



Laboratoire National de métrologie et d'Essais

***Pérennité des information numériques
enregistrées sur CD-R***

Vieillissement naturel et accéléré

Jean-Michel LAMBERT

PRESENTATION

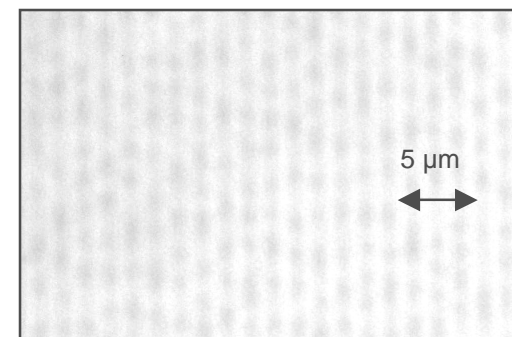
- Les résultats présentés sont une synthèse d'observations faites sur des CD-R lors d'essais et études réalisées au LNE depuis une dizaine d'années.
- Les méthodes d'analyse utilisées donnent une certaine description des dégradations, mais ne permettent pas d'identifier précisément les mécanismes physico-chimiques qui en sont à l'origine.
- Sommaire
 - Moyens d'analyse (microscope optique, analyseurs)
 - L'analyse des erreurs numériques et du signal HF
 - Les différents types de défauts et dégradations :
 - Défauts localisés
 - Dégradations non localisées
 - Résultats
 - En vieillissement naturel
 - En vieillissement accéléré en étuve
 - En vieillissement à la lumière

MOYENS D'ANALYSE : Microscopes optiques

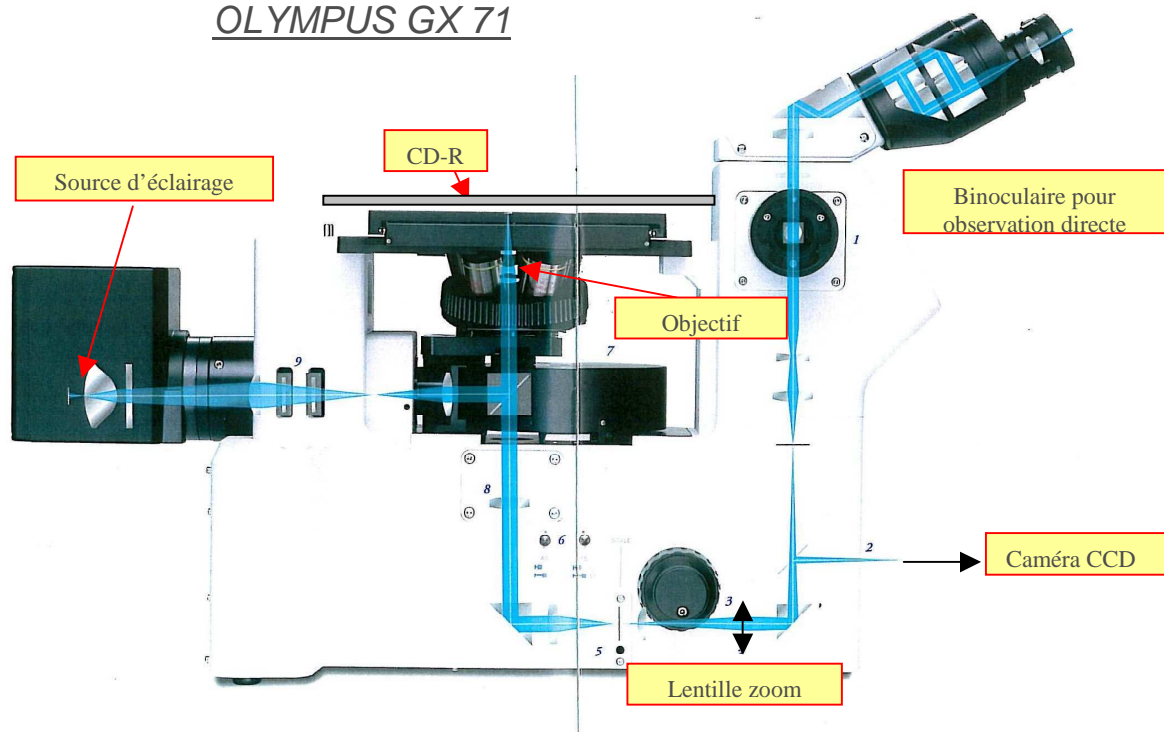
- Observations visuelles et au microscope à faible grossissement (rayures, taches de taille millimétrique,...)
- Observations au microscope à fort grossissement avec éclairage par l'objectif

