier niveau, soit, le plus souvent à une concentration locale d'erreurs. Les erreurs localisées sont principalement dues aux rayures et autres défauts sur la surface du polycarbonate. Elles peuvent aussi être dues à une poussière sur la surface du disque pendant la gravure. L'intérêt du taux d'erreur PO8 (délivré seulement par l'analyseur Clover) est qu'il permet de repérer simplement la présence de défauts localisés. En effet, un PO8 élevé avec un PI8 normal est la signature d'un défaut localisé.

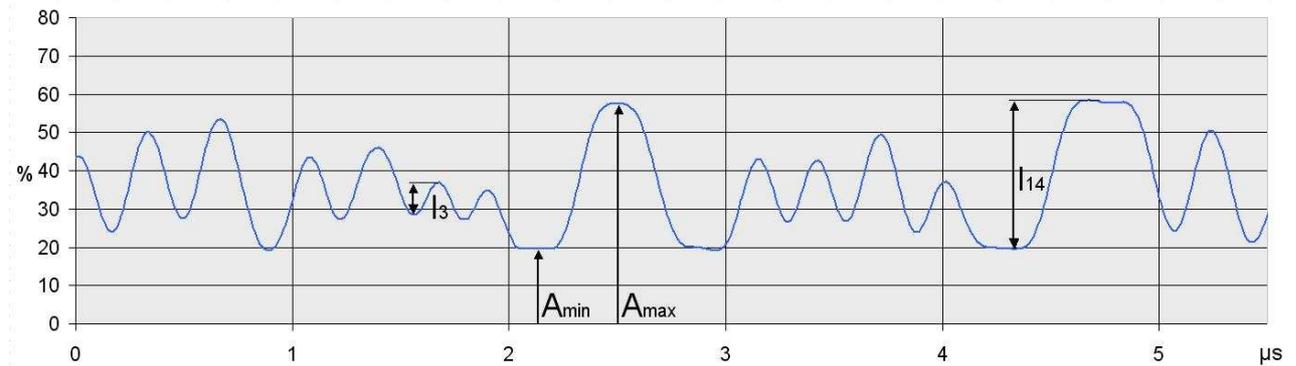
L'analyse des erreurs numériques PI8 est le premier indicateur de la qualité de gravure d'un disque. Toutefois il a été constaté que certains disques présentent des taux d'erreur PI8 très différents selon l'analyseur utilisé. Cela ne met pas en cause la qualité des analyseurs mais s'explique par le processus de décodage (cf. § 4.3) qui possède un certain nombre de paramètres de réglage. Le choix des paramètres de réglage peut être plus ou moins adapté pour un type de défaut particulier. De ce fait, l'utilisation de 2 analyseurs, dont les lecteurs sont de conception différente, permet parfois de détecter des phénomènes qui seraient passer inaperçus en utilisant un seul type d'analyseur. Il est par contre impératif d'utiliser le même analyseur pour des comparaisons de paramètres à différents stades de vieillissement. Dans le cas contraire on peut croire à des évolutions qui ne sont dues qu'au changement d'analyseur.

4.3 ANALYSE DU SIGNAL OPTIQUE

Le signal optique (appelé aussi signal HF) est le signal issu de la tête de lecture. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse renvoyée par le sillon illuminé par le spot laser de longueur d'onde 650 nm (lumière rouge). Cette intensité réfléchie est modulée par les marques faites à la gravure et qui codent l'information numérique. Les zones non gravées (lands) renvoient une intensité maximale, alors que les zones gravées (pits) renvoient une intensité lumineuse moindre.

La figure 4.2 montre une portion de signal HF issu de l'analyseur Audiodev en lecture d'un DVD-R. L'ordonnée est graduée en pourcentage d'une réflectivité de référence.

Fig. 4.2 – Exemple de signal HF issu de l'analyseur Audiodev (DVD-R)



L'amplitude du signal est maximale sur les lands de grande longueur et atteint, sur cet exemple, un peu moins de 60% de la réflectivité de référence. Elle est minimale sur les pits de grande longueur avec ici une valeur de 20%. On note ces amplitudes extrêmes A_{max} et A_{min} .

Le diamètre du spot laser est plus grand que les marques (pits ou lands) de petite taille. Lorsque le spot est au milieu d'un pit 3T, il couvre aussi une partie des deux lands adjacents et la réflectivité, pour la totalité du faisceau, est intermédiaire entre A_{max} et A_{min} . En termes mathématiques, le signal HF résulte de la convolution de la réflectivité du disque par le profil géométrique du faisceau. Cette convolution réalise un filtrage passe-bas qui atténue les fréquences les plus élevées associées aux marques les plus courtes.

On a donc une amplitude de modulation différente selon la longueur des marques. L'amplitude maximale de modulation I_{14} est celle des marques les plus longues (14T) L'amplitude minimale de modulation I_3 est celle des marques les plus courtes (3T). Les principaux paramètres caractéristiques du signal HF sont décrits ci-après.

Amplitude A_{max}

L'amplitude A_{max} est caractéristique du sillon non gravé et ne dépend donc pas (ou très peu) du graveur. La faible dépendance vis à vis du graveur provient de l'influence des sillons adjacents sur lequel des pits peuvent se trouver, en vis à vis du land sur lequel est focalisé le laser.

A_{max} résulte de l'interférence entre la lumière renvoyée par le sillon proprement dit et celle renvoyée par l'inter-sillon (ou plateau). En effet, le spot focalisé a un diamètre supérieur à la largeur du sillon et il recouvre le sillon et une partie de l'inter-sillon, avec une surface effective à peu près égale. La valeur de A_{max} dépend de différents paramètres du modèle de disque, les principaux étant (cf. annexe 1) :

- la profondeur du sillon,
- l'épaisseur du colorant dans le sillon et sur le plateau,
- l'indice optique du colorant (indice de réfraction n).

A_{max} correspond au paramètre **R14H** fourni par l'analyseur Audiodev.

Amplitude A_{min}

A_{min} est caractéristique du sillon gravé et dépend à la fois du modèle de disque et du graveur. Comme pour les lands, la réflectivité des pits résulte de l'interférence entre la partie du faisceau laser renvoyée par le sillon et celle renvoyée par l'inter-sillon. La différence de réflectivité entre pit et land provient de la dégradation du colorant par la chaleur produite lors de la gravure. Cette dégradation peut être plus ou moins complète selon la puissance émise par le laser. Elle se fait à température relativement élevée (250°C) et peut s'accompagner de déformations locales du sillon. Il s'agit donc d'un phénomène complexe qu'il est difficile d'appréhender en détail. L'effet principal de la gravure reste toutefois la baisse de l'indice optique du colorant après sa dégradation.

Contraste pit / land

Le contraste maximal pit / land est défini par le rapport $\frac{A_{\max} - A_{\min}}{A_{\max}} = \frac{I_{14}}{A_{\max}}$

Il correspond au paramètre **I14 / I14H** fourni par l'analyseur Audiodev.

On définit aussi le contraste minimal (marques 3T) par $\frac{I_3}{A_{\max}}$

Note : L'amplitude minimale A_{\min} n'est pas donnée directement par l'analyseur Audiodev mais peut être calculée facilement à partir des paramètres R14H et I14 / I14H. Le contraste peut être moins facile à interpréter que A_{\min} et A_{\max} séparément, car il combine les phénomènes de dégradation se produisant sur les lands et ceux se produisant sur les pits.

Symétrie

Le signal HF est dit asymétrique lorsque la composante continue M_3 de la modulation 3T n'est pas égale à celle de la modulation 14T, c'est à dire $M_{14} = \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2}$.

On définit le paramètre d'asymétrie par $ASYM = \frac{M_3 - M_{14}}{A_{\max}}$.

L'existence d'une asymétrie du signal HF résulte du fait que la longueur des marques gravées (pits) est en moyenne trop courte (ASYM positif) ou en moyenne trop longue (ASYM négatif). Nous verrons que cela est fortement lié à la puissance du graveur lors de l'écriture des marques.

Déviations des longueurs des pits et des lands

Définissant la longueur d'un pit ou d'un land par l'écart entre deux transitions successives (§ 3.4), il est clair que la longueur des pits et des lands est relative au seuil de décision : si l'on abaisse ce seuil, la longueur moyenne des lands va augmenter et celle des pits va diminuer. Le seuil de décision est précisément choisi pour que la longueur moyenne des lands soit égale à celle des pits.

On appelle déviation de longueur d'un type de land ou de pit, l'écart entre sa valeur théorique et sa valeur réelle. De par la définition du seuil de décision, la valeur moyenne des déviations des différents types de pits (3T, 4T, ..., 14T) est égale à 0, si chaque déviation est pondérée par la proportion de pits du type considéré. Il en est de même de la valeur moyenne des déviations des lands.

Ainsi, le paramètre de symétrie caractérise les longueurs physiques moyenne des zones gravées en comparaison des zones non gravées, alors que les déviations caractérisent des écarts de longueur spécifiques à certaines zones, par exemple les pits 3T.

Jitter

La notion de jitter (ou gigue) caractérise :

- la statistique des longueurs des pits et lands. Il s'agit alors de « DD jitter » (Data to Data)
- la statistique des positions des transitions vis à vis des tops d'horloge. Il s'agit alors de « DC jitter » (Data to Clock).

Le DD jitter ne dépend que de l'asservissement du seuil de décision, alors que le DC jitter dépend en plus de l'asservissement de l'horloge.

Une gravure idéale donnerait des pits et lands de longueur constante pour chaque type (3T, 4T, ..., 11T, 14T). Cela n'est pas vérifié pratiquement et on a une distribution caractéristique des longueurs des pits et lands ainsi que des positions des transitions vis à vis des tops d'horloge. Le jitter représente l'écart-type de ces distributions.

Les figures 4.3 et 4.4 donnent un exemple d'histogrammes de ces distributions. Ces histogrammes ont été obtenus à l'aide d'un logiciel spécifique réalisant l'analyse statistique d'une portion du signal HF. Le signal HF correspondant aux figures 4.3 et 4.4 a été fourni par l'analyseur Audiodev en lecture d'un DVD-R correctement gravé. Le nombre de transitions prises en compte est de 442 668 sur une portion de signal représentant 28 cm sur le sillon. L'ordonnée des graphiques représente le nombre de pits (figure 4.3) ou de transitions (figure 4.4). L'abscisse est exprimée en durée (ns) pour l'histogramme des longueurs et en fraction de la cadence d'horloge (ΔT) pour l'histogramme des positions des transitions.

Le DD jitter des pits 3T caractérise l'élargissement de la distribution autour de la durée théorique des pits 3T. Il est exprimé en ns. Le DC jitter caractérise l'écart-type de la distribution des positions des transitions vis à vis des tops d'horloge. Il est exprimé en pourcentage de la cadence d'horloge.

Sur l'histogramme des longueurs des pits, on constate que les pits courts (3T ou 4T) sont en nombre nettement plus importants que les pits longs (10T ou 11T). Cela tient au code EFM+. Il en résulte que l'histogramme des positions des transitions et le DC jitter sont surtout dépendants des pits les plus courts.

Fig. 4.3 – Histogramme des longueurs des pits

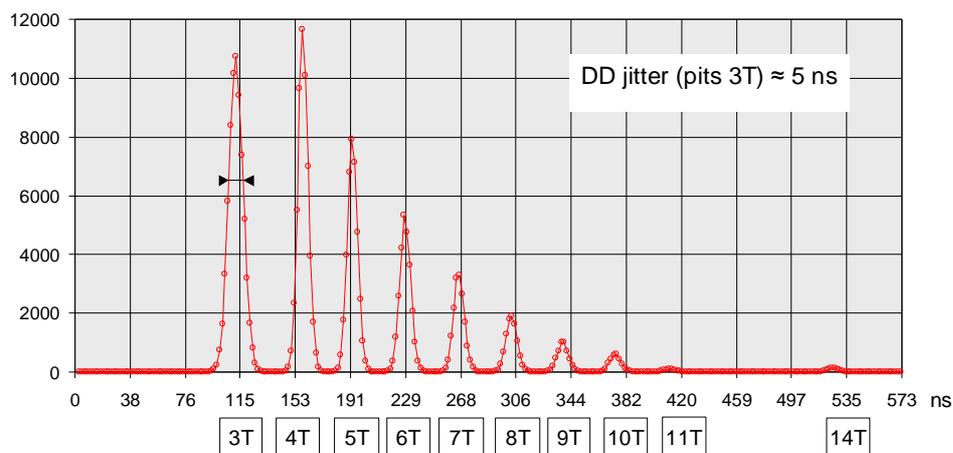
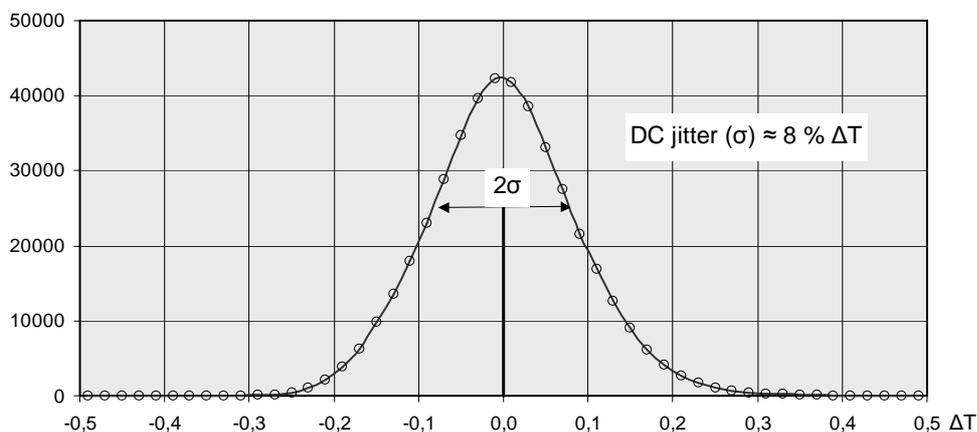


Fig. 4.4 – Histogramme positions des transitions relativement aux tops d'horloge



Les erreurs numériques proviennent de transitions dont la position est décalée de plus d'une demi-période d'horloge ($0,5 T$). Ces transitions sont, pour un DVDR correctement gravé, en proportion très faible, de l'ordre de 10^{-5} de l'ensemble des transitions.

L'histogramme des positions des transitions étant limité à l'intervalle $[-0,5 \Delta T ; +0,5 \Delta T]$, une estimation des taux d'erreurs ne peut être faite que par prolongement de l'histogramme. Il apparaît que les erreurs sont en relation avec les « queues » de la distribution, tandis que le jitter est en relation avec la partie centrale de la distribution. De ce fait il n'y a pas forcément une grande corrélation entre jitter et erreurs numériques. La corrélation n'existe que si la forme de la distribution est toujours la même, par exemple gaussienne. Nous verrons que pour des disques mal gravés ce n'est en général pas le cas.

4.3 PARAMETRES DE TRACKING

Le « tracking » de la tête de lecture concerne le mouvement radial de la tête pour lui permettre d'être correctement centré sur le sillon à tout moment. L'asservissement pour ce suivi est fait à l'aide d'informations provenant de faisceaux secondaires du laser (système tri-faisceau).

Les basses fréquences du signal d'asservissement sont principalement liées aux défauts localisés qui se manifestent sous forme d'impulsions, alors que les hautes fréquences prennent en compte des fluctuations de position à courte échelle.

L'analyseur Audiodev fournit deux paramètres qui sont relatifs à l'écart-type des fluctuations radiales de la tête de lecture et qui sont exprimés en nm :

- Radial₁ : Ecart-type des fluctuations de fréquence inférieure à 1,1 kHz
- Radial₂ : Ecart-type des fluctuations sur la bande de fréquence 1,1kHz – 10kHz

Compte tenu de la vitesse de défilement de la tête (3,5 m/s en lecture 1x), la fréquence de 1,1kHz correspond à une distance de l'ordre de 3mm sur le sillon.

Pour les études de vieillissement, on s'intéresse surtout au paramètre **Radial₂**.

5 LA GRAVURE DES DVDR

5.1 PRINCIPE

Le but de la gravure des DVD enregistrables est de réaliser des marques sur le sillon dont la longueur et le positionnement sont définis avec précision, afin d'être à même de relire l'information numérique. Le laser de lecture est le même que celui de gravure, mais utilisé à une puissance bien moindre.

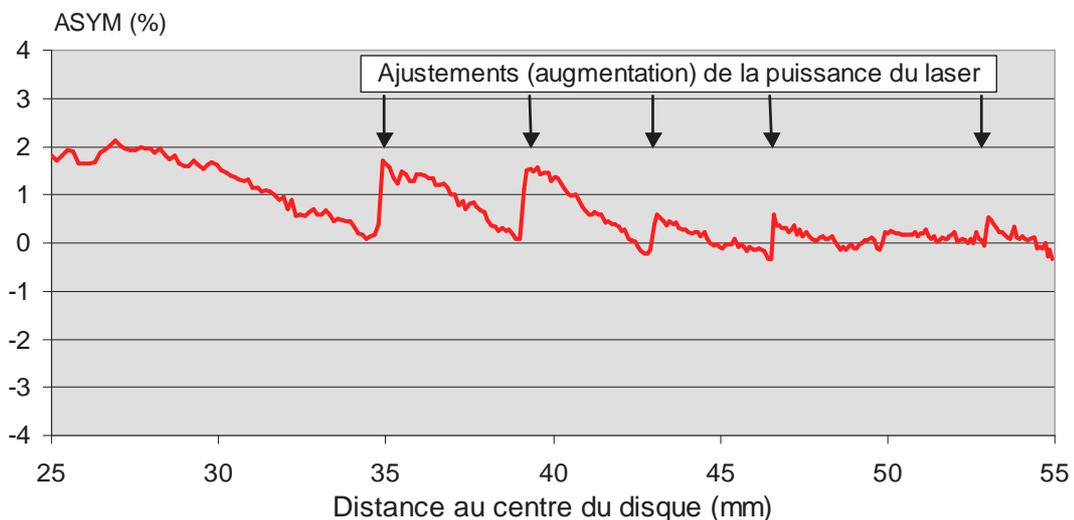
La gravure est faite par focalisation du faisceau laser sur la couche sensible (colorant) qui absorbe suffisamment la longueur d'onde de 580 nm pour être porté localement à haute température (250 à 300°C). Cette température élevée entraîne la décomposition du colorant et peut s'accompagner également de déformations dues à la pression générée par la température. L'effet principal reste toutefois la décomposition du colorant dont l'indice de réfraction est modifié. Il en résulte une modification de la réflectivité du sillon dans les zones ainsi brûlées. Cette modification d'indice est une baisse, car l'indice des colorants utilisés est très élevé (compris entre 2 et 2,5) par rapport aux constituants plus ordinaires que sont les produits de la dégradation dont l'indice est sans doute plutôt de l'ordre de 1,5. Afin d'avoir un contraste maximum, il est souhaitable que la décomposition du colorant soit la plus complète possible sur les zones gravées (pits). Un modèle simplifié de l'effet de la gravure sur la réflectivité du sillon est donné en annexe 1.

5.2 AJUSTEMENT DE LA PUISSANCE DU LASER

Si la puissance du laser est trop faible, on peut n'obtenir qu'une dégradation partielle du colorant en raison d'une température locale insuffisante. Si l'on augmente la puissance du laser au-delà de la puissance nécessaire, on va obtenir un allongement des pits par transfert thermique dans le sillon. En effet la chaleur apportée ponctuellement par le laser diffuse et peut décomposer le colorant sur une longueur anormalement grande.

L'asymétrie du signal HF est très sensible à ce phénomène et la puissance du laser peut être réglée en maintenant le paramètre ASYM dans une gamme de valeurs correctes (par exemple entre 0 et +5%). Cet ajustement de la puissance du laser est absolument nécessaire lorsque la gravure est effectuée à vitesse angulaire constante (mode CAV). En effet, pour une même puissance du laser, la puissance fournie au colorant est inversement proportionnelle à la vitesse linéaire. En mode CAV, la puissance effective décroît donc proportionnellement à la distance au centre du disque. Cette baisse de puissance doit être compensée par l'augmentation de la puissance du laser. La figure 5.1 montre la variation du paramètre ASYM en fonction de la distance au centre d'un DVD-R gravé en mode CAV. On observe des ruptures de la courbe qui correspondent à des ajustements de la puissance du laser lors de la gravure.

Fig. 5.1 – Variations du paramètre ASYM en fonction de la position sur le disque



5.3 STRATEGIE DE GRAVURE

La stratégie de gravure définit comment la puissance du laser doit être modulée pour inscrire des marques dont la longueur soit la plus proche possible de la longueur théorique (3T, 4T, ..., 11T)

Aux faibles vitesses de gravure, on utilise la stratégie d'écriture par impulsions. Durant la gravure, le laser ne fonctionne pas en continu, mais génère des impulsions de courtes durées (inférieure à 1T). Pour les pits longs, la première et la dernière impulsion sont plus longues. Pour les pits 3T on utilise une seule impulsion.

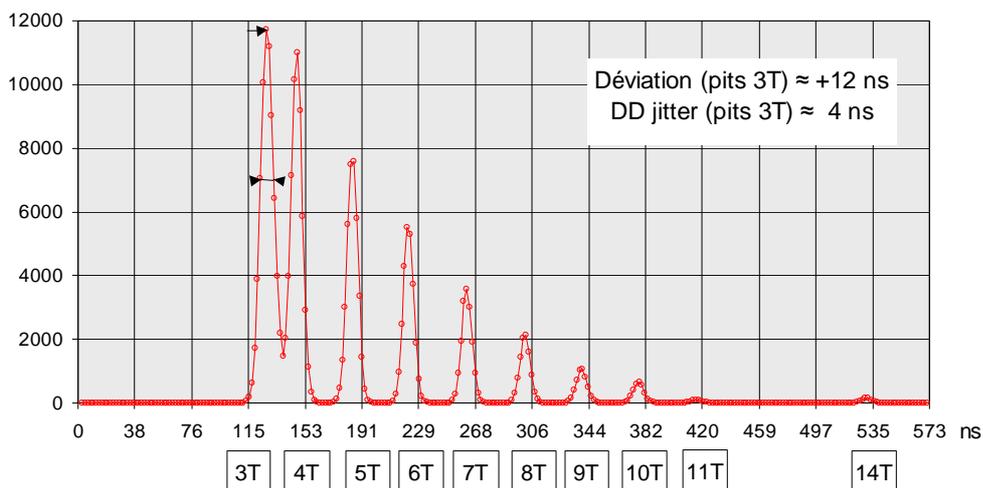
Aux vitesses de gravures élevées (supérieures à 4x) la stratégie utilisée est celle dite en château. Le laser fonctionne en continu sur toute la longueur du pit, avec un renforcement de l'intensité au début et à la fin.