La visualisation du sillon et de la gravure est délicate. Elle ne permet pas d'apprécier la qualité de la gravure.

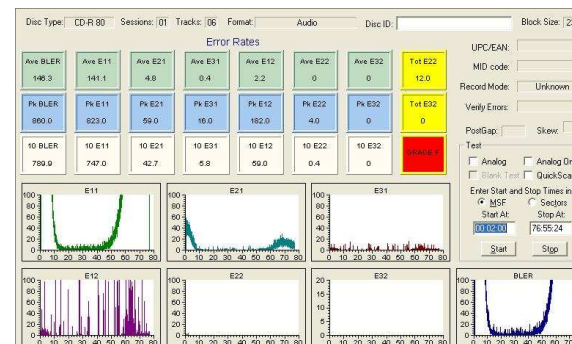
Photo de la gravure



OLYMPUS GX 71



MOYENS D'ANALYSE : Les Analyseurs de CD-R



■ Analyse des erreurs numériques

Elle permet de quantifier la qualité d'un disque gravé, bien avant que la lecture ne devienne impossible.

■ Analyse du signal HF

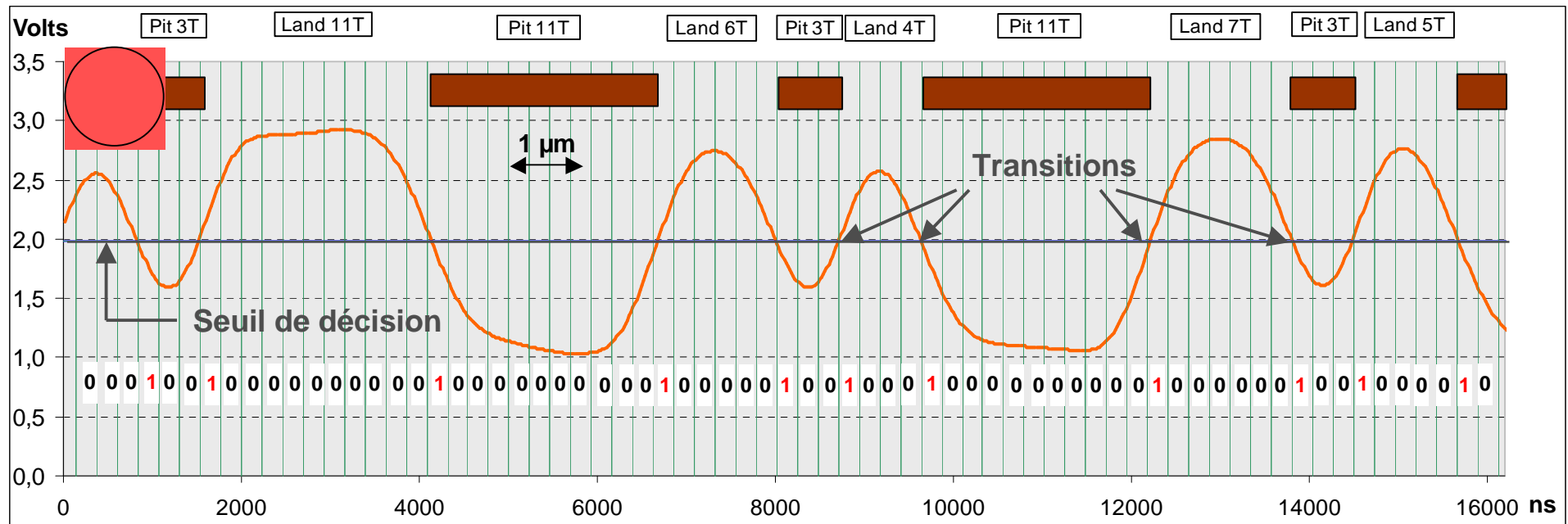
Le signal HF est le signal qui est issu de la tête de lecture. Certains analyseurs donnent les caractéristiques moyennes de ce signal (amplitude, contraste, jitter)

Une étude plus détaillée peut être faite en numérisant des portions du signal. Les débuts de trame, comportant un land 11T et un pit 11T sont les parties les plus intéressantes à étudier.

Le signal HF et le code numérique

L'information numérique est codée par des marques (pits) de longueur 3T, 4T, ..., 11T séparées par des espaces (lands) de longueur 3T, 4T, ..., 11T

Signal optique issu d'un lecteur de CD-R



- ✓ Le décodage du signal optique est lié à la position des transitions vis à vis des tops d'une horloge : un écart supérieur à une demi-période d'horloge ($T/2$) cause une erreur.
- ✓ Le seuil de décision est ajusté pour que la durée cumulée du signal optique situé au-dessus soit égale à celle du signal optique situé en-dessous.
- ✓ La fréquence d'horloge est ajustée par une boucle de rétroaction qui minimise le déphasage entre le signal optique et l'horloge.

Erreurs numériques

- Les erreurs sont accessibles grâce au système correcteur d'erreurs à 2 niveaux

Le premier niveau porte sur des octets successifs (1 bloc)

Les taux d'erreurs sont exprimés en nombre de blocs par seconde

E11, E21, E31 = blocs ayant 1, 2, 3 (ou +) octets faux

BLER = blocs ayant au moins 1 octet faux (max 7350)

Longueurs sur le sillon

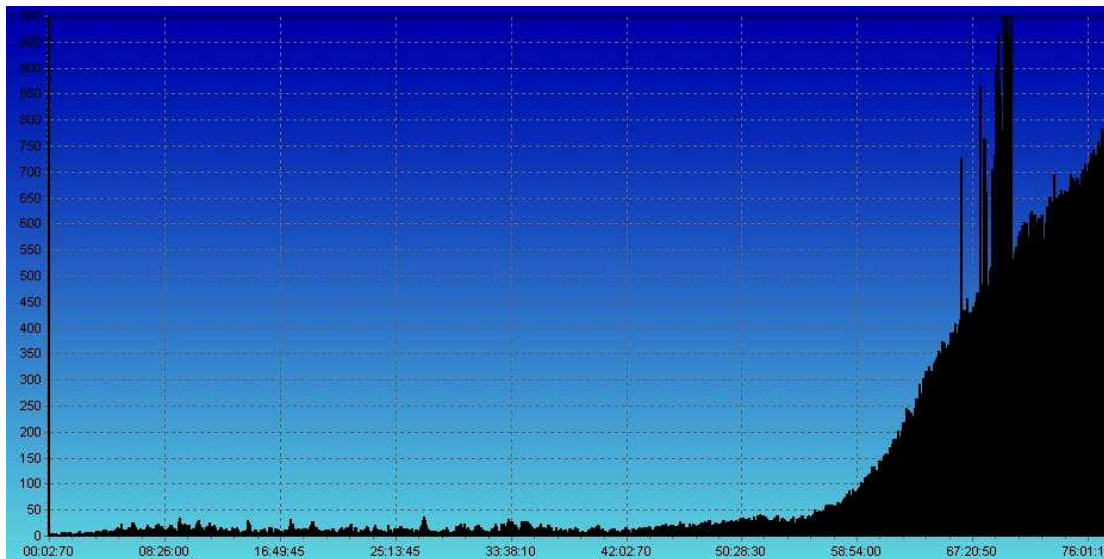
1 bloc	→ 160 μm
108 blocs	→ 18 mm
1 s	→ 1,2 m

Le second niveau porte sur des octets éparpillés sur 108 blocs

Il permet la correction d'erreurs en rafale dues à des défauts ponctuels (taches, rayures, etc.)