La stratégie précise dépend des caractéristiques particulières de chaque modèle de DVD-R, comprenant la nature chimique du colorant, la nature ainsi que l'épaisseur de la couche métallique qui conditionne la vitesse de diffusion de la chaleur. Les modalités de gravure sont d'une part inscrites sur le disque lui-même et d'autre part peuvent être en mémoire du graveur qui reconnaît chaque modèle de DVDR pour choisir une stratégie adaptée. Pour ce dernier point, il est important que le firmware du graveur soit à jour pour le modèle de DVDR à graver.

L'exemple ci-après (figures 5.2 et 5.3) montre l'effet d'une mauvaise stratégie de gravure qui a conduit à l'allongement excessif des pits 3T vis à vis des pits 4T, 5T, ...

L'allongement des pits 3T se remarque sur l'histogramme des longueurs des pits. La position du premier maximum de l'histogramme se trouve décalée d'environ 12 ns par rapport à sa position théorique, soit près d'un tiers de la période d'horloge (38 ns). Le DD jitter des pits 3T reste bon, ce qui signifie que la précision de gravure est bonne, mais avec des pits 3T systématiquement trop longs.

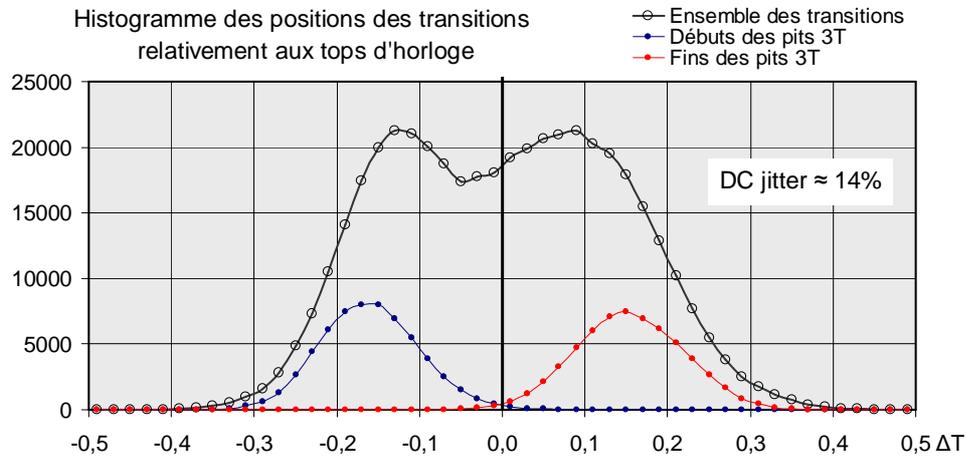
Fig. 5.2 – Histogramme des longueurs des pits produit par une mauvaise stratégie de gravure



L'histogramme des positions des transitions vis à vis des tops d'horloge est la superposition de deux courbes décalées toutes deux d'allure gaussienne (figure 5.3). Ces deux courbes sont en grande partie constituées par les transitions de début des pits 3T et les transitions de fin des pits 3T. Les débuts de pits 3T sont en avance par rapport aux tops d'horloge (courbe de gauche), alors que les fins de pits 3T sont en retard (courbe de droite).

En raison de la déviation des pits 3T, le DC jitter est très important (14% de la période d'horloge). Toutefois, le taux d'erreur PI8 n'est pas très élevé (inférieur à 100). Un DC jitter de 14%, avec une distribution gaussienne, donnerait des PI8 supérieurs à la limite normalisée de 280.

Fig. 5.3 – Histogramme des positions des transitions produit par une mauvaise stratégie de gravure



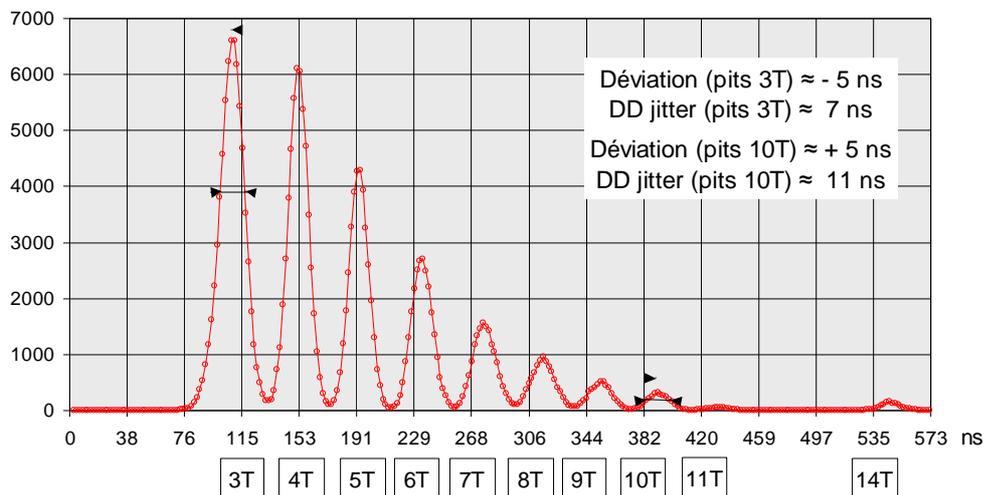
Sur cet exemple, le défaut de gravure est détectable par le DC Jitter qui est anormalement élevé. Les graveurs peuvent parfois utiliser ce paramètre pour optimiser leur stratégie de gravure.

5.4 PRECISION DE GRAVURE

La précision de gravure concerne la stabilité de la position des débuts et des fins de pits. La stabilité de la longueur des pits en découle. L'exemple suivant et montre une faible précision de gravure qui peut être constatée aussi bien sur l'histogramme des longueurs des pits (figures 5.4) que sur l'histogramme des positions des transitions vis à vis des tops d'horloge (figure 5.5).

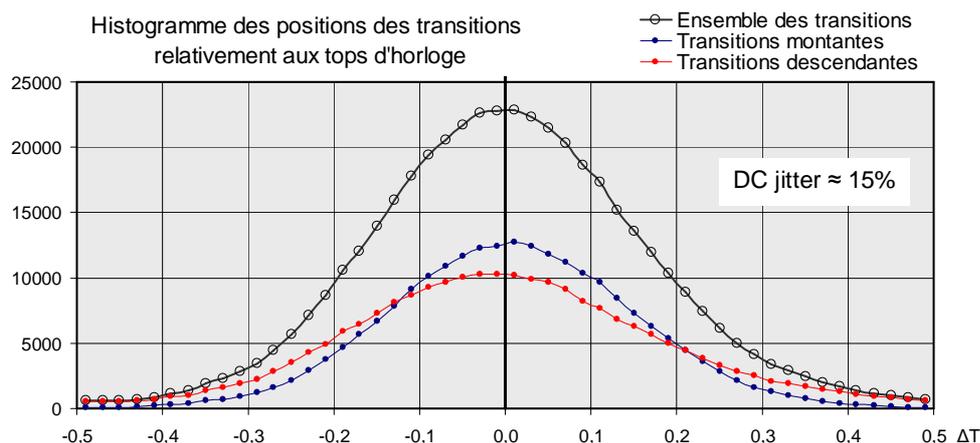
L'histogramme des longueurs des pits fait apparaître une légère déviation négative (-5 ns) des longueurs des pits 3T qui sont donc trop courts. Les pits plus longs ont des déviations positives qui vont de 0 pour les pits 4T à +5 ns pour les pits 10T. Le DD jitter des pits est d'autant plus important que les pits sont longs : de 7ns pour les pits 3T à 11ns pour les pits 10T. Ces valeurs de DD jitter correspondent à une faible précision de gravure.

Fig. 5.4 – Histogramme des longueurs des pits associé à une mauvaise précision de gravure



L'histogramme des positions des transitions est très élargi avec un DC jitter de 15%. Contrairement à l'exemple du paragraphe 5.3, l'allure de la distribution est gaussienne. En distinguant les transitions descendantes (début de pits) et les transitions montantes (fin de pits), on constate que les débuts de pits ont une distribution plus élargie que les fins de pits. Ce sont donc les débuts de pits qui sont particulièrement imprécis. L'impact sur les taux d'erreurs PI8 est considérable, avec des valeurs supérieures à 1000. En toute fin de disque, l'analyseur Audiodev est même incapable d'accrocher l'horloge au signal HF, ce qui rend impossible le décodage des données numériques. Les erreurs numériques sont moins importantes avec l'analyseur Clover.

Fig. 5.5 – Histogramme des positions des transitions associé à une mauvaise précision de gravure



Sur cet exemple, il est difficile de dire si le problème provient du modèle de DVDR ou du graveur. Avec le même graveur, on a constaté une amélioration en abaissant la vitesse de gravure qui était ici de 8x (CAV).

On constate aussi que la dégradation de la précision de gravure augmente lorsqu'on s'éloigne du centre du disque, donc lorsque la vitesse linéaire d'écriture augmente. Il semble que la difficulté provienne de la chaleur qui se propage aux extrémités des pits, particulièrement sur le début des pits (transitions descendantes). Ce transfert thermique mal maîtrisé conduit à une incertitude élevée de la position des transitions.

L'extrapolation de la distribution gaussienne de la figure 5.5 indique que de nombreuses transitions sont décalées de plus d'une demi-période d'horloge, ce qui produit des erreurs en nombre trop important pour être corrigées.

6 VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE

Les DVD enregistrables sont sensibles à la lumière. Il a été constaté que les DVD±R avaient une sensibilité nettement plus importante que les DVD réenregistrables (DVD±RW). Les DVD±R sans couche métallique (cf. §2.3) ont, comme les DVD réenregistrables, une faible sensibilité à la lumière. Cela montre que la lumière agit sur la couche de colorant organique des DVD±R classiques. Seul ce type de disque est étudié dans la suite de ce chapitre.

6.1 DESCRIPTION DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE

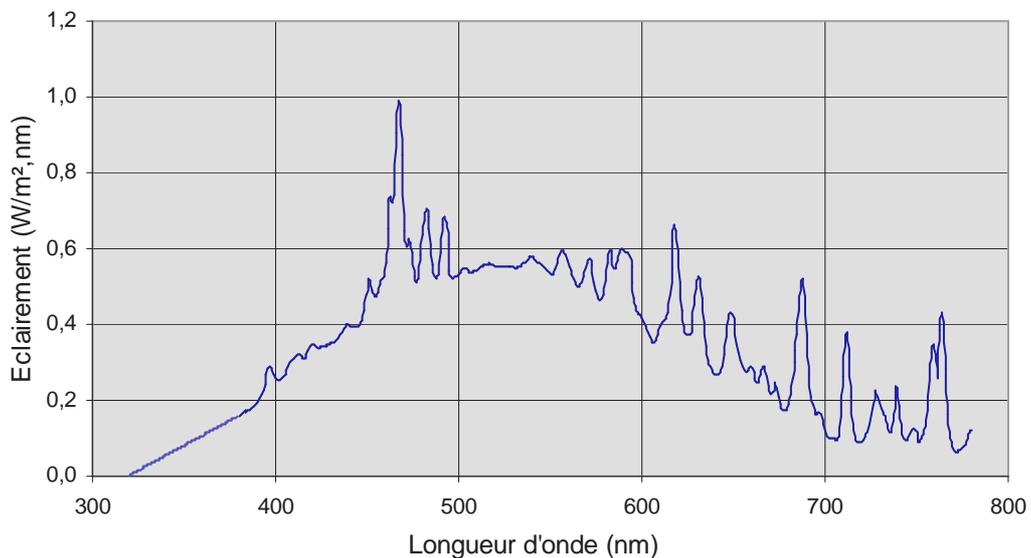
Afin de quantifier l'action de la lumière, les disques sont placés dans une enceinte dans laquelle le niveau lumineux est très élevé (environ 4 fois l'intensité lumineuse du soleil direct). On utilise une enceinte du type « Suntest » fabriquée par la société Atlas (modèle XLS).

Fig. 6.1 - Enceinte « Suntest » Atlas XLS



Cet appareil est équipé d'une lampe à arc au xénon de 2200 W. Des filtres infrarouges et ultraviolets sont utilisés pour que le spectre de la lumière se rapproche du spectre solaire filtré par une vitre, comme c'est le cas à l'intérieur des locaux. Le spectre de la lumière émise à l'intérieur de l'enceinte est montré sur la figure 6.2.

Fig. 6.2 - Spectre lumineux dans l'enceinte « Suntest »



L'enceinte est utilisée à sa puissance maximale qui produit un éclairage de 750 W/m^2 sur la bande des longueurs d'onde comprises entre 300 et 800 nm. La température à l'intérieur de l'enceinte est régulée à 25°C . Les disques sont éclairés sur leur face du côté lecture. La lumière atteint le colorant après avoir traversé une épaisseur de polycarbonate (transparent) de 0,6 mm.

Afin de suivre l'évolution des différents paramètres, une analyse des disques est effectuée toutes les 40 heures d'exposition. La durée totale de l'exposition dépend de la sensibilité à la lumière du modèle de DVD. Elle est limitée à 10 jours pour les modèles les moins sensibles. Une exposition de 10 jours à 750 W/m^2 correspond à une exposition d'environ 20 ans sous un éclairage de 700 lux.

6.2 EVOLUTION DES PARAMETRES DE 6 MODELES DE DVD-R

On présente ici des résultats d'exposition à la lumière de 6 modèles de DVD-R testés dans le cadre d'une étude pour les Archives de France (SIAF) réalisée en 2011. La tenue à l'exposition à la lumière du Suntest (750 W/m^2) est très différente selon les modèles. Le tableau de la figure 6.3 donne les durées maximales supportées par les 6 modèles. Ces durées s'échelonnent entre 40 et 240 heures. Il existe des modèles de DVDR qui ne résistent pas à une exposition de 40 heures.

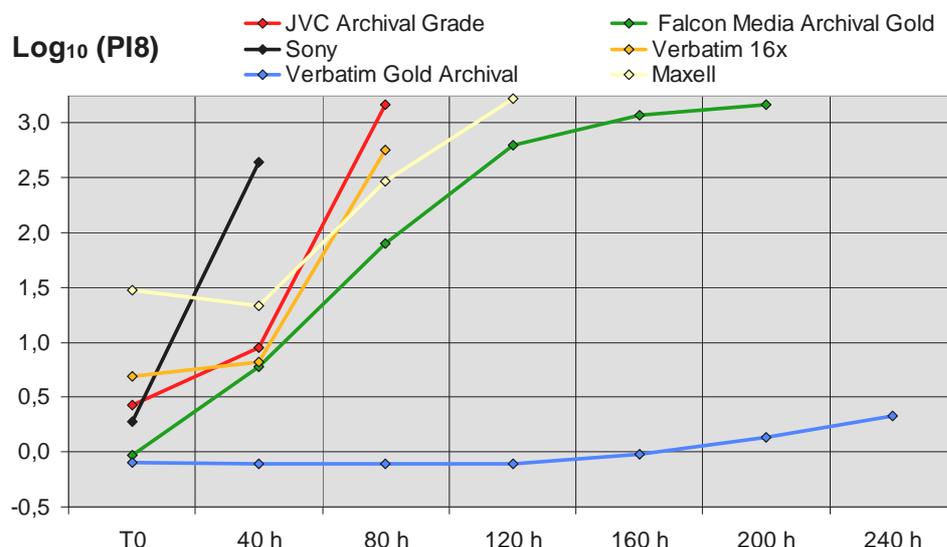
Fig. 6.3 – 6 modèles de DVDR soumis au vieillissement à la lumière

Fournisseur	Modèle	Identification du fabricant		Couche métallique	Type de colorant	Vitesse de gravure maximale	Durée max d'exposition à la lumière
		Code MID					
Verbatim	Gold Archival	MCC 02RG20	Mitsubishi	Ag + Au	Azoïque	8x	240 heures
FTI (Falcon Media)	Gold Archival	TTG02	TDK	Ag + Au	Cyanine	8x	200 heures
Maxell		RITEKF1	Ritek	Ag	Cyanine	16x	120 heures
Verbatim		MCC 03RG20	Mitsubishi	Ag	Azoïque	16x	80 heures
JVC Advanced Media	Archival Grade	TYG03	Taiyo Yuden	Ag	Cyanine	16x	80 heures
Sony		SONY16D1	Sony	Ag	Cyanine	16x	40 heures

Erreurs numériques PI8

Le graphe de la figure 6.4 montre l'évolution des erreurs PI8 (moyenne sur le disque) en fonction de la durée d'exposition. La représentation est en échelle logarithmique.

Fig. 6.4 – Evolution des erreurs PI8 en fonction de la durée d'exposition à la lumière

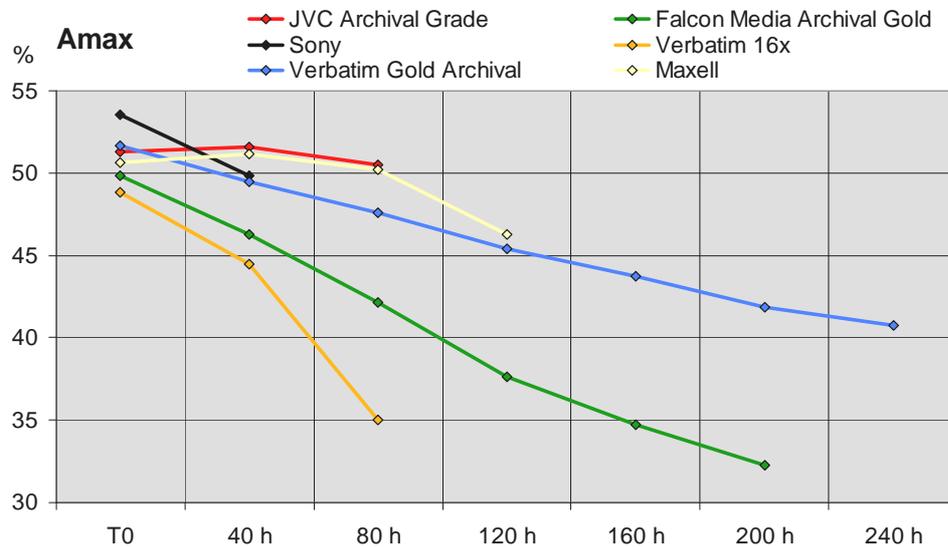


Le modèle Verbatim Gold Archival a une tenue remarquable, en terme d'erreurs numériques, par rapport aux autres modèles.

L'évolution des paramètres caractéristiques du signal HF est présentée sur les graphes des figures 6.5 à 6.9. Pour chaque graphe, on a porté les valeurs moyennes sur le disque du paramètre considéré.

Amplitude maximale A_{max} du signal HF

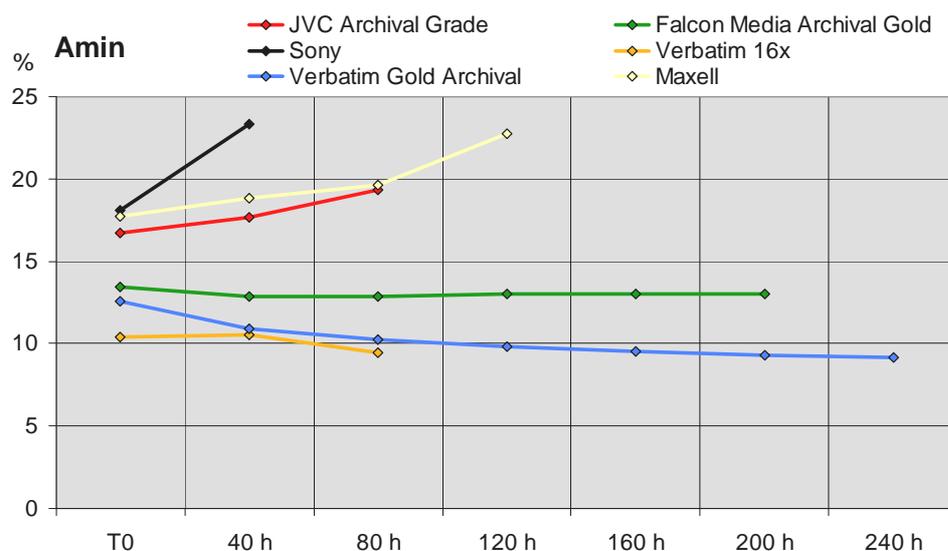
Fig. 6.5 – Evolution de l'amplitude A_{max} en fonction de la durée d'exposition à la lumière



On constate une décroissance de A_{max} avec la durée d'exposition qui est plus ou moins rapide selon les modèles. La tenue à la lumière n'est pas uniquement liée à la baisse de A_{max} car certains modèles dont la tenue dans le temps est limitée (JVC, Maxell) ont une décroissance de A_{max} peu marquée en comparaison de modèles comme le modèle Falcon qui présente une baisse importante de A_{max} sans apparition d'erreurs numériques importantes.