Erreurs au deuxième niveau : E11, E22, E32 (incorrigibles)

BLER en fonction de la position



Représentation de surface



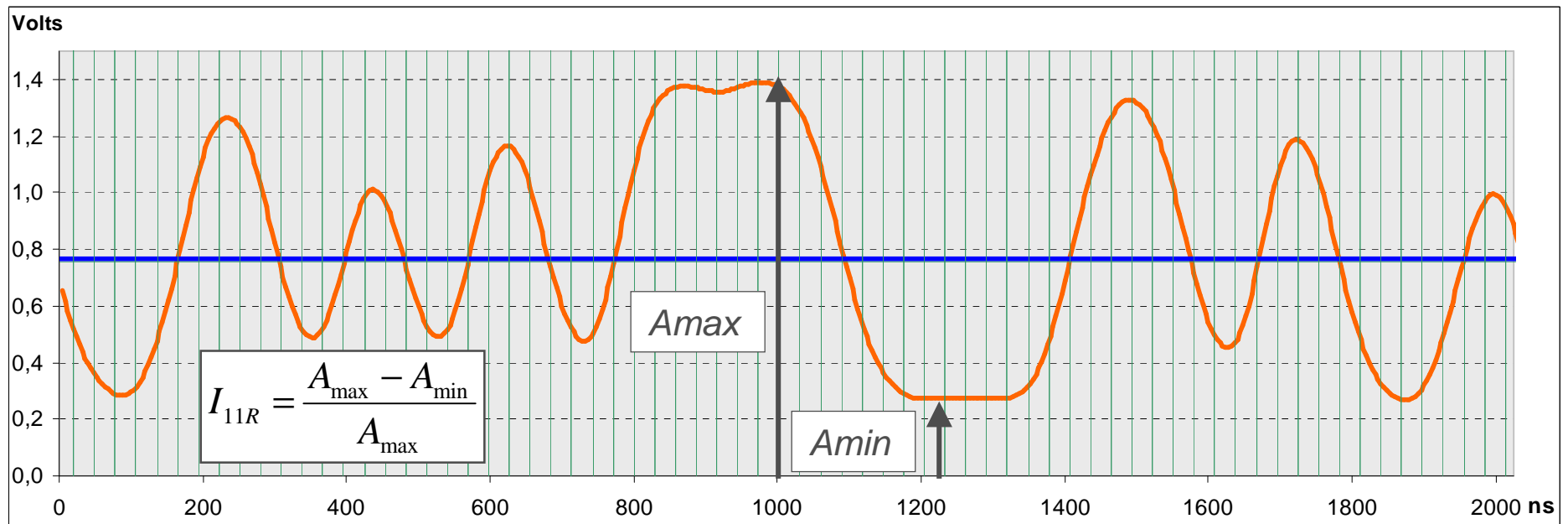
Signal HF : amplitude et contraste

Amplitude (A_{max})

Le paramètre de réflectivité (REF) est égal à la valeur maximale du signal optique (A_{max}) exprimée en % d'une valeur de référence.