Amplitude minimale A_{min} du signal HF

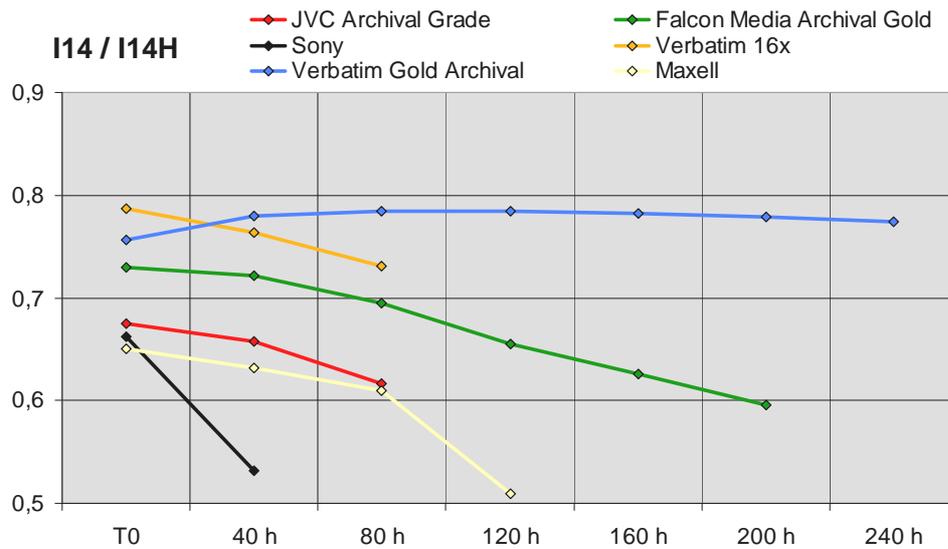
Fig. 6.6 – Evolution de l'amplitude A_{min} en fonction de la durée d'exposition à la lumière



L'amplitude minimale correspond à la réflectivité des zones gravées (pits). Elle peut augmenter, être stable ou diminuer avec la durée d'exposition à la lumière. Les modèles de DVD-R pour lesquels A_{min} augmente n'ont pas une excellente tenue à la lumière.

Contraste pit / land

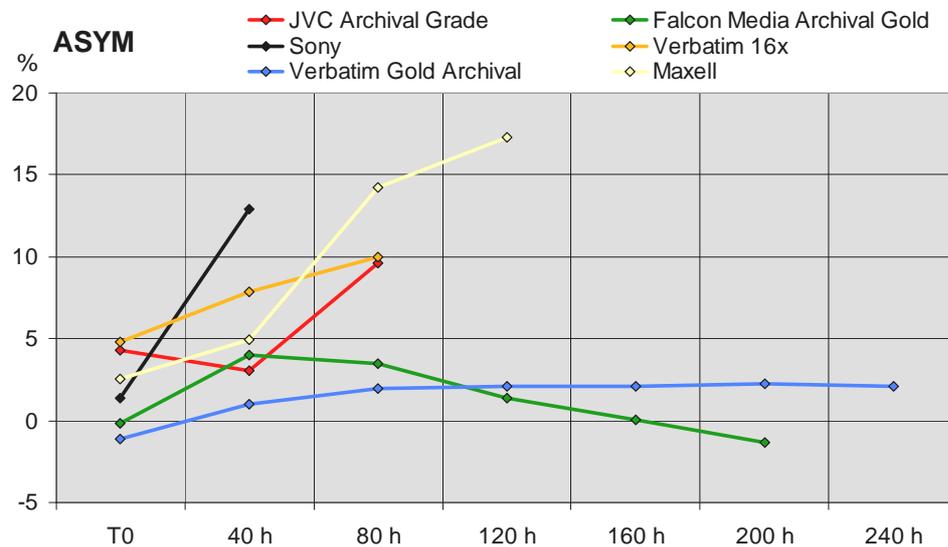
Fig. 6.7 – Evolution du contraste I_{14} / I_{14H} en fonction de la durée d'exposition à la lumière



L'évolution du contraste pit / land est une combinaison de l'évolution de A_{max} et A_{min} . On observe toujours une baisse du contraste, sauf pour le modèle Verbatim Archival qui est aussi le plus résistant à l'exposition à la lumière.

Asymétrie du signal HF

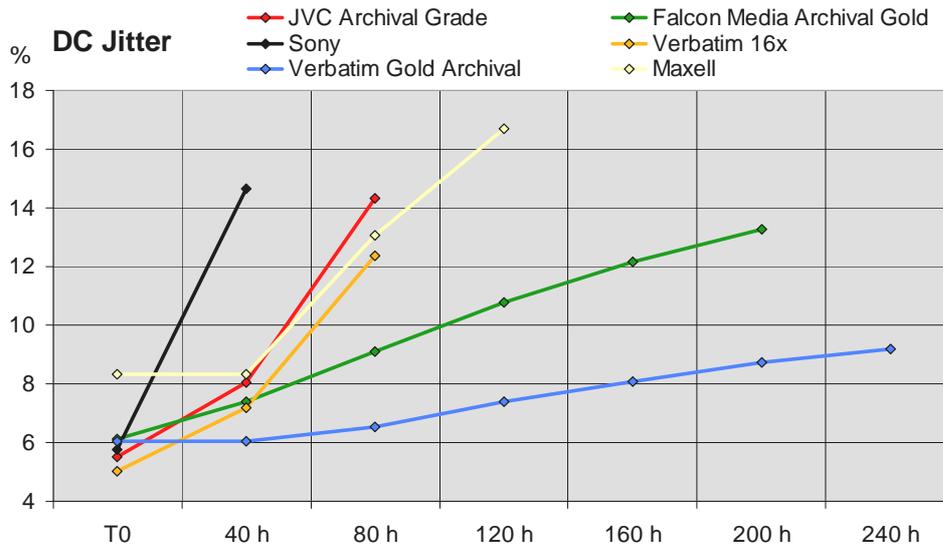
Fig. 6.8 – Evolution du paramètre ASYM en fonction de la durée d'exposition à la lumière



Le plus souvent, le paramètre ASYM augmente avec la durée d'exposition. Les fortes augmentations de ASYM correspondent à des modèles à faible tenue à la lumière.

Jitter

Fig. 6.9 – Evolution du DC jitter en fonction de la durée d'exposition à la lumière



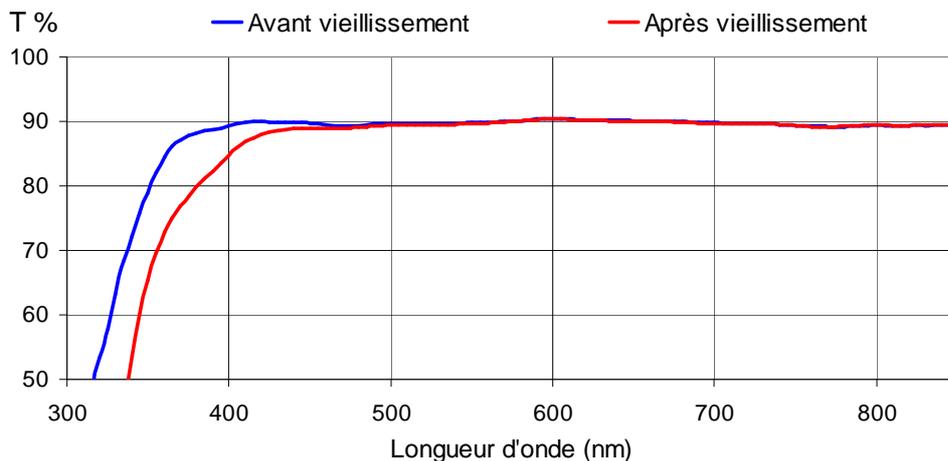
Les 6 modèles de DVD-R présentent une augmentation du jitter avec la durée d'exposition à la lumière qui est plus ou moins rapide selon le modèle.

6.3 EFFET DE LA LUMIERE SUR LA TRANSPARENCE DU POLYCARBONATE

La variation des amplitudes A_{\max} et A_{\min} du signal HF pourrait être due en partie à une modification de l'absorbance du polycarbonate qui deviendrait moins transparent à la lumière du faisceau laser de lecture. Afin de vérifier cette hypothèse, on a mesuré la transmission à la lumière d'un substrat de CD en polycarbonate. Cette mesure a été effectuée à l'aide d'un spectrophotomètre, avant et après une exposition de 192 heures au Suntest avec un éclairage de 750 W/m^2 .

La figure 6.10 donne la valeur de la transmission en fonction de la longueur d'onde de la lumière. On constate que le vieillissement à la lumière du polycarbonate fait baisser sa transmission aux longueurs d'onde inférieures à 400 nm (domaine UV). A la longueur d'onde du laser de lecture d'un DVD (650 nm), la baisse n'excède pas 0,1%. Cette modification de transparence du polycarbonate est négligeable vis à vis des variations des amplitudes A_{\max} et A_{\min} qui sont mesurées sur les DVDR exposés à la lumière. Elle n'est pas prise en compte dans les calculs du paragraphe 6.4.

Fig. 6.10 – Transmission lumineuse d'un substrat en polycarbonate d'épaisseur 1,2 mm avant et après exposition à la lumière (192 heures - 750 W/m^2)



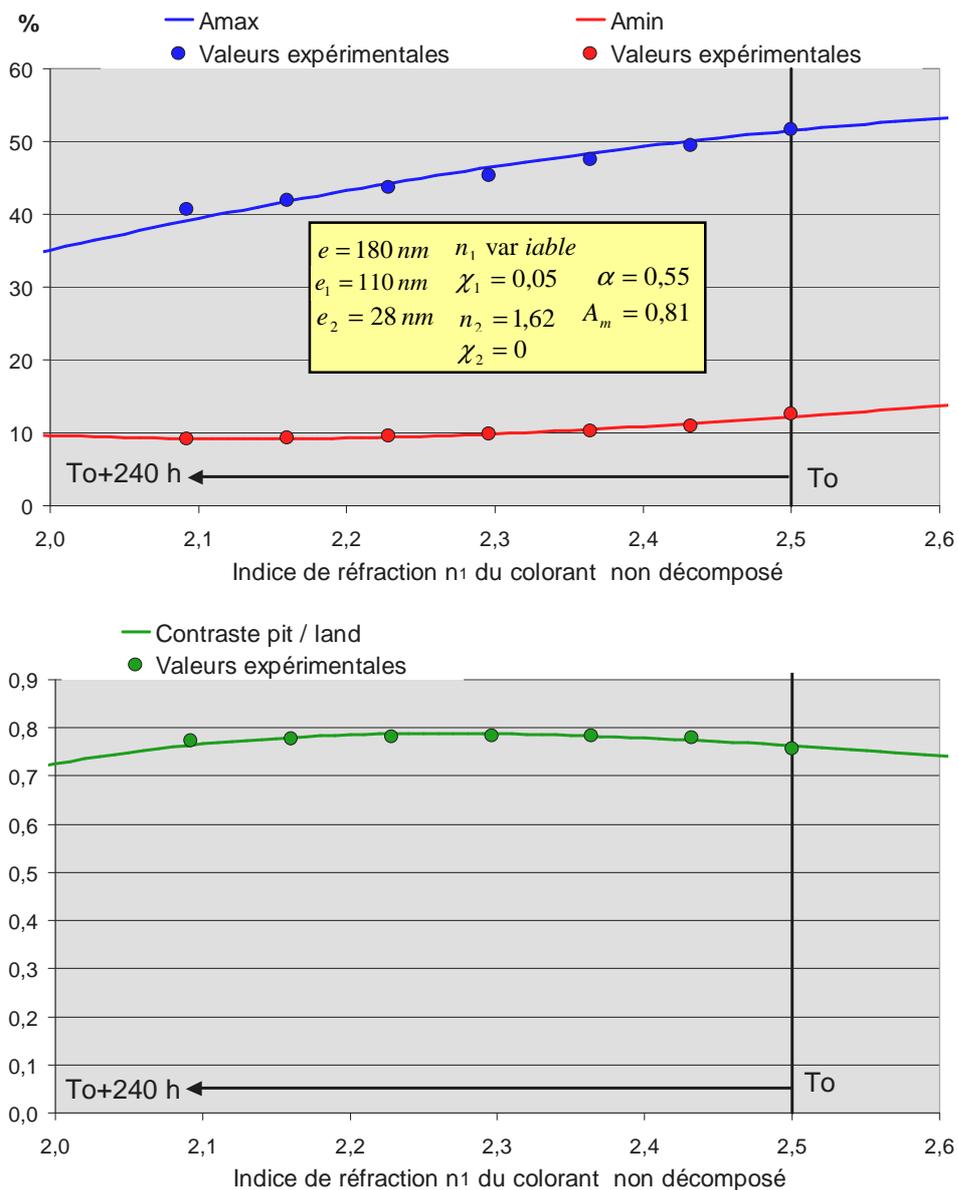
6.4 MODELISATION DE L'EVOLUTION DES AMPLITUDES ET DU CONTRASTE DU SIGNAL HF

Partant du modèle de calcul développé en annexe 1, on a cherché à simuler les évolutions de A_{max} , A_{min} et du contraste pit / land pour deux modèles typiques des évolutions rencontrées en vieillissement à la lumière. L'hypothèse est que l'exposition à la lumière décompose le colorant non gravé en modifiant ses indices optiques (n_1 et χ_1) dans le sens d'une baisse. Les figures 6.11 et 6.12 présentent des évolutions de A_{max} , A_{min} et du contraste calculées en faisant l'hypothèse que la baisse de l'indice n_1 est proportionnelle à la durée d'exposition à la lumière. Les valeurs choisies des paramètres à T_0 (avant exposition) sont données dans le cartouche jaune superposé au graphe de A_{max} et A_{min} . Les notations sont celles de l'annexe 1.

Modèle de DVD-R Verbatim Gold Archival

Ce modèle a une très bonne tenue à l'exposition à la lumière qui s'accompagne d'une baisse régulière de A_{max} et A_{min} (quasi linéaire pour A_{max}) et d'une bonne stabilité du contraste. On observe dans un premier temps une légère augmentation du contraste. Pour en rendre compte, on a été amené à choisir les paramètres dimensionnels et les indices optiques de manière à ce qu'avant vieillissement, on se situe au-delà du maximum du contraste.

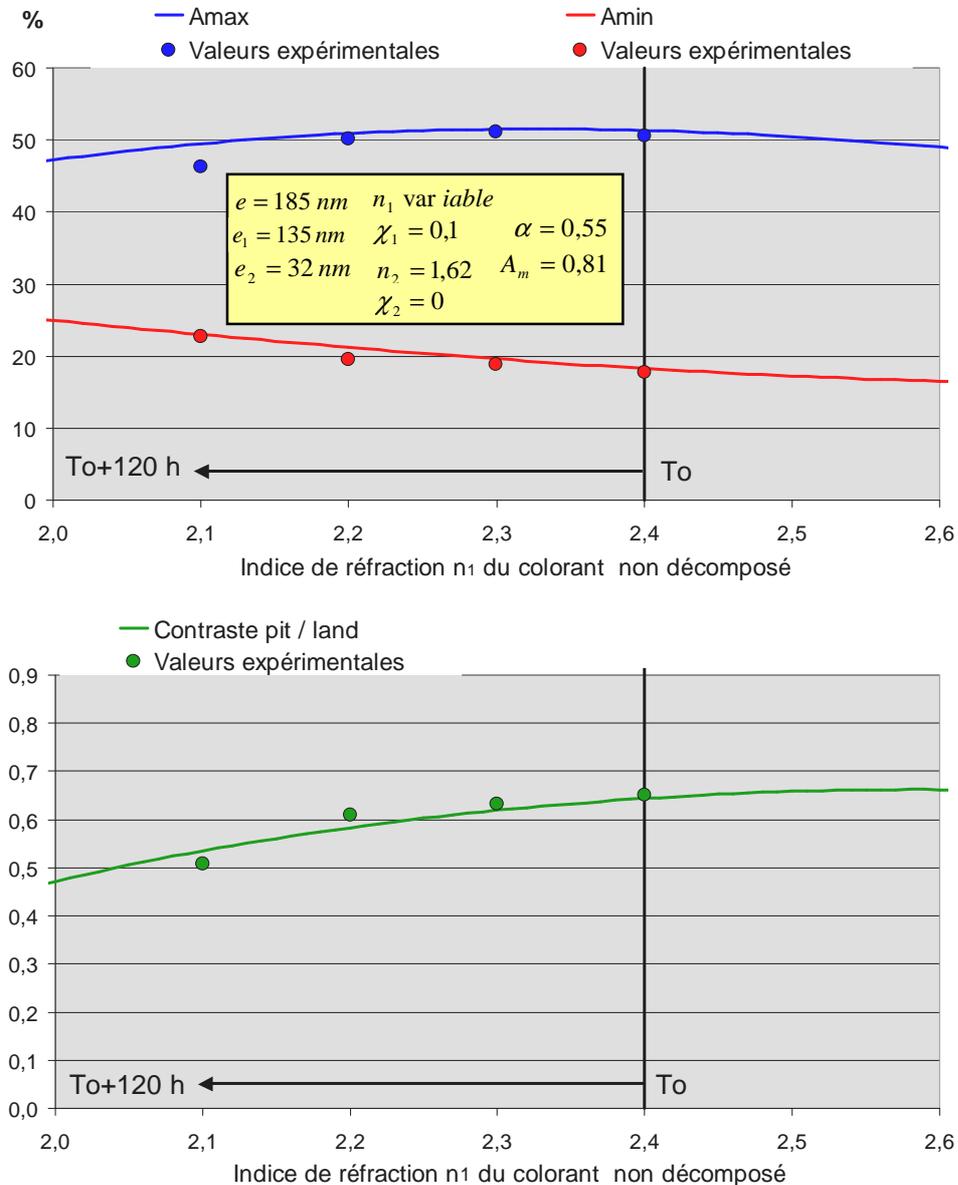
Fig. 6.11 – Simulation des amplitudes A_{max} , A_{min} et du contraste pit / land pour le modèle Verbatim Archival



Modèle de DVD-R Maxell

La tenue à la lumière de ce modèle n'excède pas 120 heures. La baisse de A_{\max} est moins marquée que pour le modèle précédent mais on a une augmentation de A_{\min} qui entraîne une baisse du contraste.

Fig. 6.12 – Simulation des amplitudes A_{\max} , A_{\min} et du contraste pit / land pour le modèle Maxell



Ces deux exemples montrent qu'il est possible de simuler l'effet de la lumière sur la réflectivité des pits et des lands, en faisant l'hypothèse que la lumière décompose le colorant non gravé (sur les lands et le plateau). On constate que la vitesse d'évolution de l'indice n_1 du colorant non gravé est plus importante avec le modèle Maxell qu'avec le modèle Verbatim (points expérimentaux plus espacés sur l'axe n_1). La raison est probablement la sensibilité du colorant à la lumière, à priori plus faible pour le modèle Verbatim qui est conçu pour une vitesse de gravure de 8x contre 16x pour le modèle Maxell.

Note : Le choix du jeu des paramètres dimensionnels et des indices n'est pas unique pour obtenir une simulation de l'évolution de chaque modèle. De ce fait, les valeurs indiquées ne sont donc pas forcément les valeurs réelles. L'intérêt de ces simulations est de montrer que le paramètre principal d'influence est certainement l'indice n_1 et que les formes d'évolution observées pour A_{\min} et A_{\max} peuvent s'expliquer par les différences, d'un modèle de DVDR à l'autre, des paramètres dimensionnels et des indices.

Effet d'une baisse de l'indice de réfraction du colorant sur l'asymétrie du signal HF

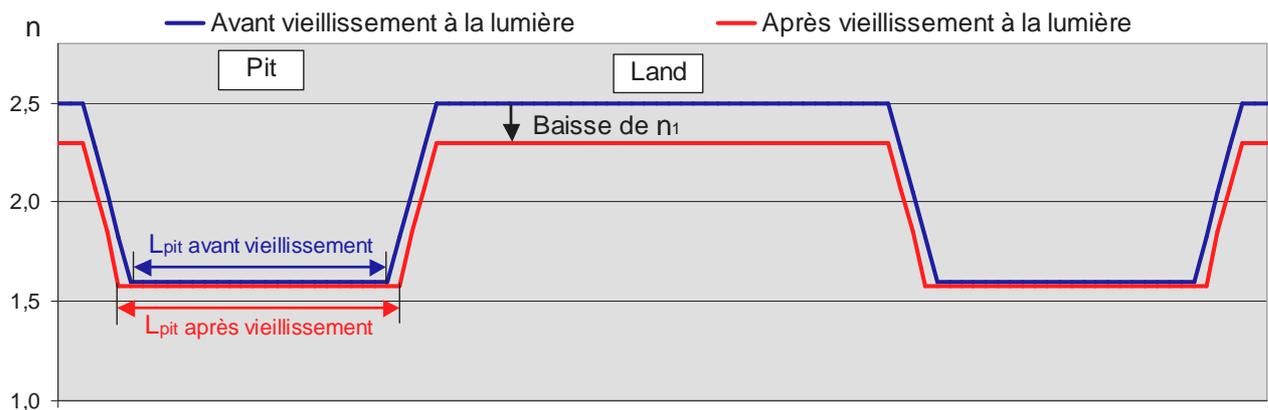
On a vu que l'asymétrie du signal HF dépend du réglage de la puissance du laser lors de la gravure (cf. § 5.2). Une baisse de l'indice n_1 du colorant peut-elle également produire une variation du paramètre ASYM et si oui dans quel sens ?

Le paramètre d'asymétrie (ASYM) est lié à la longueur des pits. Il est positif si les pits sont trop longs, négatif s'ils sont trop courts. L'augmentation du paramètre ASYM en vieillissement à la lumière doit donc correspondre à un allongement des pits.

Si l'on fait l'hypothèse que le colorant est totalement décomposé sur les pits, l'évolution de l'indice de réfraction n_2 du colorant décomposé n'est plus possible, alors que l'indice de réfraction n_1 du colorant non décomposé peut diminuer.

Supposons que l'indice de réfraction du colorant ne passe pas brutalement de n_1 à n_2 au niveau d'une transition land / pit, mais progressivement. On aura, dans la zone de transition, un effet non linéaire dans la baisse de l'indice, avec blocage sur la valeur n_2 du colorant totalement décomposé. Cela conduit à un allongement des pits comme montré sur la figure ci-dessous et donc à une augmentation du paramètre ASYM.

Fig. 6.13 - Effet du vieillissement à la lumière sur la longueur des pits



6.5 VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE ET ERREURS NUMERIQUES

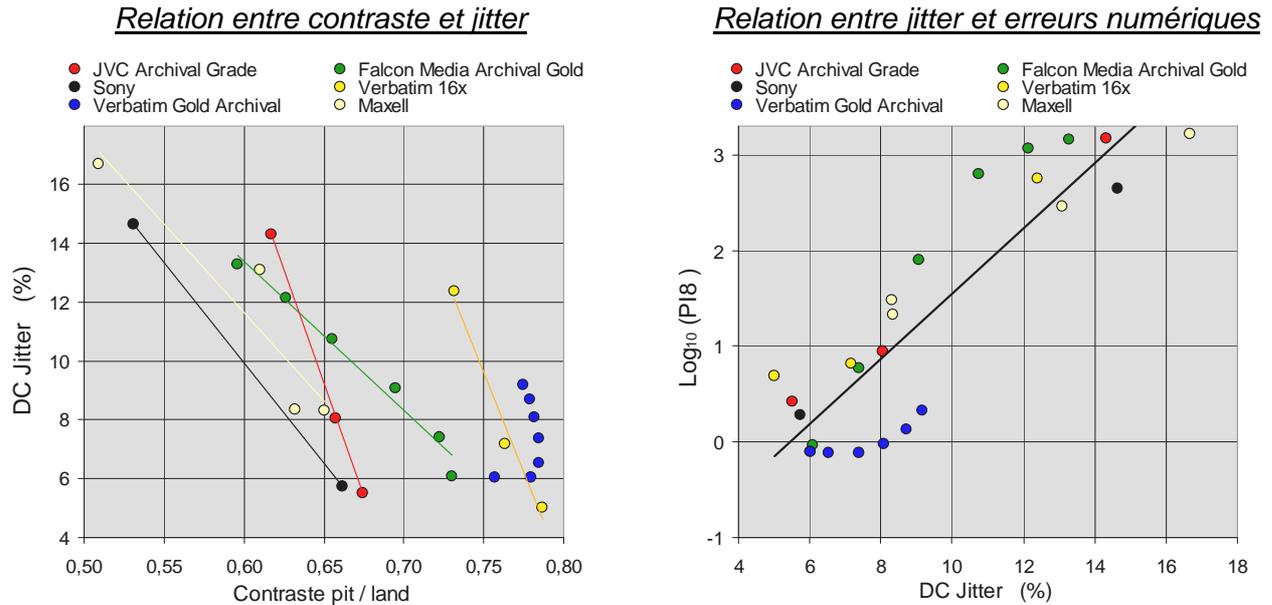
Lors de l'exposition à la lumière, l'apparition d'erreurs numériques est toujours concomitante avec une évolution des amplitudes et du contraste du signal HF. Toutefois, il n'y a pas de relation simple entre les amplitudes et le taux d'erreurs numériques.

Les graphes de la figure 6.14 mettent en évidence une corrélation d'une part entre le contraste pit / land et le jitter et d'autre part entre le jitter et les erreurs numériques PI8. Chaque point de ces graphes représente un modèle de disque à une durée d'exposition donnée.

Pour chaque modèle pris séparément, l'augmentation du jitter est assez bien corrélée avec la baisse du contraste. Toutefois, il n'y a pas de relation nette pour l'ensemble des modèles entre ces deux paramètres. L'influence du contraste est plus élevée pour les modèles JVC et Verbatim 16x que pour les autres modèles.

La corrélation entre DC Jitter et Log_{10} (PI8) est plus nette. On a fait figurer sur le graphe correspondant la droite de régression entre ces deux paramètres, pour l'ensemble des points. Tous les points correspondants à un PI8 supérieur à 280 (limite normalisée) ont un DC jitter supérieur à 10% et réciproquement.

Fig. 6.14 – Corrélations entre contraste du signal HF, jitter et erreurs numériques



Contrairement à d'autres évolutions observées sur les DVDR (vieillesse en étuve ou vieillissement naturel), le vieillissement à la lumière produit une augmentation du jitter et des erreurs numériques qui est relativement homogène du début à la fin du disque. Les écarts observés en fonction de la distance au centre du disque peuvent s'expliquer par la fabrication du disque (épaisseur du colorant) ou par la gravure lorsqu'elle est effectuée à vitesse linéaire non constante (mode CAV).

6.6 INFLUENCE DE LA LUMIERE SUR LES ZONES GRAVEES (PITS)

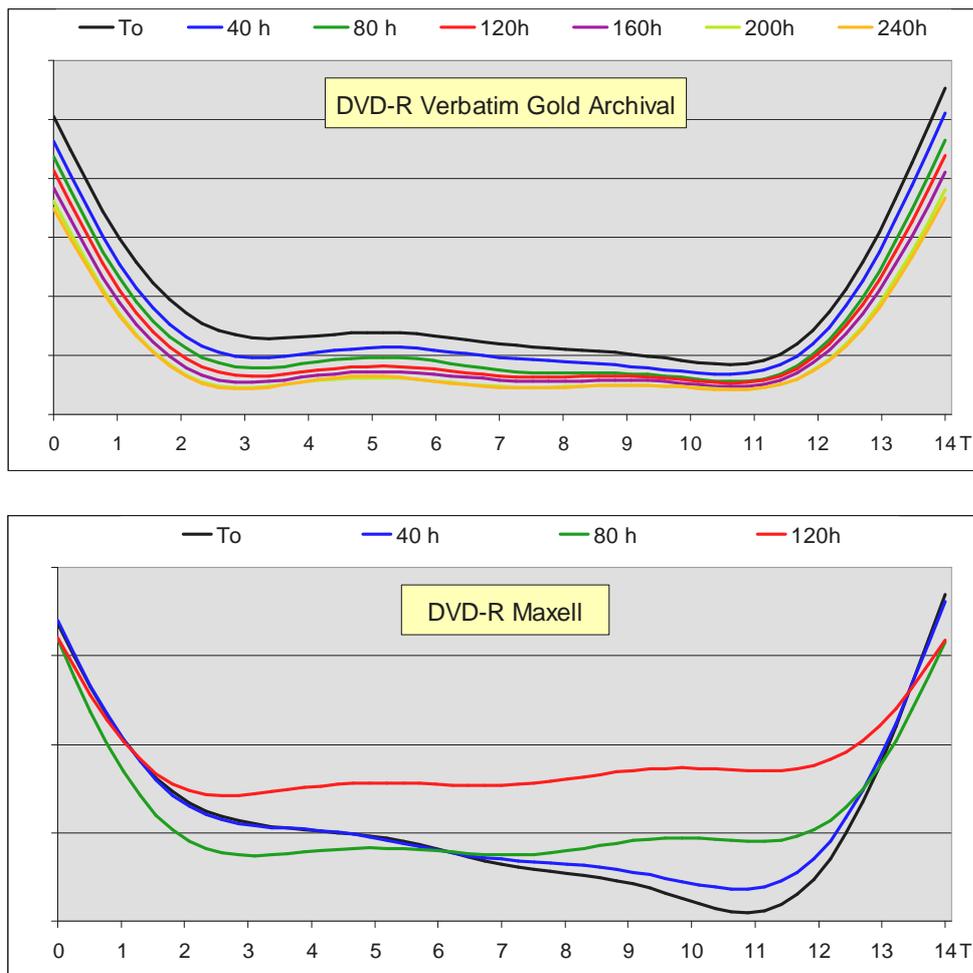
L'influence de l'effet de la lumière sur les zones gravées peut être étudiée en faisant une analyse statistique des pits les plus longs (14T) qui repèrent les débuts de trame. Les courbes de la figure 6.15 correspondent à deux exemples d'évolution du profil des pits 14T au cours de l'exposition à la lumière. Les profils présentés sont des profils moyens sur environ 700 pits 14T.

Le premier exemple concerne le modèle de DVD-R Verbatim Gold Archival. On observe une diminution de la réflectivité presque homogène sur toute la longueur des pits 14T. La variation est un peu plus importante en début de pit (à la distance 3T), qu'en fin de pit (à la distance 11T). Une telle évolution indique que le colorant est sans doute presque totalement décomposé dès la gravure. La baisse progressive de A_{\min} peut s'expliquer par l'effet de la baisse d'indice du colorant non décomposé (sur le plateau), sous les hypothèses développées au paragraphe 7.3.

Le second exemple concerne le modèle de DVD-R Maxell. On observe une variation de la réflectivité qui est différente au début et à la fin des pits 14T. En début de pit 14T (distance 3T), on a une baisse de réflectivité jusqu'à 80 heures d'exposition qui est suivie d'une augmentation entre 80 et 120 heures d'exposition. En fin de pit 14T (à la distance 11T), on observe une augmentation de réflectivité à partir d'une valeur de départ qui est plus petite qu'en début de pit. De telles variations peuvent s'expliquer par le fait que la décomposition du colorant lors de la gravure d'un pit 14T n'est pas complète et ceci de façon inégale sur la longueur du pit. L'effet de la lumière combine alors une baisse de l'indice n_1 du colorant non décomposé et une baisse de l'indice n_2 du colorant décomposé par la gravure.

Enfin, on a observé sur le modèle JVC Archival une forte dégradation ne concernant que les pits longs (à partir de 6T). Ils deviennent dissymétriques et présentent une réflectivité anormalement élevée. Le minimum du signal HF est souvent plus bas pour les pits courts (4T par exemple) que pour les pits longs. Cette évolution atypique n'apparaît qu'après 80 heures d'exposition et conduit à des taux d'erreurs très élevés.

Fig. 6.15 – Evolution du profil des pits 14T pour deux modèles de DVD-R



6.7 SYNTHÈSE DU VIEILLISSEMENT À LA LUMIÈRE

Le vieillissement à la lumière des DVDR peut s'expliquer par la décomposition du colorant, dont les indices optiques (indice de réfraction et coefficient d'extinction) diminuent au fur et à mesure de l'exposition. L'effet principal est dû à la baisse de l'indice de réfraction n_1 du colorant non décomposé par la gravure (sur le plateau et au niveau des lands du sillon).

On a montré que la conséquence de cette baisse de n_1 est une modification de la réflectivité des lands et des pits. Le plus souvent, cette modification est une baisse de la réflectivité des lands et une augmentation de la réflectivité des pits, se traduisant par une baisse du contraste pit / land du signal HF. La baisse du contraste induit une augmentation du jitter et une augmentation des erreurs de décodage de l'information numérique.

La vitesse de dégradation à la lumière d'un DVDR dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- La sensibilité du colorant vis à vis de la lumière qui est à priori plus élevée pour les DVDR pouvant être gravés à haute vitesse (16x)
- Les valeurs des indices optiques et les épaisseurs du colorant dans le sillon et sur le plateau qui conditionnent l'évolution de la réflectivité des pits et des lands
- La gravure des pits qui produit une décomposition plus ou moins complète du colorant.

Les configurations qui résistent le mieux au vieillissement à la lumière sont celles qui produisent, dans un premier temps, une baisse de la réflectivité des pits (A_{\min}), avec un contraste pit / land qui évolue peu. C'est par exemple le cas du modèle Verbatim Gold Archival.

7 VIEILLISSEMENT ACCELERE EN ETUVE

7.1 DESCRIPTION DES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ACCELERE

Les disques sont placés dans une enceinte climatique à haute température et avec un fort taux d'humidité. Ces conditions sévères accélèrent les phénomènes de vieillissement naturel des disques enregistrables.

Les disques sont placés dans l'enceinte en position verticale, comme on peut le voir sur la figure 7.1. Cela évite de voiler les disques comme ce pourrait être le cas s'ils étaient en position horizontale.

Fig. 7.1 - Enceinte climatique et disposition des disques dans l'enceinte



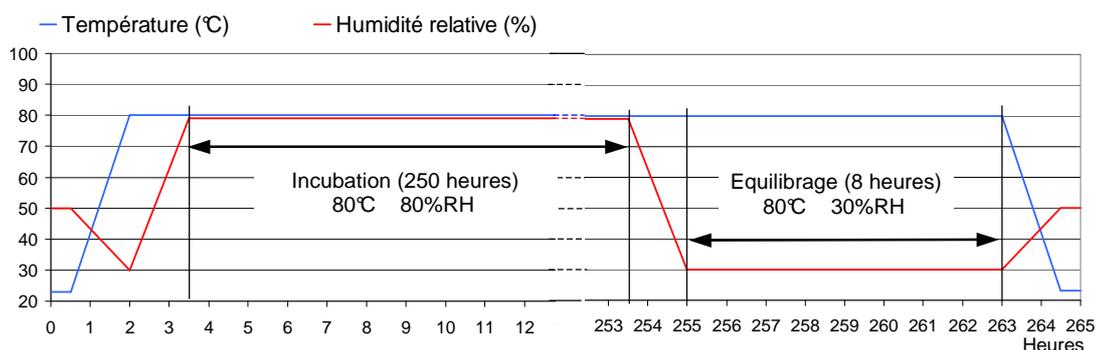
Le choix des valeurs de la température et du taux d'humidité s'appuie sur les conditions définies comme possibles dans la norme ISO / CEI 16963 relative à l'évaluation de la durée de vie des disques optiques. La plupart des essais réalisés au LNE l'ont été avec une température de 80°C (maximum dans la norme : 85°C) et un taux d'humidité relative de 80% ou 85%.

La durée maximale de l'exposition peut atteindre 2000 heures pour les modèles de DVDR les plus résistants. Les disques sont retirés toutes les 250 heures, afin de réaliser des analyses permettant d'évaluer leur niveau de dégradation.

La transition des conditions ambiantes vers une température et une hygrométrie élevées est effectuée progressivement. Le retour aux conditions ambiantes, avant chaque analyse, est également fait progressivement. Le cycle utilisé est conforme aux recommandations de la norme ISO 18927 «Méthode d'estimation de l'espérance de vie basée sur les effets de la température et de l'humidité relative». Il est réalisé de manière automatique grâce à une enceinte programmable.

Le graphique de la page suivante montre l'évolution de la température et de l'humidité sur un cycle d'exposition de 250 heures. L'étape d'équilibrage, à la fin du cycle permet l'élimination des molécules d'eau piégées dans le polycarbonate. Cette étape est nécessaire avant le retour à la température ambiante. Si elle n'est pas faite ou si sa durée est insuffisante, des bulles d'eau peuvent se former à l'intérieur du polycarbonate, généralement en contact avec la couche de colorant, causant une dégradation irréversible non représentative de la dégradation en conditions normales.

Fig. 7.2 - Profils de température et d'hygrométrie - Exposition de 250 heures à 80°C et 80%RH



7.2 MODELES TESTES EN VIEILLISSEMENT ACCELERE

Plusieurs études de vieillissement en étuve ont été réalisées sur des modèles de DVD±R. Les conditions de température et d'hygrométrie sont proches des valeurs maximales prévues dans la norme (80°C en température – 85 ou 80% d'hygrométrie relative). On a retenu des modèles issus de trois études dont les caractéristiques sont listées dans le tableau de la figure 7.3. Certains modèles ont été testés dans plusieurs études. En tout, il y a 20 modèles de DVD±R avec des codes MID différents.

Fig. 7.3 – Modèles de DVD±R retenus pour le vieillissement en étuve

Etudes	Fournisseur	Modèle	Identification du fabricant		Couche métallique	Type de colorant	Vitesse de gravure maximale	Durée max d'exposition	Conditions climatiques
			Code MID						
Archives de France 2007	MPO	+R Gold	MPOMEDIA 0080	MPO	Au	Cyanine	8x	1750 h	T= 80°C Hygrométrie 85%RH (max 1750h)
	Verbatim	-R	MCC 03RG20	Mitsubishi	Ag	Azoïque	16x	1750 h	
		-R Archival	MCC 02RG20	Mitsubishi	Ag + Au	Azoïque	8x	500 h	
	Falcon Media	-R Gold	FTI RG16	FTI	Au	Cyanine	16x	1750 h	
	Maxell	+R	YUDEN000 T03	Taiyo Yuden	Ag	Cyanine	16x	1750 h	
	Sony	-R	SONY16D1	Sony	Ag	Cyanine	16x	1750 h	
	Fujifilm	-R Pro	TYG02	Taiyo Yuden	Ag	Cyanine	8x	1750 h	
Delkin	-R Archival	MAM4XG02	Mitsui	Au	Cyanine	4x	1750 h		
Essai comparatif 2008	Maxell	-R	RITEKF1	Ritek	Ag	Cyanine	16x	500 h	T= 80°C Hygrométrie 85%RH (max 1000h)
	Sony	-R	SONY16D1	Sony	Ag	Cyanine	16x	500 h	
	Philips	-R	MBI 01RG40	Moser Baer	Ag	Cyanine	16x	1000 h	
	Memorex	-R	MBI 01RG40	Moser Baer	Ag	Cyanine	16x	1000 h	
	Verbatim	-R	MCC 03RG20	Mitsubishi	Ag	Azoïque	16x	1000 h	
	Intenso	+R	AML - 003	Anwell	Ag	Cyanine	16x	1000 h	
	Exel	+R	WFKA11 - 321	Anwell	Ag	Cyanine	16x	1000 h	
	Cora	+R	CMC MAG - M01	CMC	Ag	Cyanine	16x	1000 h	
Emtec	+R	CMC MAG.AM3	CMC	Ag	Cyanine	16x	1000 h		
Archives de France 2011	MPO	-R Gold	MCC 02RG20	Mitsubishi	Ag + Au	Azoïque	8x	1250 h	T= 80°C Hygrométrie 80%RH (max 2000h)
	JVC	-R Archival Grade	TYG03	Taiyo Yuden	Ag	Cyanine	16x	2000 h	
	FTI	-R Gold Archival	TTG02	TDK	Ag + Au	Cyanine	8x	2000 h	
		-R Platinum Archival	TTG02	TDK	Ag + Pt	Cyanine	8x	2000 h	
	Sony	-R	SONY16D1	Sony	Ag	Cyanine	16x	750 h	
	Verbatim	-R	MCC 03RG20	Mitsubishi	Ag	Azoïque	16x	2000 h	
		-R Archival	MCC 02RG20	Mitsubishi	Ag + Au	Azoïque	8x	1000 h	
	TDK	-R	MBI 01RG40	Moser Baer	Ag	Cyanine	16x	500 h	
Maxell	-R	RITEKF1	Ritek	Ag	Cyanine	16x	500 h		

7.3 EVOLUTION DES ERREURS NUMERIQUES PI8

Les graphes des figures 7.4 à 7.6 montrent l'évolution des erreurs PI8 (moyenne sur le disque) en fonction de la durée d'étuvage. La représentation est en échelle logarithmique.