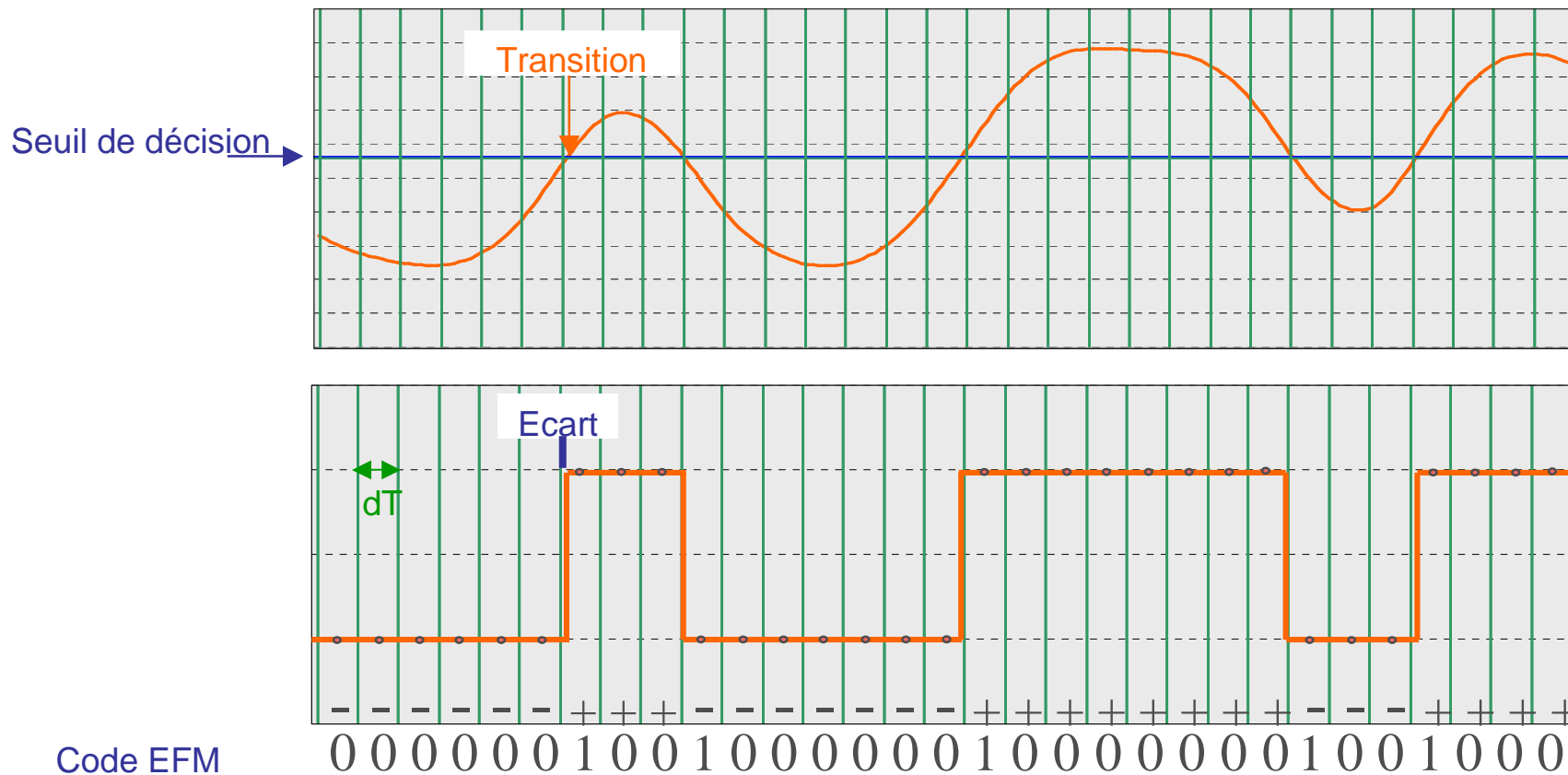
Contraste (I_{11R})

Le paramètre de contraste (I_{11R}) reflète l'écart relatif de réflectivité des zones gravées et non gravées. I_{11R} est généralement compris entre 0,65 et 0,75 et dépend à la fois du modèle de disque et du graveur utilisé.