Fig. 7.4 – Evolution des erreurs PI8 en fonction de la durée d'étuvage (Archives de France – Etude 2007)

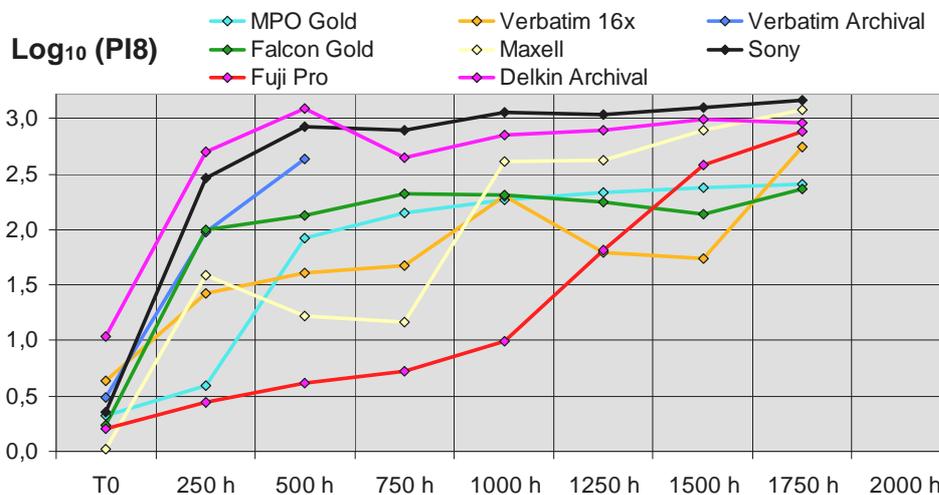


Fig. 7.5 – Evolution des erreurs PI8 en fonction de la durée d'étuvage (Essai comparatif – 2008)

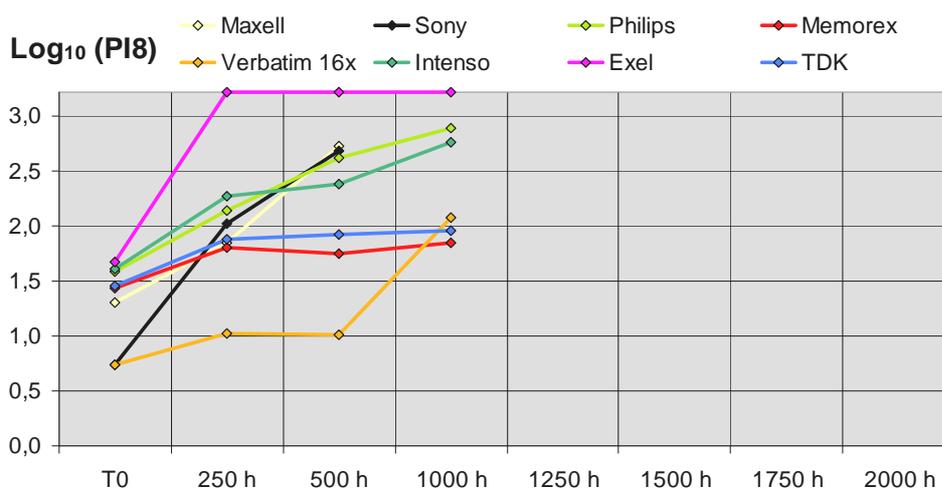
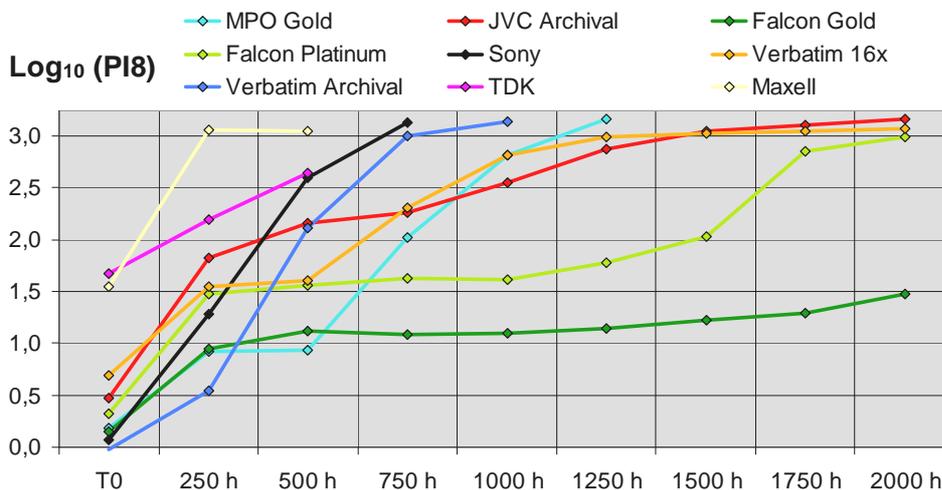


Fig. 7.6 – Evolution des erreurs PI8 en fonction de la durée d'étuvage (Archives de France – Etude 2011)

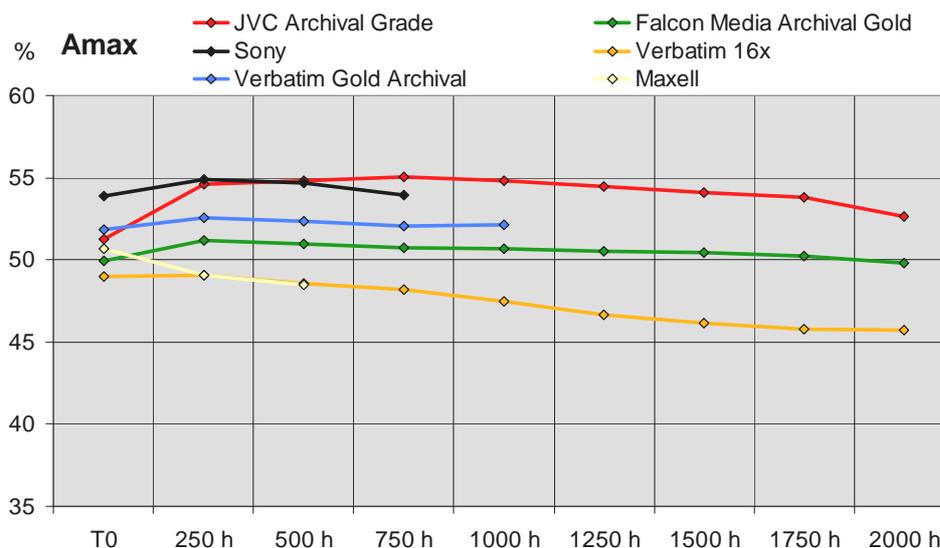


7.4 EVOLUTION DES PARAMETRES

Pour raison de clarté, on ne présente les évolutions des paramètres moyens que pour quelques modèles représentatifs. Pour les paramètres d'amplitude et de contraste, on donne dans les graphes des figures 7.7, 7.8, 7.9, 7.10 et 7.12 les résultats obtenus en vieillissement accéléré des 6 modèles testés à la lumière et dont les évolutions sont données au paragraphe 6.2.

Amplitude maximale A_{max} du signal HF

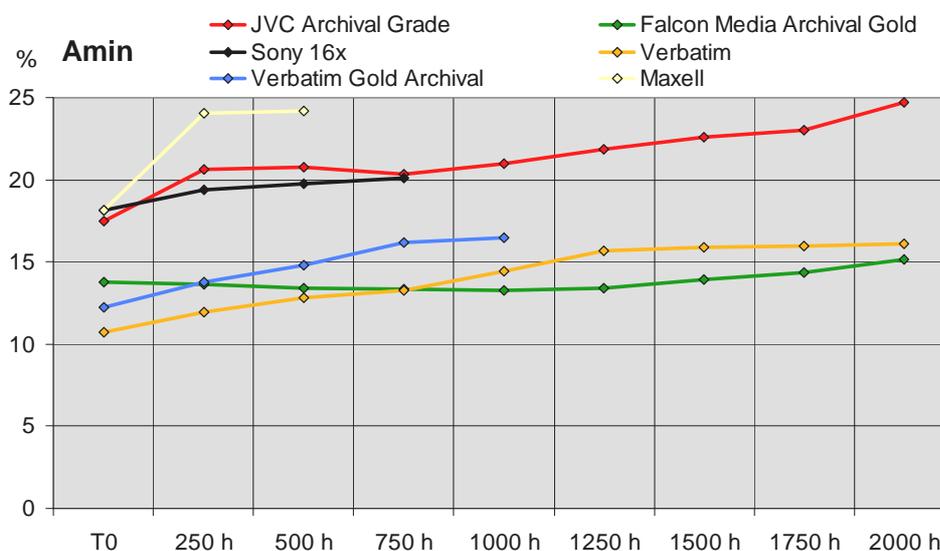
Fig. 7.7 – Evolution de l'amplitude A_{max} en fonction de la durée d'étuvage



On constate une relative stabilité du paramètre A_{max} . En tous cas, la baisse de réflectivité des lands n'est jamais aussi importante qu'en vieillissement à la lumière. Des modèles qui présentent une baisse de A_{max} régulière importante lors de l'exposition à la lumière (Falcon, Verbatim Archival) présentent, en vieillissement en étuve, une légère augmentation de A_{max} suivie d'une très faible baisse.

Amplitude minimale A_{min} du signal HF

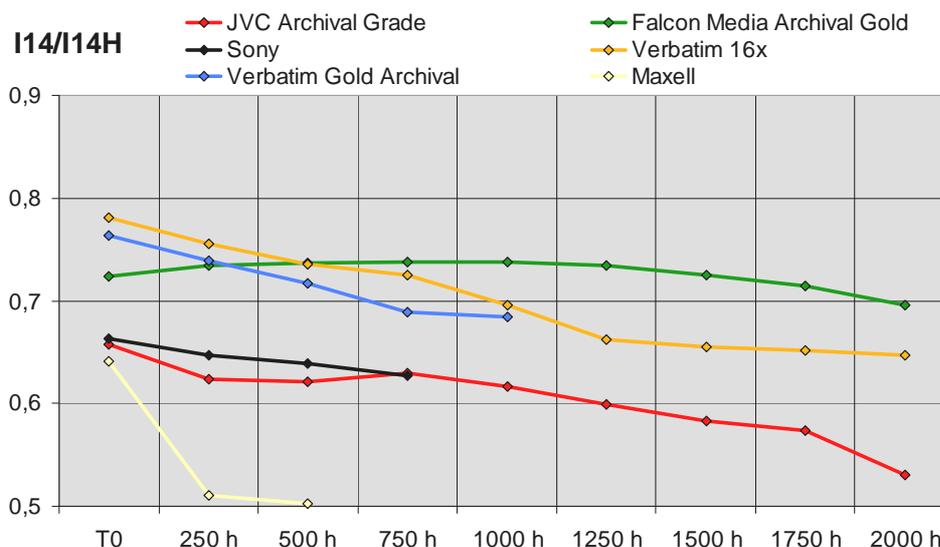
Fig. 7.8 – Evolution de l'amplitude A_{min} en fonction de la durée d'étuvage



L'amplitude A_{min} augmente pour tous les modèles, contrairement au cas de l'exposition à la lumière.

Contraste pit / land

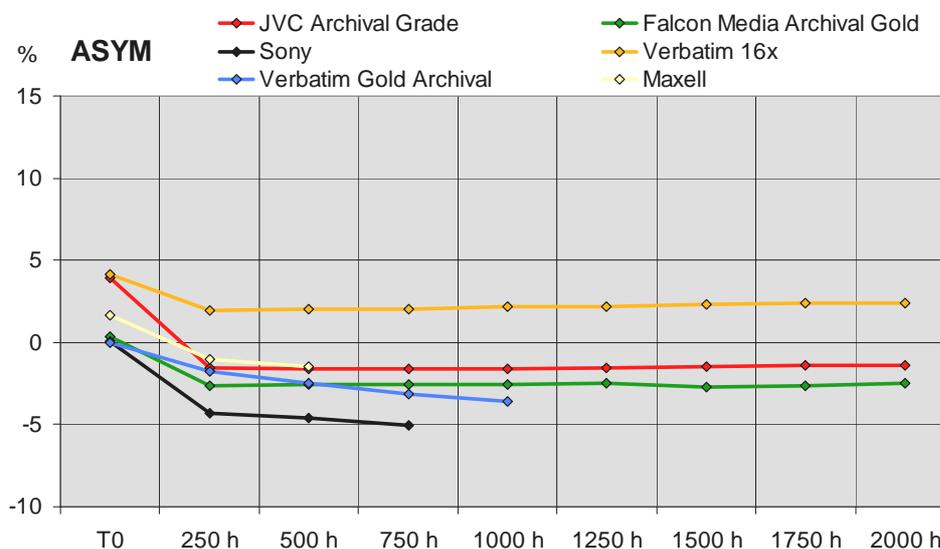
Fig. 7.9 – Evolution du contraste I_{14} / I_{14H} en fonction de la durée d'étuvage



L'évolution du contraste pit / land est une combinaison de l'évolution de A_{max} et A_{min} . On observe toujours une baisse du contraste, sauf pour le modèle Falcon.

Asymétrie du signal HF

Fig. 7.10 – Evolution du paramètre ASYM en fonction de la durée d'étuvage

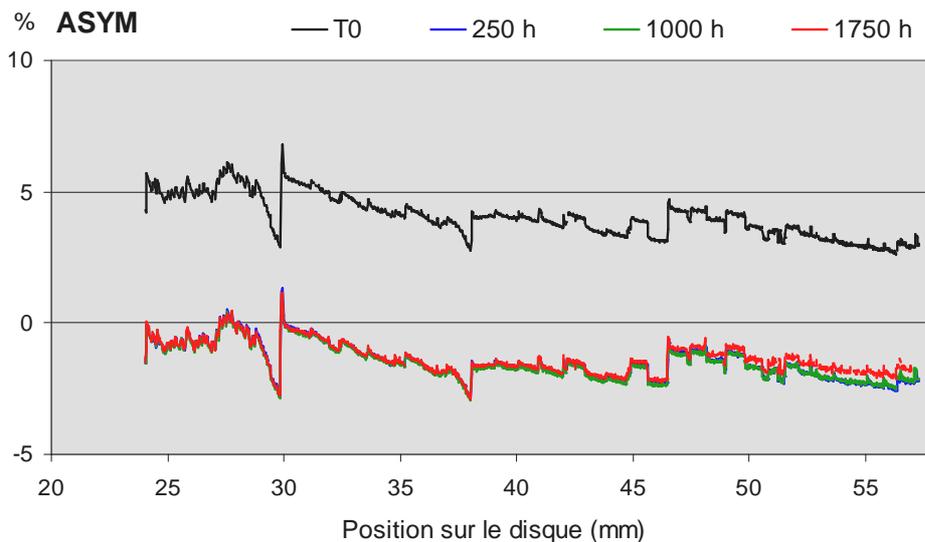


Le paramètre ASYM baisse au cours du premier cycle de 250 heures puis se stabilise. Le comportement est très différent de celui observé en vieillissement à la lumière, au cours duquel ASYM a tendance à augmenter. Seul le modèle Verbatim Archival fait exception, avec une décroissance de ASYM qui se poursuit au-delà de 250 heures.

La baisse du paramètre ASYM au cours du premier cycle d'étuvage est observée pour la quasi-totalité des modèles de DVD±R soumis au vieillissement accéléré. Elle fait apparaître l'existence d'une évolution rapide qui ne se prolonge pas au-delà du premier cycle de 250 heures. Cette évolution semble aussi associée à une augmentation de A_{max} , toutefois moins systématique que la baisse de ASYM.

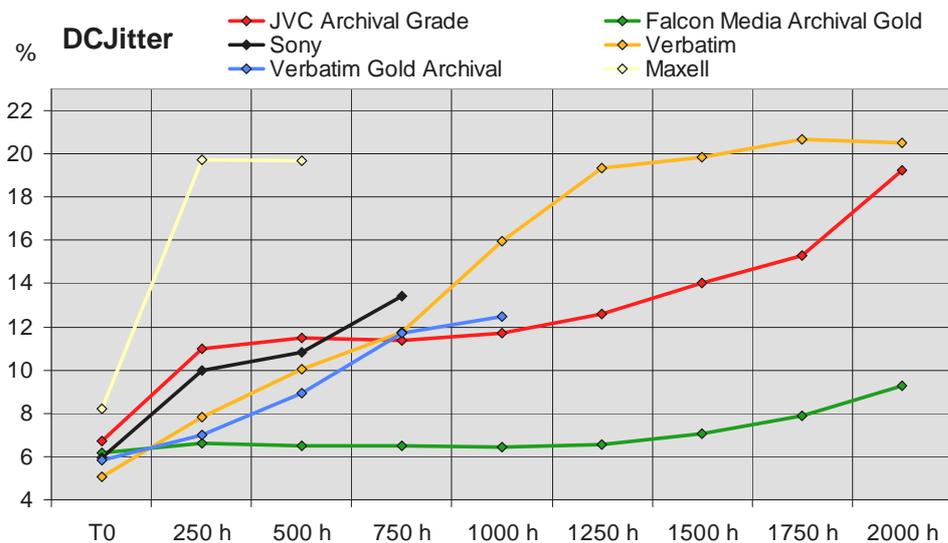
Les courbes du paramètre ASYM en fonction de la distance au centre du disque restent parallèles pour différentes durées d'étuvage. La figure 7.11 en donne un exemple où l'on voit le décalage des courbes obtenues après 250h, 1000h et 1750h (toutes superposées) par rapport à la courbe initiale (T0). L'ajustement de la puissance du laser au cours de la gravure produit de petites ruptures des courbes qui se conservent parfaitement lors du vieillissement. Cela montre que la baisse de ASYM au début du vieillissement accéléré est indépendante des conditions de gravure.

Fig. 7.11 – Courbes du paramètre ASYM selon la distance au centre du disque (modèle JVC) pour différentes durées de vieillissement en étuve



Jitter

Fig. 7.12 – Evolution du DC jitter en fonction de la durée d'étuvage



Tous les modèles de DVD±R présentent une augmentation du jitter avec la durée d'étuvage. Cette augmentation est plus ou moins régulière et rapide, selon les modèles.

Comme pour le vieillissement à la lumière, l'augmentation du jitter est généralement corrélée avec la baisse du contraste pit / land et l'augmentation des erreurs P18.

7.4 DEGRADATION AUGMENTANT AVEC LA DISTANCE AU CENTRE DU DISQUE

Sur un grand nombre de modèles, on observe une répartition particulière du jitter sur le disque lors du vieillissement en étuve. Le jitter augmente progressivement du début à la fin du disque en produisant des erreurs numériques très importantes en fin de disque.

Le graphe de la figure 7.13 montre un exemple typique de ce phénomène (DVD-R Fujifilm Pro – Archives de France - 2007). Lorsque le jitter dépasse 15%, l'analyseur Audiodev n'est plus capable de décoder les données numériques, ce qui se produit en fin de disque à partir de 1500 heures d'étuvage.

L'analyseur Clover est moins sensible à ce type d'évolution et les erreurs numériques sont moins importantes qu'avec l'analyseur Audiodev comme on le voit sur les graphes de la figure 7.14.

Fig. 7.13 - DC Jitter selon la distance au centre du disque (modèle Fujifilm Pro - 2007)

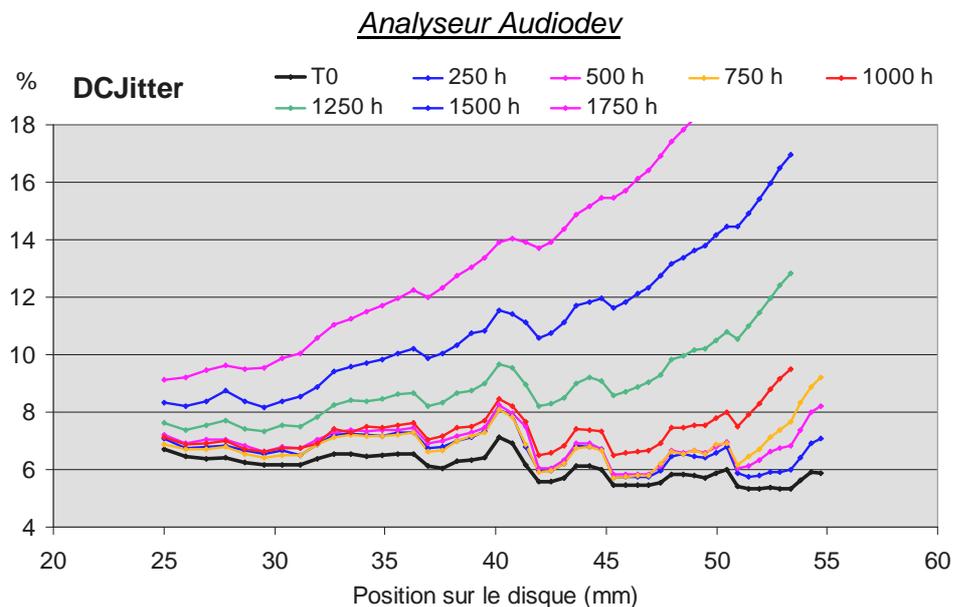
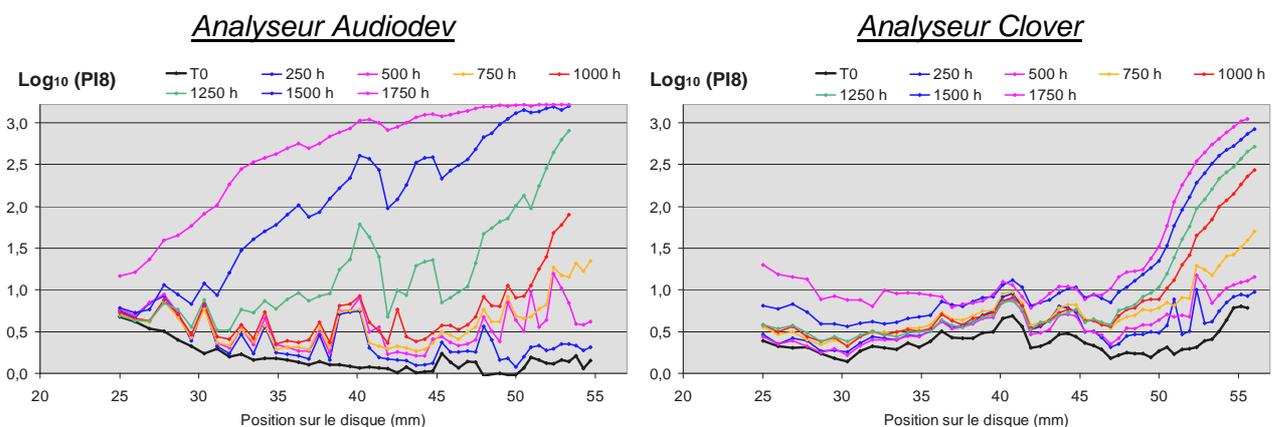


Fig. 7.14 - Courbes des erreurs numériques PI8 selon la distance au centre du disque

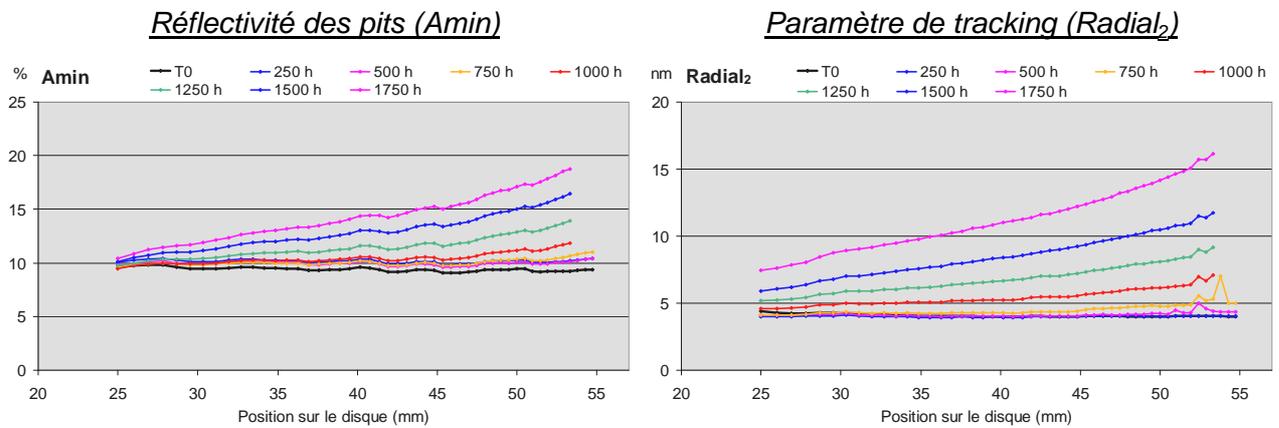


Ce phénomène est observé en vieillissement en étuve sur plus de la moitié des modèles de DVD±R. Il affecte aussi le paramètre A_{\min} qui représente la réflectivité des pits. Les évolutions du jitter sont toujours corrélées avec celles de A_{\min} , quel que soit le modèle de disque ou la position sur le disque. Une augmentation du jitter est toujours associée à une augmentation de A_{\min} .