Signal HF : écarts des transitions

- L'instant de passage du signal HF à la valeur du seuil de décision (transition) ne coïncide pas exactement avec un top de l'horloge.
- Une erreur numérique est produite si l'écart dépasse en valeur absolue 0,5 période d'horloge.

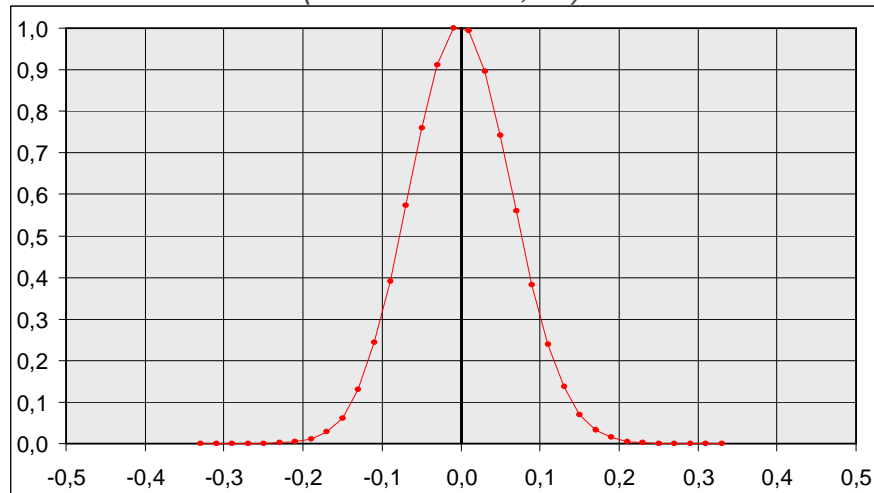


Distribution des écarts des transitions – DC Jitter

- Le **DC Jitter** (Jitter to clock) est l'écart-type de la distribution des écarts des transitions

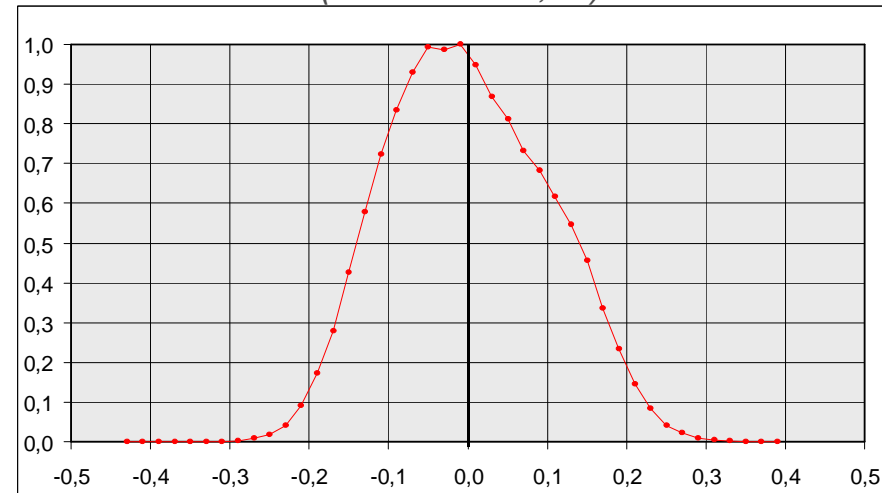
Histogramme relatif à une gravure de bonne qualité

(DC Jitter $\approx 0,06$)



Histogramme relatif à une gravure de qualité moyenne

(DC Jitter $\approx 0,10$)