Un autre paramètre est également corrélé au jitter. Il s'agit du paramètre Radial_2 qui caractérise les fluctuations rapides du suivi de piste (tracking).

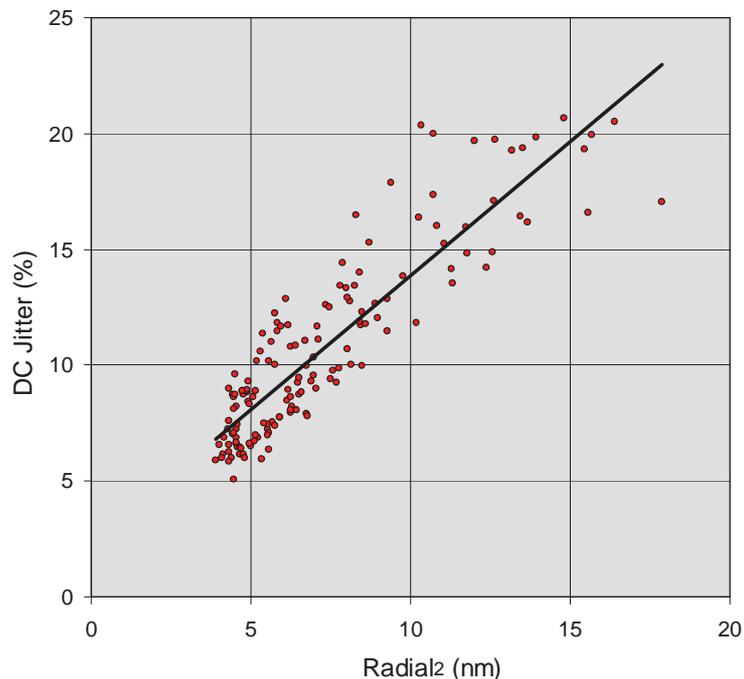
La figure 7.15 présente les courbes des paramètres A_{min} et $Radial_2$ pour les différentes durées d'étuvage du modèle Fujifilm Pro (Etude Archives de France 2007).

Fig. 7.15 - Courbes des paramètres A_{min} et $Radial_2$ selon la distance au centre du disque (Modèle Fujifilm Pro - Analyseur Audiodev)



Le jitter n'est pas directement corrélé à la valeur de A_{min} . Ce sont uniquement les variations de ces deux paramètres qui sont corrélées. Par contre le jitter est corrélé à la valeur du paramètre $Radial_2$ comme le montre le graphe de la figure 7.16 sur lequel on a porté les valeurs moyennes du DC Jitter en fonction des valeurs moyennes du paramètre $Radial_2$. Chaque point représente un disque pour une durée d'étuvage. Les points concernent tous les modèles décrits au paragraphe 7.2.

Fig. 7.16 - Corrélation entre DC Jitter et paramètre de tracking ($Radial_2$)



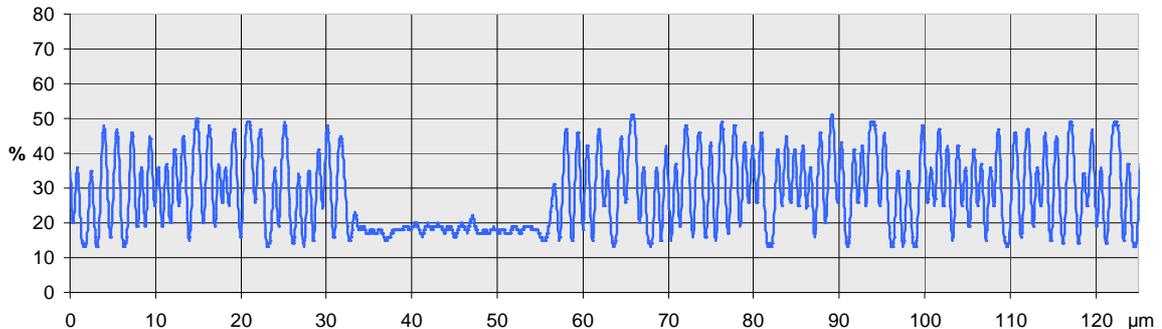
La limite due à la capacité de décodage de l'analyseur Audiodev se produit pour un DC jitter d'environ 15% correspondant à une valeur de $Radial_2$ de 11 nm.

Dans quelques cas, on a observé que l'augmentation du jitter n'était pas continue en fonction de la durée d'étuvage. C'est le cas avec le modèle Delkin de 2007 pour lequel le DC jitter a d'abord augmenté rapidement jusqu'à 500 heures d'étuvage puis est redescendu à 750 heures pour remonter ensuite progressivement. Cette observation conduit à penser que le phénomène physique associé à l'augmentation du jitter peut présenter une certaine réversibilité.

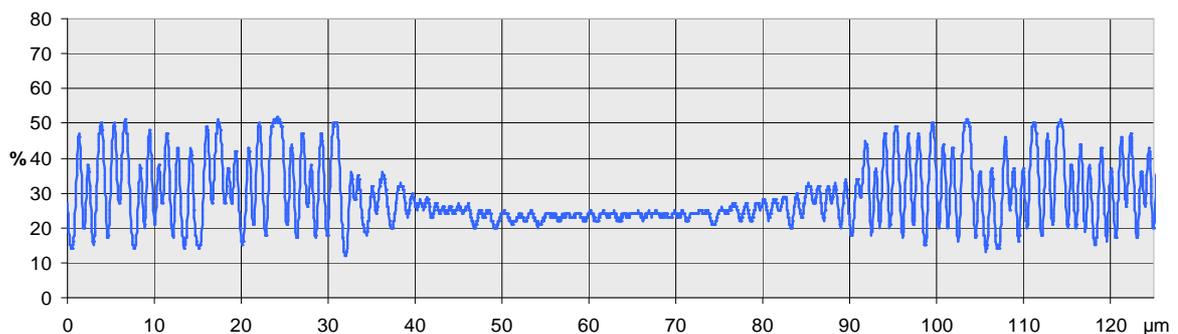
7.5 TACHES PRODUISANT LA DISPARITION DE LA MODULATION HF

Sur quelques modèles, on a détecté l'apparition de taches lors du vieillissement en étuve. La détection de ces taches a été possible par l'analyse fine du signal HF. Ces taches ont une dimension pouvant aller d'une dizaine de μm à $100\ \mu\text{m}$. Les figures 7.17 et 7.18 montrent, sur deux exemples, comment le signal HF est affecté par ce type de tache. L'abscisse représente la distance sur le sillon en μm .

*Fig. 7.17 - Signal HF au niveau d'une tache de dimension $20\ \mu\text{m}$
(Modèle Verbatim 16x – DAF 2007 – Après étuvage de 750 heures)*



*Fig. 7.18 - Signal HF au niveau d'une tache de dimension $50\ \mu\text{m}$
(Modèle FTI Gold – SIAF 2011 - Après étuvage de 750 heures)*



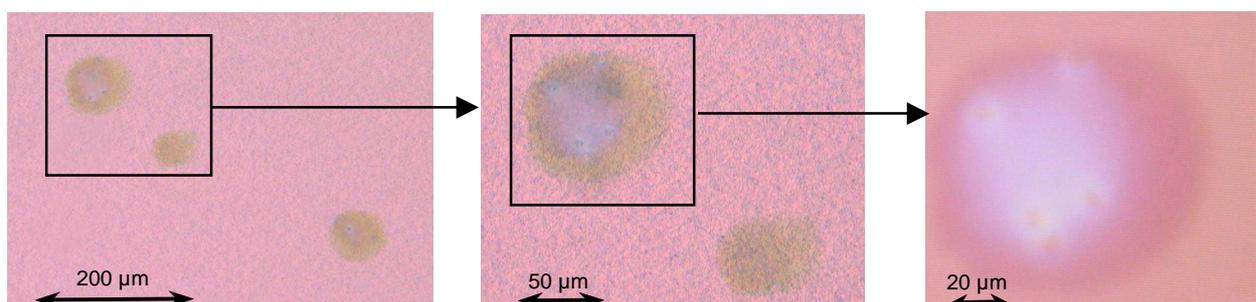
La modulation disparaît presque complètement dans les deux cas. La réflectivité du sillon dans la tache est plus proche de celle d'un pit que de celle d'un land. Dans le premier exemple (modèle Verbatim) la disparition et la réapparition de la modulation sont quasi instantanées ce qui indique que le bord de la tache est très net. Il est plus progressif dans le second exemple.

L'apparition de ce type de tache a été mise en évidence sur différents modèles :

- les modèles Sony (Etudes 2007-2008-2011)
- les modèles Falcon Media (Etudes 2007 et 2011)
- le modèle Verbatim 16x (Etudes 2007-2008)

La figure 7.19 présente des images de taches du modèle Falcon Media Gold (2011). Il s'agit de photographies prises au microscope avec différents grossissements, la focalisation étant faite sur la couche sensible. A l'intérieur de la plus grosse des taches, on distingue plusieurs piqûres qui atteignent probablement la couche métallique.

Fig. 7.19 – Taches après vieillissement en étuve de 2000 heures d'un modèle Falcon media



En général, ces taches n'ont pas de conséquences importantes sur les taux d'erreurs PI8. Elles peuvent toutefois produire quelques erreurs incorrigibles (POF). C'est notamment le cas pour le modèle Falcon Media Gold.

7.6 SYNTHÈSE RELATIVE AU VIEILLISSEMENT EN ÉTUVE

Le vieillissement en étuve fait apparaître plusieurs types de défauts.

Comme pour le vieillissement à la lumière, on observe une évolution de la réflectivité des zones non gravées (lands). Toutefois cette évolution est peu importante et n'explique certainement pas l'apparition des erreurs numériques.

Une évolution particulière concerne le paramètre d'asymétrie qui diminue après le premier cycle d'étuvage et se stabilise ensuite. Cette évolution n'est pas responsable des erreurs numériques, mais elle est intéressante par le fait qu'elle concerne pratiquement tous les modèles de DVD±R et qu'elle ne se prolonge que très rarement au-delà du premier cycle d'étuvage. Une baisse du paramètre d'asymétrie correspond à une diminution de longueur des pits. La première mise en température pourrait produire un réarrangement des zones de transition entre le colorant brûlé et le colorant non brûlé, ce réarrangement produisant une diminution de longueur des parties gravées.

Un autre phénomène concerne l'apparition de taches sur le colorant d'une taille de quelques dizaines de micromètres. À l'intérieur de ces taches la modulation pit / land est supprimée. Ce phénomène ne se produit pas pour tous les modèles de DVD±R et pourrait avoir pour origine la formation de gouttelettes d'eau à l'interface entre le polycarbonate et le colorant. De telles gouttelettes sont en effet observables lorsqu'on retire les disques trop rapidement de l'étuve. Elles sont produites par l'eau qui a diffusé lentement dans le polycarbonate pendant l'étuvage et qui se condense lorsqu'on abaisse la température sans avoir laissé un temps suffisant pour la diffusion des molécules d'eau sur l'extérieur. Cette hypothèse est renforcée par l'observation qu'une faible augmentation du taux d'hygrométrie (par exemple de 80 à 85%) peut engendrer une forte augmentation de ce type de dégradation. Ainsi, l'apparition de ces taches pourrait être un artefact expérimental. On peut le réduire en utilisant des temps de séchage plus importants (rééquilibrage) avant de revenir à la température ambiante. L'utilisation d'un taux d'hygrométrie trop élevé est également à proscrire.

Enfin, le phénomène principal à l'origine des erreurs numériques importantes engendre une évolution concomitante du jitter, du paramètre A_{\min} , du paramètre de tracking Radial₂ et des erreurs numériques PI8. La caractéristique de l'évolution est qu'elle dépend de la distance au centre du disque, avec une évolution d'autant plus importante qu'on se rapproche du bord externe du disque.

L'évolution du contraste, du jitter et des erreurs numériques présente une certaine similitude avec le vieillissement à la lumière. Cependant on n'a jamais observé en vieillissement à la lumière de différences lorsqu'on s'éloigne du centre du disque, non plus que d'effet sur le paramètre de tracking Radial₂. En vieillissement en étuve, l'analyse détaillée du signal HF fait en général apparaître une évolution plus marquée des pits que des lands. Une hypothèse est que les pits sont plus sensibles à la température que les lands parce qu'il s'agit de zones fragilisées par la très haute température locale au moment de la gravure. Une évolution de ces zones fragilisées peut concerner les différentes couches en contact (colorant, métal, polycarbonate).

Il reste toutefois à expliquer pourquoi la dégradation augmente avec la distance au centre du disque. La variation régulière de la dégradation du centre vers le bord externe suggère un effet mécanique, par exemple produit par une évolution du collage des deux galettes de polycarbonate constituant les DVDR. Une évolution de la colle pourrait créer des contraintes plus importantes vers le bord externe dont le collage est assuré sur une surface moindre que pour le bord interne.

8 VIEILLISSEMENT NATUREL

8.1 ANALYSES REALISEES POUR L'ETUDE DU VIEILLISSEMENT NATUREL DES DVD±R

Une étude de vieillissement naturel a été réalisée en 2011 sur une collection LNE de 113 DVD±R. Le rapport de cette étude « Dégradation naturelle d'une collection de DVD±R gravées entre 2004 et 2008 » est accessible par le lien internet suivant :

<http://www.lne.fr/publications/recherche/rapport-2011-vieillissement-naturel-DVD-R.pdf>

La collection de 113 DVD±R contient un grand nombre de modèles (60 références) et un ou deux disques seulement par modèle. Des analyses ont été réalisées juste après la gravure des disques (de 2004 à 2008) puis en 2009 et en 2011.

Des analyses ont également été réalisées sur une partie de la collection de DVD-R détenue par l'Institut National de l'Audiovisuel dans le cadre du dépôt légal des émissions de radio et de télévision. Les disques n'ont pas été analysés au départ. On dispose toutefois d'analyses effectuées à un an d'intervalle (2012 et 2013) d'un ensemble de 50 DVD-R comportant 4 modèles différents :

- Sony (code MID SONY16D1)
- Sony de fabrication Moser Baer (code MID MBI 01RG40)
- Modèle de fabrication Taiyo Yuden (code MID TYG03)
- Modèle de fabrication Verbatim (code MID MCC 02RG20)

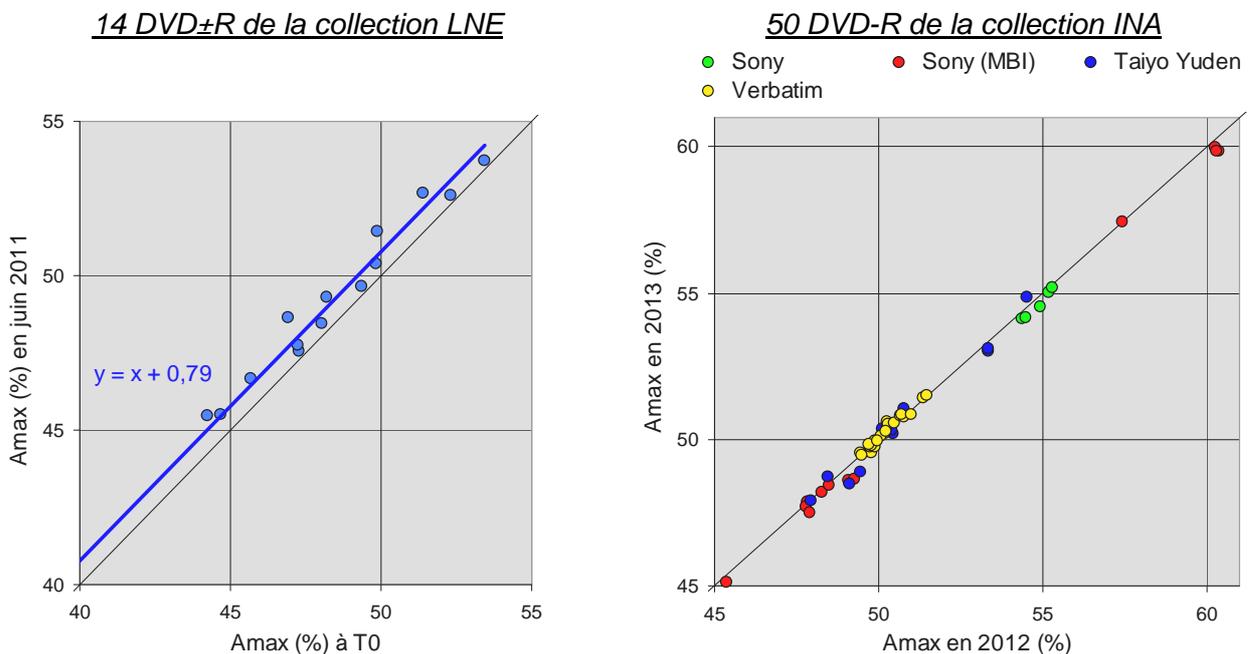
Les disques ont été conservés dans des conditions climatiques stables et à l'abri de la lumière.

8.2 EVOLUTION DES PARAMETRES DU SIGNAL HF

Amplitude maximale A_{max} du signal HF

L'évolution du paramètre A_{max} est montrée sur les graphes de la figure 8.1 pour 14 DVD±R de la collection LNE entre T_0 (2006 à 2008) et 2011 et pour 50 DVD-R de la collection de l'INA entre 2012 et 2013. Chaque point des graphes représente un disque. L'abscisse et l'ordonnée du point sont les valeurs de A_{max} pour les deux dates d'analyse. Les points situés au-dessus de la diagonale correspondent à des disques pour lesquels A_{max} a augmenté.

Fig. 8.1 - Evolution du paramètre A_{max} en vieillissement naturel

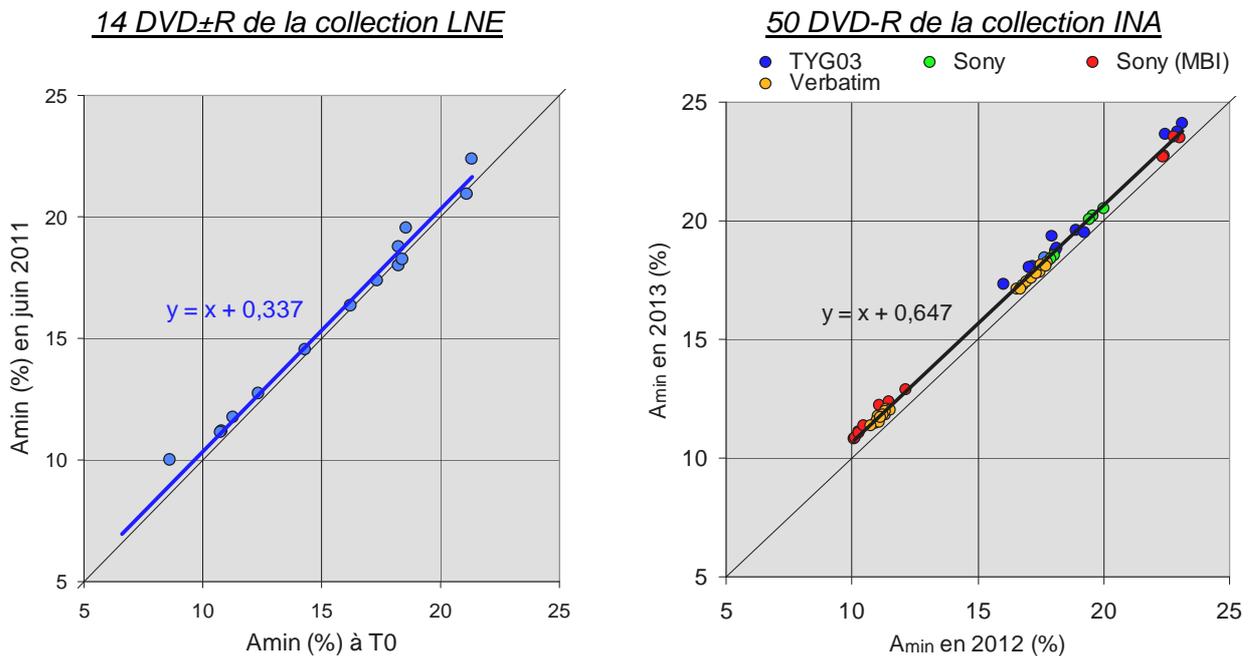


On observe une légère augmentation en moyenne de A_{max} . Pour les disques de la collection LNE, l'augmentation moyenne est de moins de 1% (0,79%) de la réflectivité de référence. Cela correspond à peu près à une augmentation de 0,2% par année de vieillissement. Pour les disques de l'INA, aucune variation significative de A_{max} n'est observable sur une durée de vieillissement de 1 an.

Amplitude minimale A_{min} du signal HF

L'évolution du paramètre A_{min} est présentée sur les graphes de la figure 8.2. Le paramètre A_{min} augmente de manière plus significative pour les disques de l'INA que pour les disques de la collection LNE. Cette augmentation concerne les 4 modèles de l'INA. Elle est en moyenne 0,6% sur un an de vieillissement.

Fig. 8.2 - Evolution du paramètre A_{min} en vieillissement naturel



Asymétrie du signal HF

Les graphes de la figure 8.3 montrent l'évolution du paramètre ASYM sur une partie des disques de la collection LNE entre T0 et l'analyse de 2009 et entre l'analyse de 2009 et l'analyse de 2011.

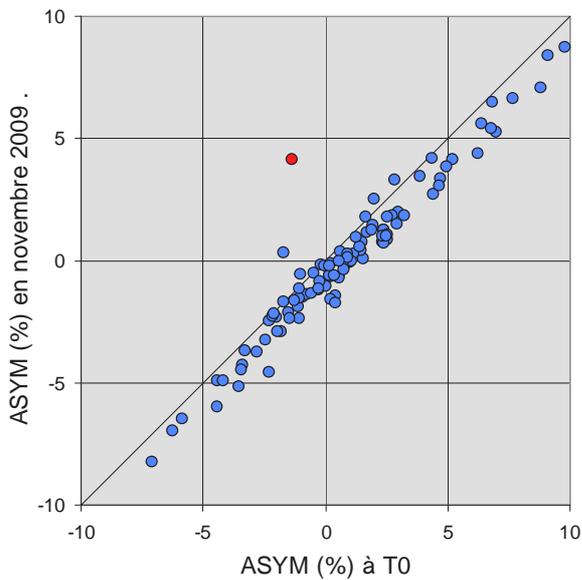
On observe une baisse du paramètre ASYM entre T0 et 2009 pour la plupart des disques. Cette baisse, qui correspond à une diminution de longueur des pits, ne se poursuit pas entre 2009 et 2011. Cette évolution est très similaire à celle observée en vieillissement en étuve. La baisse du paramètre ASYM est d'environ 1% en moyenne. C'est moins que la baisse observée en vieillissement en étuve qui est comprise entre 2 et 5% selon les modèles de DVDR.

Pour un disque (point rouge sur les graphes), on observe une augmentation importante du paramètre ASYM. Ce disque, gravé en 2004, présente par ailleurs une évolution atypique avec des taux d'erreurs très élevés dès 2009.

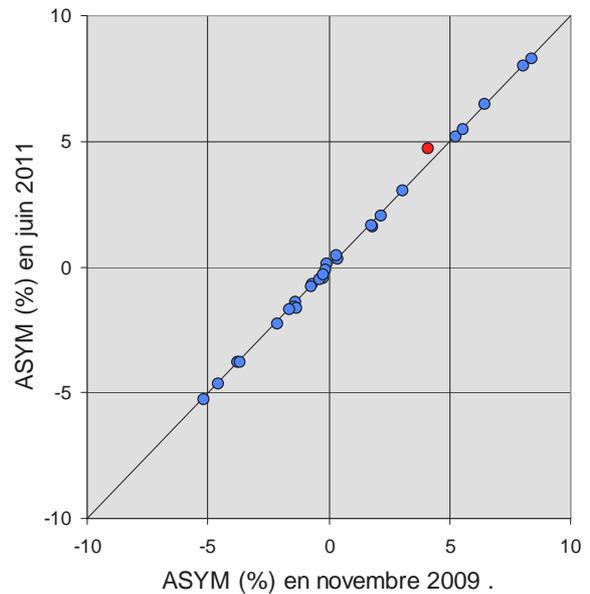
Les analyses effectuées à un an d'intervalle sur des DVD-R de la collection de l'INA ne montrent, quant à eux, aucune évolution du paramètre ASYM. Cela peut provenir du fait que la première analyse a été effectuée avec un retard d'environ un an par rapport à la date de gravure. L'évolution du paramètre ASYM pourrait être très précoce (moins d'un an après la gravure) et ne serait pas observable sur la période des analyses.

Fig. 8.3 - Evolution du paramètre ASYM moyen entre T0 et 2009 et entre 2009 et 2011

108 DVD±R de la collection LNE



29 DVD±R de la collection LNE



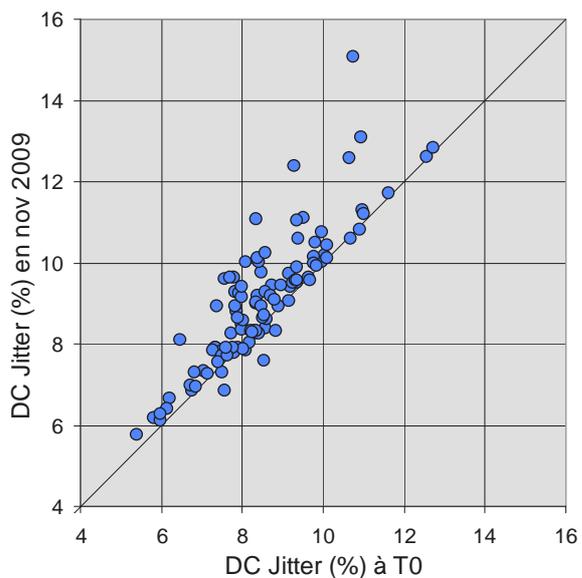
Jitter

Les graphes de la figure 8.4 montrent l'évolution du DC jitter sur une partie des disques de la collection LNE entre T0 et l'analyse de 2009 et entre l'analyse de 2009 et l'analyse de 2011.

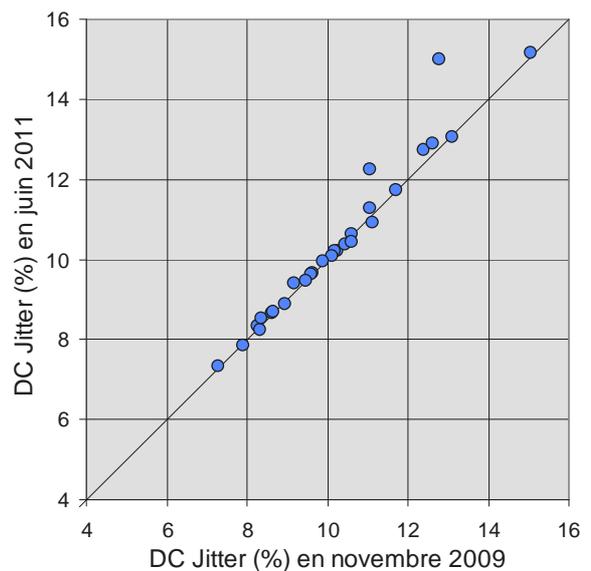
On constate une évolution significative pour une proportion importante des disques entre T0 et 2009. Pour quelques disques, l'évolution se poursuit entre 2009 et 2011.

Fig. 8.4 - Evolution du paramètre DC Jitter moyen entre T0 et 2009 et entre 2009 et 2011

108 DVD±R de la collection LNE



29 DVD±R de la collection LNE



8.3 COLLECTION LNE - MODELES A EVOLUTION RAPIDE

Avec un intervalle d'observation d'au plus 7 ans, l'évolution de la grande majorité des disques de la collection LNE reste faible, à la fois pour les taux d'erreurs numériques et les paramètres du signal HF. Toutefois on a observé des évolutions importantes pour quelques modèles de disques.

7 modèles sur 60 présentent une évolution importante. Parmi ceux-ci, les disques de 2 modèles gravés en 2004 sont devenus illisibles en 2009 et les disques d'un modèle gravé en 2008 sont devenus partiellement illisibles en 2011.

L'analyse détaillée du signal HF a permis d'identifier deux types de dégradations décrites ci-après.

Apparition de micro-taches

Des micro-taches ont été observées sur 3 modèles de 2004 :

- DVD+R Sky (code MID : POMSA001 OR)
- DVD+R SKC (code MID : BeAll00 P40)
- DVD-R Csita (code MID : MCI4XG01 de Mitsui)

Les micro-taches ont un diamètre de l'ordre de 1 μ m. Elles ont été repérées sur les lands 14T et de façon moins nette sur les pits 14T par une baisse très locale de la réflectivité du sillon. Des micro-taches claires sur les pits 14T, avec augmentation de la réflectivité, ont également été observées sur le modèle SKC.

Ces micro-taches sont suffisamment nombreuses pour provoquer de nombreuses erreurs incorrigibles, voire empêcher tout décodage du signal HF.

Ce type de dégradation est très similaire à celui observé sur certains modèles de CD-R en vieillissement naturel, tel que décrit au paragraphe 3.4 du rapport d'étude « Typologie du vieillissement des CD-R » qui est accessible par le lien internet suivant :

<http://www.lne.fr/publications/guides-documents-techniques/typologie-vieillissement-CD-R-gis-don.pdf>

Contrairement au cas des CD-R, il n'a pas été possible de visualiser les micro-taches des DVDR au microscope optique, en raison d'une résolution insuffisante des images, résolution qui permet juste de voir le sillon, mais sans aucun détail à cette échelle.

Les 3 modèles pour lesquels la présence de micro-taches a été détectée en vieillissement naturel avaient été soumis à des essais de vieillissement en étuve à 60°C (non décrits au paragraphe 7). On a constaté des évolutions au cours de ces essais qui sont proches de celles du vieillissement naturel, en particulier par la présence de micro-taches.

Dégradation avec amplification vers le bord externe

Cette dégradation est très similaire à la dégradation fréquemment observée en vieillissement en étuve (§ 7.4) qui se manifeste par une augmentation de la réflectivité des pits (paramètre Amin), une baisse du contraste du signal HF, une augmentation du jitter et du taux d'erreurs numériques PI8.

Une telle dégradation a été observée sur le modèle de DVD-R Memorex (code MID : CMC MAG AF1) de 2004.

8.4 COLLECTION INA - EVOLUTION D'UN MODELE

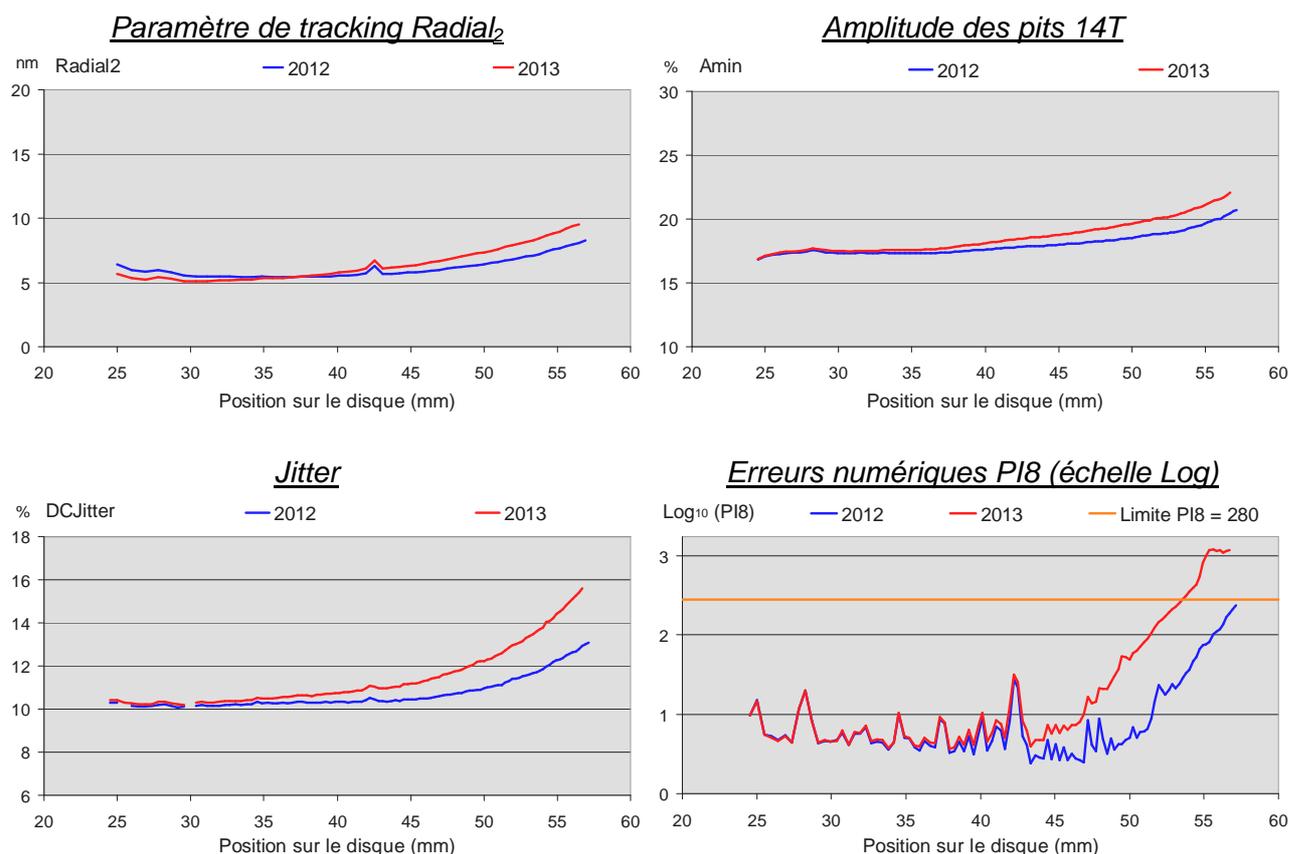
Dans la collection de l'INA, l'un des modèles de disque présente une évolution significative bien qu'encore limitée, compte tenu de la durée de conservation. Il s'agit d'un modèle de fabrication Taiyo Yuden (code MID : TYG03) utilisé majoritairement à l'INA pour l'enregistrement des émissions de télévision à partir de 2009.

L'évolution de ce modèle est du même type que l'évolution observée en vieillissement en étuve, avec une importance grandissante lorsqu'on s'approche du bord externe des disques.

La plupart des disques de ce modèle ont, après 2 ans de conservation, des paramètres A_{min} , Radial₂, Jitter, erreurs PI8 qui augmentent avec la distance au centre du disque. Pour environ un tiers des disques, le seuil de 280 pour les erreurs PI8 est dépassé en fin de disque.

Certains disques, testés à un an d'intervalle, montrent nettement une évolution de la dégradation. C'est le cas du disque dont les paramètres sont montrés sur les graphes de la figure 8.5. Ce disque a été gravé en janvier 2011 et analysé en avril 2012 puis en février 2013. En 2013, la dégradation est déjà importante, avec des erreurs incorrigibles à la fin du disque.

Fig. 8.5 - Evolution des paramètres d'un DVD-R de code MID TYG03



8.5 SYNTHÈSE DU VIEILLISSEMENT NATUREL

Les durées d'observation pour étudier le vieillissement naturel devraient idéalement couvrir une période d'une dizaine d'années, avec des analyses régulières réalisées avec les mêmes analyseurs. Ce sont des conditions difficiles à satisfaire en pratique. Les données sur lesquelles s'appuie cette étude restent parcellaires.

Il a été observé des évolutions rapides (en quelques années) sur une fraction n'excédant pas 10% des modèles. La plupart des modèles ne présentent pas d'évolution significative des paramètres relatifs au signal HF ni des erreurs numériques de décodage.

Aucune tendance générale à tous les modèles n'a été observée de manière certaine sur les paramètres du signal HF, si ce n'est une légère baisse du paramètre d'asymétrie correspondant à une diminution de longueur des pits. Cette baisse se produit en peu de temps, mais ne se poursuit pas. Elle ressemble à la baisse du paramètre d'asymétrie observée au début des vieillissements en étuve. Elle est toutefois de moindre amplitude et n'engendre pas d'erreurs de décodage.

Quelques-unes des évolutions rapides semblent pouvoir être attribuées au développement de micro-taches similaires à celles qui ont pu être détectées sur certains modèles de CD-R.

Un cas intéressant de vieillissement naturel est celui du modèle Taiyo Yuden (code MID TYG03) dans la collection de l'INA. On a peu de recul sur ce modèle car les disques ont été gravés à partir de 2009. Toutefois, la vitesse de dégradation est suffisante pour être détectée par des analyses à seulement un an d'intervalle. La dégradation est très similaire à celle, fréquemment observée en vieillissement accéléré, qui se caractérise par une amplification du centre vers le bord externe des disques. Le stade d'évolution est variable d'un disque à l'autre de la collection et une projection dans l'avenir reste difficile. Il semble cependant qu'une proportion importante des disques de ce modèle pourrait présenter des pertes de données après une durée de conservation d'une dizaine d'années seulement.

9 CONCLUSION

Les analyses, réalisées au LNE depuis 2005 sur différents modèles de DVD enregistrables nous a permis de donner une description synthétique de leurs modes de dégradation au cours du temps. L'étude a porté sur l'action de la lumière, l'action de la chaleur humide, et le comportement en conditions normales de conservation (vieillessement naturel).

Vieillessement sous l'effet de la lumière

Le vieillissement sous l'action de la lumière est le plus simple à décrire et à expliquer. Même si l'on observe des vitesses d'évolution différentes d'un modèle de DVDR à l'autre, on constate pour tous les modèles, une évolution de la réflectivité du sillon tant au niveau des zones gravées qu'au niveau des zones non gravées. Cette évolution est régulière au cours de l'exposition. Elle conduit dans tous les cas à une baisse du contraste entre les zones gravées et les zones non gravées. Cette baisse de contraste est à l'origine de l'augmentation du jitter, la position des transitions entre les zones gravées et non gravées perdant en précision. Lorsque le jitter atteint un certain seuil, il apparaît une augmentation des erreurs de décodage qui va en s'amplifiant au fur et à mesure de l'exposition jusqu'à rendre le décodage impossible.

Un modèle explicatif de l'évolution de la réflectivité du sillon sous l'effet de la lumière a été développé. Il fait l'hypothèse que la cause principale de l'évolution est la dégradation du colorant qui n'a pas été brûlé pendant la gravure. Il s'agit du colorant se trouvant sur les zones non gravées du sillon et sur l'intersillon (ou plateau). Cette dégradation du colorant est sans doute liée à la rupture de certaines liaisons chimiques par les photons. L'indice de réfraction des colorants utilisés dans les DVDR étant initialement très élevé, avec des valeurs de l'ordre de 2,5, la décomposition partielle du colorant sous l'effet de la lumière ne peut que faire baisser la valeur de cet indice.

Les différences d'évolution de réflectivité, d'un modèle de DVDR à l'autre, peuvent s'expliquer par les différences dans la géométrie de la couche de colorant : épaisseur dans le sillon et sur le plateau, profondeur du sillon, ainsi que par les différences de l'indice de réfraction initial du colorant. La sensibilité à la lumière des colorants n'est pas non plus la même, ce qui explique des vitesses d'évolution différentes. Le modèle de calcul de la réflectivité du sillon a pu rendre compte des évolutions de deux modèles de DVDR choisis pour leur comportement notablement différent. Cela conforte la validité des hypothèses à la base du calcul.

Vieillessement sous l'effet de la chaleur humide

L'étude de ce vieillissement est basée sur des essais en étuve à 80°C, avec une hygrométrie de 80 à 85%. Ces conditions sont censées accélérer les processus de dégradation, par rapport aux conditions normales de conservation.

Comme pour le vieillissement à la lumière, on observe généralement une modification de la réflectivité du sillon sur les zones gravées et non gravées. Toutefois les évolutions ne coïncident pas avec celles du vieillissement à la lumière. Dans le cas du vieillissement en température et humidité, l'évolution de la réflectivité des zones non gravées ne semble pas jouer un rôle aussi important et on ne peut pas expliquer les évolutions par l'hypothèse d'une réaction chimique qui modifierait l'indice optique du colorant non brûlé. L'évolution semble davantage porter sur les zones gravées dont la réflectivité augmente pour tous les modèles, en produisant une baisse du contraste de la modulation.

Le phénomène le plus remarquable du vieillissement sous l'effet de la chaleur humide concerne la variabilité de l'évolution selon la distance au centre du disque. Il est en effet fréquent d'observer une augmentation progressive de la dégradation lorsqu'on va du bord interne du disque (début de l'enregistrement) vers le bord externe. Ainsi la partie la plus externe du disque est celle qui voit

apparaître en premier les erreurs numériques incorrigibles. L'augmentation des erreurs du centre vers le bord externe est très bien corrélée avec l'augmentation de réflectivité des zones gravées et l'augmentation du jitter. Plus étonnant ces augmentations sont aussi corrélées avec une détérioration de qualité du suivi du sillon (paramètre de tracking Radial₂). Cela évoque une dégradation du sillon, peut-être liée à l'évolution du collage des deux galettes de polycarbonate constituant un DVDR.

Relations entre vieillissement naturel et artificiels

Les disques étudiés en vieillissement naturel étaient tous conservés à l'abri de la lumière. De ce fait, on ne retrouve pas dans leur évolution les caractéristiques du vieillissement à la lumière : homogénéité de la dégradation sur la surface du disque et forte évolution de la réflectivités des zones non gravées.

A contrario, l'évolution s'amplifiant du centre vers le bord externe des disques, qui est fréquente en vieillissement en chaleur humide, a été observée sur au moins un modèle. L'évolution des paramètres de ce modèle est très similaire à celle observée en vieillissement en chaleur humide sur d'autres modèles, ce qui indique qu'il s'agit très probablement du même processus. L'origine de ce processus n'est pas complètement identifiée, mais il est peu probable qu'il s'agisse d'une réaction chimique de décomposition du colorant comme celle produite par la lumière.

En vieillissement naturel, d'autres processus ont été mis en évidence, comme l'apparition de micro-taches dont les dimensions sont de l'ordre de la largeur du sillon. Assez peu de modèles sont concernés, mais il s'agit dans tous les cas d'évolutions rapides conduisant en quelques années à la perte des données enregistrées. Une hypothèse sur l'origine de ces micro-taches pourrait être la présence d'impuretés dans le colorant, résultant d'un défaut de fabrication (solvant du colorant non complètement évaporé par exemple). L'apparition de micro-taches a également été observée en vieillissement en étuve.

En conclusion, le vieillissement sous l'effet de la chaleur humide permet d'accélérer certains processus de dégradations des DVD enregistrables que l'on reconnaît en vieillissement naturel. L'utilisation de taux d'hygrométrie très élevés n'est toutefois pas souhaitable, car susceptible d'apporter des artefacts (cf. § 7.5). Si l'effet de la lumière est indéniable sur les DVD enregistrables, le type de dégradation qu'elle induit ne se retrouve pas sur les disques conservés à l'abri de la lumière.

ANNEXE 1 – CALCUL DE LA REFLECTIVITE DES ZONES GRAVEES ET NON GRAVEES D'UN DVD ENREGISTRABLE (DVD±R)

HYPOTHESES DU CALCUL

Le spot laser focalisé du faisceau de lecture d'un disque optique recouvre à la fois le sillon et une partie de l'inter-sillon (plateau). La lumière réfléchiée par le sillon interfère avec celle réfléchiée par le plateau, pouvant donner lieu à un phénomène d'extinction qui participe au contraste des zones gravées et non gravées.

La réflectivité des zones non gravées (lands) doit être élevée. Pour cela, l'interférence doit être constructive (ondes en phase).

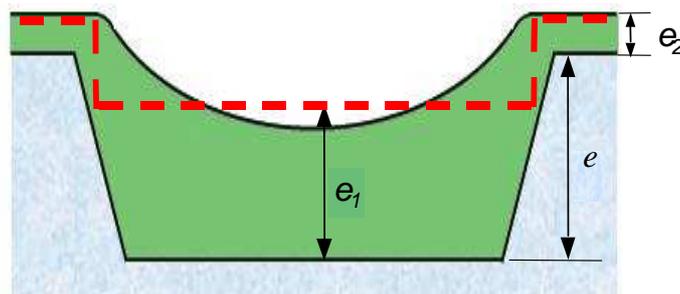
La réflectivité des zones gravées (pits) doit être la plus faible possible pour avoir un bon contraste pit / land. Pour cela, l'interférence doit être destructive (ondes en opposition de phase).

Dans la réalité les ondes réfléchies par le plateau et le sillon ne sont ni parfaitement en phase sur les lands ni parfaitement en opposition de phase sur les pits, car de nombreux paramètres non totalement maîtrisables entrent en jeu. De plus, la réflectivité des lands ne doit pas être maximale, c'est à dire égale à celle du plateau seul. En effet un contraste entre le plateau et les lands est nécessaire pour le guidage radial de la tête de lecture lors de la gravure (push-pull).

Afin de déterminer l'influence des différents paramètres, on fait des hypothèses simplificatrices sur la géométrie du sillon. La couche de colorant a une épaisseur différente dans le sillon et sur le plateau. Elle est très mince sur le plateau, nettement plus épaisse dans le sillon.

Dans le sillon, l'épaisseur est plus faible au centre que sur les bords en raison de la viscosité et de la tension superficielle du colorant avant l'évaporation du solvant. Ce remplissage partiel du sillon, obtenu lors du couchage du colorant par « spin coating », est très important, car il donne la possibilité d'une interférence destructive sur les pits. En effet, compte tenu du fait que les indices du colorant décomposé et du polycarbonate sont proches, une surface plane du colorant (côté métal) ne donnerait quasiment aucune interférence sur les pits et donc une réflectivité élevée.

La modélisation est basée sur le remplacement de la surface non plane du colorant par deux plans, l'un sur le plateau et l'autre dans le sillon, comme indiqué sur le schéma ci-dessous (trait rouge pointillé).



Les ordres de grandeur de la profondeur du sillon et de l'épaisseur du colorant sont les suivants :

- e : profondeur du sillon dans le polycarbonate (~ 180 nm)
- e_1 : épaisseur du colorant dans le sillon (~ 110 nm)
- e_2 : épaisseur du colorant sur le plateau (~ 20 nm)

Ces dimensions font que le déphasage entre la lumière réfléchiée par le plateau et la lumière réfléchiée par le sillon est faible (inférieur à $\pi/2$) sur les zones non gravées (maximum de réflectivité) et proche de π sur les zones gravées (minimum de réflectivité).

AMPLITUDE RESULTANT DE L'INTERFERENCE DES 2 PARTIES D'UN FAISCEAU LASER AYANT TRAVERSEES DES MILIEUX D'INDICES OPTIQUES DIFFERENTS

L'**indice de réfraction** n d'un milieu est le rapport de la vitesse de propagation de la lumière dans ce milieu à la vitesse de propagation de la lumière dans le vide. Il est toujours supérieur à 1 car la vitesse de propagation dans le vide est une limite maximale.

Le chemin optique D est défini par le produit de l'indice de réfraction par la distance parcourue :

$$D = \int n \, dx \quad \text{où } x \text{ représente une distance.}$$

D s'exprime en unité de longueur.

Considérons une onde suivant un chemin optique D_1 et interférant avec une onde issue de la même source mais ayant suivie un chemin optique D_2 . Soient A_1 et A_2 les amplitudes de chacune des deux ondes. L'amplitude résultante A se calcule comme la longueur de la somme de deux vecteurs ayant des longueurs A_1 et A_2 faisant entre eux un angle $2\pi \frac{D_2 - D_1}{\lambda}$ (λ est la longueur d'onde dans le vide).

Cette amplitude résultante est donnée par la formule :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \left[2\pi \frac{D_2 - D_1}{\lambda} \right]}$$

Posant $A_0 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$ et $K = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2} < 1$, on peut écrire :

$$A = A_0 \sqrt{1 + K \cos \left[2\pi \frac{D_2 - D_1}{\lambda} \right]}$$

L'interférence est constructive pour $|D_2 - D_1| = 0, \lambda, 2\lambda, \text{ etc.}$

L'interférence est destructive pour $|D_2 - D_1| = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \text{ etc.}$

La valeur maximale de l'amplitude résultante A est $A_1 + A_2$, sa valeur minimale est $|A_1 - A_2|$.

Les indices des matériaux traversés par la lumière dans un DVDR sont les suivants :

- n_0 : indice de réfraction du polycarbonate ($\sim 1,55$)
- n_1 : indice de réfraction du colorant non décomposé (2 à 2,5)
- n_2 : indice du colorant décomposé ($\sim 1,5$)

En plus de l'indice de réfraction, un milieu agit sur la propagation de la lumière par son **absorbance** qui implique une décroissance exponentielle de l'amplitude en fonction de la distance parcourue. Pour prendre en compte l'absorbance d'un matériau, on définit son indice de réfraction complexe $n + i\chi$ où χ est le **coefficient d'extinction** (sans dimension).

L'amplitude complexe d'une onde se propageant selon x s'écrit : $A = e^{2i\pi \frac{x}{\lambda}(n+i\chi)} = e^{-2\pi \frac{\chi x}{\lambda}} e^{2i\pi \frac{nx}{\lambda}}$

L'atténuation de l'amplitude sur une distance égale à la longueur d'onde λ vaut $e^{-2\pi \chi}$.

Dans le cas des colorants des DVDR, le coefficient d'extinction est plus important avant brûlage qu'après. Il est compris entre 0,05 et 0,15 avant brûlage (χ_1) et proche de 0 après brûlage (χ_2).

L'absorbance du polycarbonate est beaucoup plus faible et sera négligée sur les distances sur lesquelles se produisent les interférences (moins de 200 nm).

CALCUL DES AMPLITUDES ET DES CONTRASTES

Chemins optiques

On considère les chemins optiques sur le plateau, sur le sillon au niveau d'un land et sur le sillon au niveau d'un pit. Ils sont calculés sur un trajet aller-retour partant du plan du fond du sillon et y revenant après réflexion sur la surface métallique.

Sur le plateau, le faisceau traverse :

- une épaisseur $2e$ de polycarbonate d'indice n_o ,
- une épaisseur $2e_2$ d'indice n_1 (colorant non brûlé)

Le chemin optique vaut : $D_o = 2(n_o e + n_1 e_2)$

Sur le sillon au niveau d'un land, le faisceau traverse :

- une épaisseur $2e_1$ d'indice n_1 (colorant non brûlé)

Le chemin optique vaut : $D_1 = 2 n_1 e_1$

Sur le sillon au niveau d'un pit, le faisceau traverse :

- une épaisseur $2e_1$ d'indice n_2 (colorant brûlé)

Le chemin optique vaut : $D_2 = 2 n_2 e_1$

Réfectivité du plateau

Elle dépend de la réflectivité de la couche métallique et de l'absorbance du colorant sur le plateau.

On appelle A_m l'amplitude renvoyée par la couche métallique, hors absorption par le colorant.

La réflectivité du plateau s'écrit :

$$A_p = A_m e^{-\frac{2\pi(2n_1e_2)\chi_1}{\lambda}}$$

Réfectivité du sillon sur un land

La réflectivité A_{\max} du sillon sur un land dépend du déphasage $2\pi \frac{D_o - D_1}{\lambda}$ ainsi que des amplitudes A_1

et A_2 des ondes réfléchies par le plateau et par le sillon. Les intensités relatives de chaque onde sont liées à la fraction du spot laser sur le sillon. Soit α cette fraction, $1 - \alpha$ étant la fraction sur le plateau. Les amplitudes dépendent également de l'absorption du colorant traversé :

$$\text{Sillon (land) : } A_1 = \alpha A_m e^{-\frac{2\pi(2n_1e_1)\chi_1}{\lambda}}$$

$$\text{Plateau : } A_2 = (1 - \alpha) A_m e^{-\frac{2\pi(2n_1e_2)\chi_1}{\lambda}}$$

$$\text{Posant } k_1 = \frac{4}{\lambda} [n_o e - n_1 (e_1 - e_2)] , A_{01} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} , K_1 = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 + A_2^2}$$

La réflectivité du sillon non gravé s'écrit :

$$A_{\max} = A_{01} \sqrt{1 + K_1 \cos(k_1 \pi)}$$

Réfectivité du sillon sur un pit

La réfectivité A_{\min} du sillon sur un pit dépend du déphasage $2\pi \frac{D_o - D_2}{\lambda}$ ainsi que des amplitudes A_1 et A_2 des ondes réfléchies par le plateau et par gravé.

Le calcul des amplitudes est similaire au cas du sillon non gravé :

$$\text{Sillon (land) : } A_1' = \alpha A_m e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(2n_2e_1)\chi_2}$$

$$\text{Plateau : } A_2 = (1 - \alpha) A_m e^{-\frac{2\pi}{\lambda}(2n_1e_2)\chi_1}$$

$$\text{Posant } k_2 = \frac{4}{\lambda} [n_o e + n_1 e_2 - n_2 e_1], \quad A_{02} = \sqrt{A_1'^2 + A_2^2}, \quad K_2 = \frac{2A_1' A_2}{A_1'^2 + A_2^2}$$

$$\text{La réfectivité du sillon gravé s'écrit : } \boxed{A_{\min} = A_{02} \sqrt{1 + K_2 \cos(k_2 \pi)}}$$

Contraste sillon / plateau :

L'intérêt du contraste sillon (non gravé) / plateau est de permettre le suivi de piste lors de la gravure. Il ne doit donc pas être trop faible.

$$\text{Ce contraste est égal à : } C_{\text{sillon}} = 1 - \frac{A_{\max}}{A_p}$$

Contraste pit / land :

$$\text{Ce contraste est égal à : } C_{\text{pit/land}} = 1 - \frac{A_{\min}}{A_{\max}}$$

APPLICATIONS DU MODELE

Le modèle de calcul comporte de nombreux paramètres qui sont :

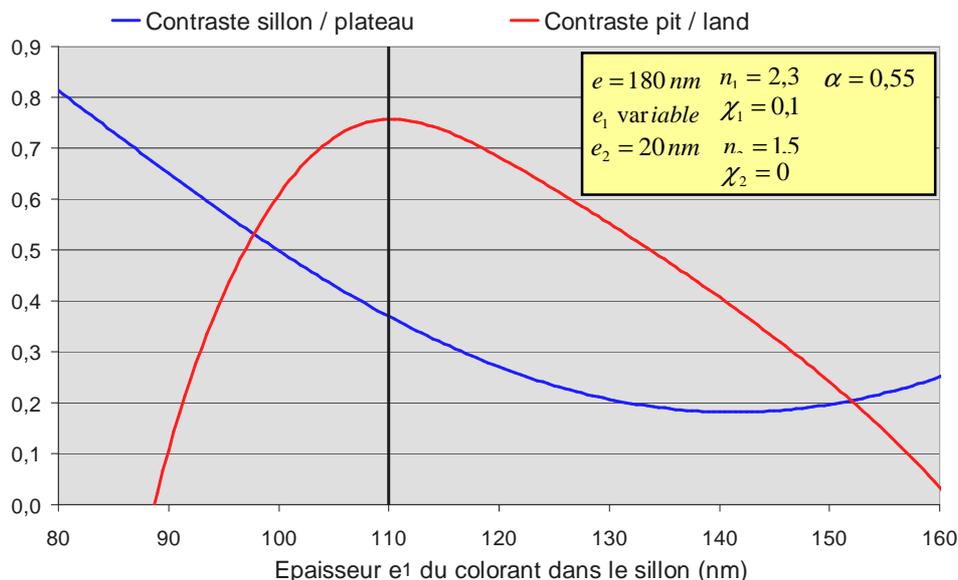
- la profondeur du sillon (e),
- l'épaisseur du colorant dans le sillon (e_1) et sur le plateau (e_2),
- les indices optiques du colorant avant et après brûlage (n_1, χ_1, n_2, χ_2),
- la fraction du faisceau sur le sillon (α),
- la réflectivité de la couche métallique (A_m) vis à vis de la réflectivité de référence utilisée par les analyseurs.

Ces paramètres dépendent du modèle de DVD enregistrable ainsi que du graveur. Leurs valeurs ne sont pas connues de manière précise. Il est évidemment possible de trouver un jeu de paramètres plausible permettant de retrouver par le calcul les valeurs mesurées de A_{max} et A_{min} d'un DVD gravé. Le jeu de paramètres n'étant certainement pas unique.

On obtient cependant quelques enseignements en calculant les courbes de A_{max} , A_{min} et des contrastes en fonction d'un seul paramètre. Sur les différents graphes, les valeurs des paramètres fixes sont indiquées dans le cartouche jaune. On a choisi un jeu de paramètres « plausible » pour un DVDR. Les amplitudes A_{max} et A_{min} sont données en fraction de la réflectivité de référence et non en % comme c'est l'usage habituel : par exemple 0,45 correspond à 45%.

Influence de l'épaisseur du colorant

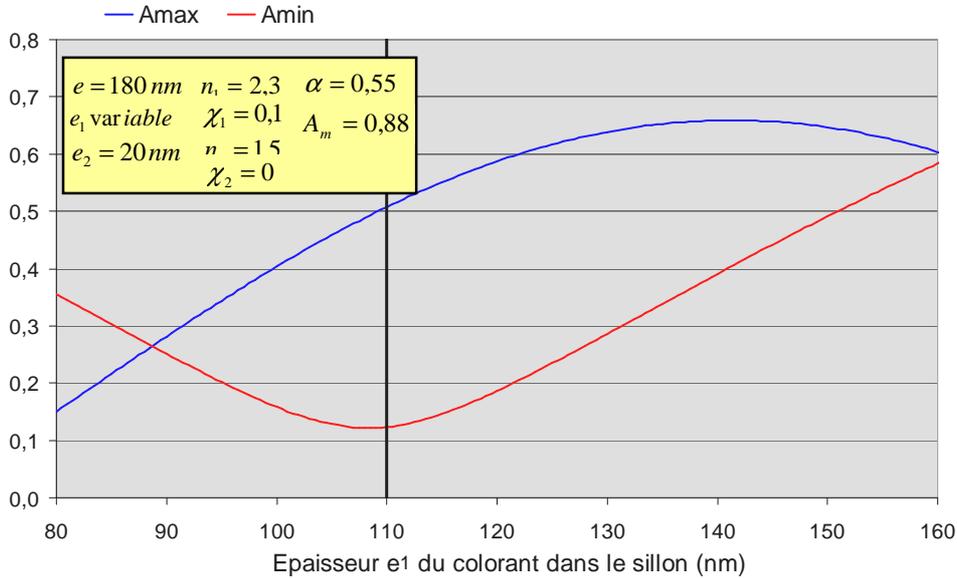
Le graphe ci-dessous montre l'influence, sur le contraste pit / land et sur le contraste sillon / plateau, de l'épaisseur e_1 du colorant dans le sillon. Le contraste pit / land a un maximum assez prononcé autour de 110nm, alors que le contraste sillon / plateau est décroissant dans la zone autour de ce maximum. Cela contraint assez fortement le choix de l'épaisseur du colorant. Dans cet exemple, l'épaisseur doit être de l'ordre de 100 à 120nm.



Les contrastes dépendent aussi de l'épaisseur e_2 du colorant sur le plateau. Le calcul montre qu'une augmentation de e_2 de 5 nm décale la courbe du contraste pit / land d'environ 8 nm vers la droite. Ainsi on obtient un contraste pit / land pratiquement identique en compensant une augmentation de e_2 par une augmentation de e_1 valant 1,6 fois celle de e_2 . Le contraste sillon / plateau est meilleur pour les faibles valeurs de e_2 .

Il apparait que l'épaisseur du colorant, aussi bien sur le plateau que dans le sillon, est critique pour obtenir un bon contraste pit / land.

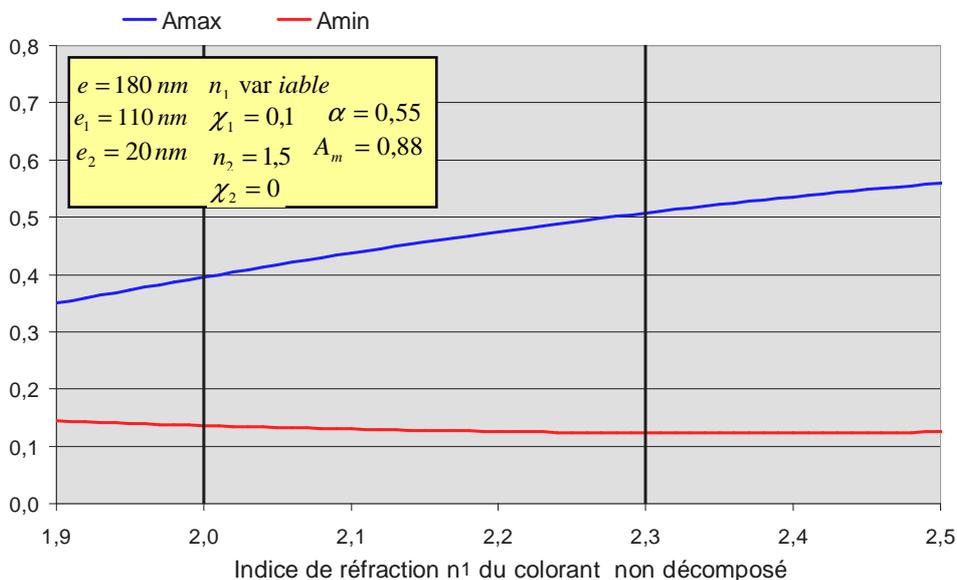
La figure ci-dessous montre la variation des amplitudes A_{max} et A_{min} en fonction de l'épaisseur du colorant dans le sillon. L'optimum du contraste pit / land pour une épaisseur de 110nm coïncide pratiquement avec un minimum de A_{min} mais pas avec le maximum de A_{max} .



Influence d'une variation des indices optiques du colorant

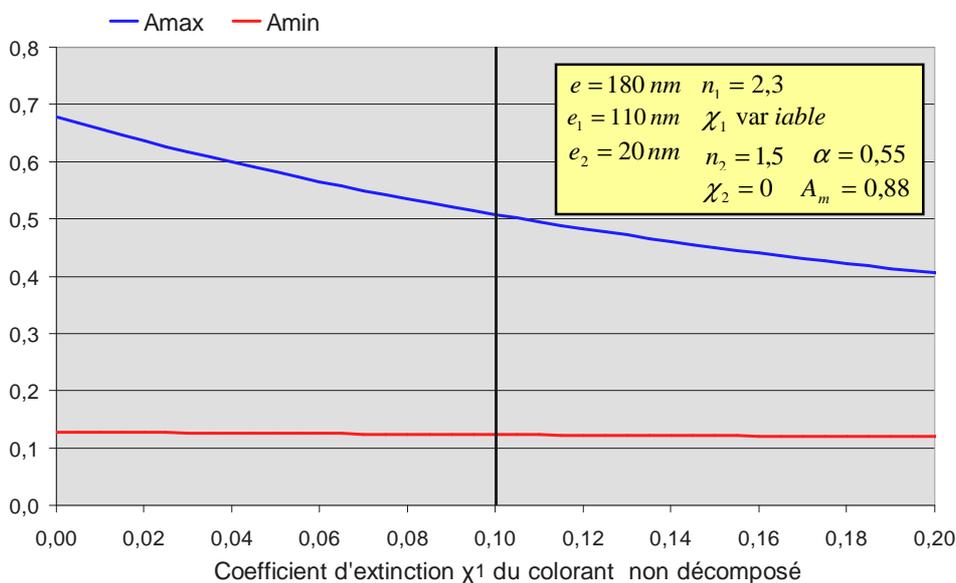
Il est possible qu'une des causes du vieillissement des DVDR soit la décomposition lente du colorant qui entraînant une baisse à la fois de son indice de réfraction n_1 et de son coefficient d'extinction χ_1 . Une telle modification du colorant a des conséquences sur la réflectivité des lands, mais aussi sur celle des pits par le colorant déposé sur le plateau.

Le graphe ci-dessous montre l'influence, sur les amplitudes A_{max} et A_{min} , de l'indice n_1 du colorant non décomposé.



Une baisse de l'indice n_1 de 2,3 à 2 entraîne une baisse de la réflectivité des lands de 50% à 40% et une légère augmentation de la réflectivité des pits qui passe de 12,3% à 13,6%. Il en résulte une baisse importante du contraste pit / land.

Le graphe ci-dessous montre l'influence sur les amplitudes A_{\max} et A_{\min} du coefficient d'extinction χ_1 caractéristique de l'absorption du colorant non décomposé. Une baisse de ce coefficient entraîne une augmentation de A_{\max} , alors que l'amplitude A_{\min} est très peu modifiée.



Une baisse de réflectivité des lands due à la baisse de l'indice de réfraction peut être plus ou moins compensée par l'effet contraire produit par la baisse du coefficient d'extinction.

Influence du graveur sur le contraste pit / land

Pour certains modèles de DVDR, on a constaté qu'il était possible d'obtenir des contrastes assez différents (par exemple 0,65 et 0,75) selon le modèle de graveur utilisé. Le seul paramètre pouvant en rendre compte est l'indice de réfraction du colorant après gravure (n_2). Sa variation d'un graveur à l'autre indique que le colorant n'est pas toujours complètement décomposé par la gravure. La figure ci-dessous donne la variation du contraste pit / land avec n_2 . Sur cet exemple, le contraste est maximum (0,75) pour un indice du colorant décomposé égal à 1,5. Il suffit que l'indice soit de 1,62 pour faire chuter le contraste à 0,65.