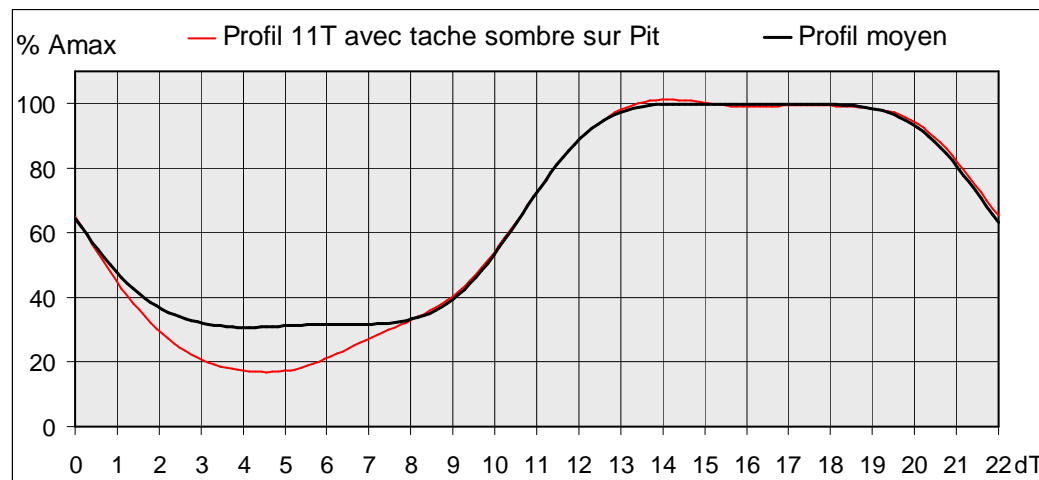


Dans les deux cas, les taux d'erreurs sont très faibles

- Pour certains types de dégradation; il arrive que l'on ait des taux d'erreurs très élevés avec une distribution ayant un faible jitter. Cela est dû à la queue de la distribution qui s'écarte d'une distribution gaussienne. Un pourcentage faible (0,1%) de transitions très décalées suffit à produire un taux d'erreur inacceptable. Une représentation en échelle logarithmique de la distribution permet de mettre en évidence ce type de dégradation.

Signal HF : visualisation des débuts de trame

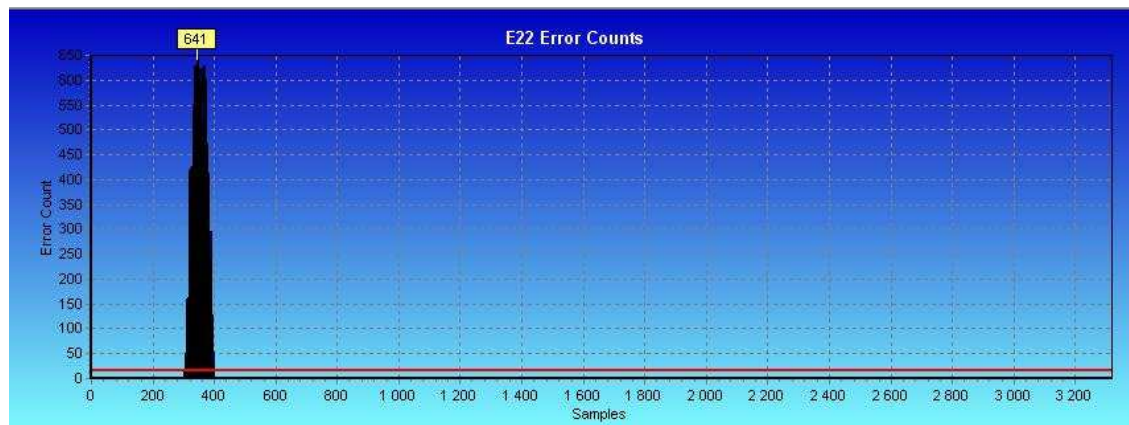
- Certains défauts, à l'origine d'erreurs de décodage, influent peu sur les valeurs moyennes des paramètres du signal HF (amplitude, contraste, jitter). C'est par exemple le cas de perturbations du signal HF qui ont des composantes fréquentielles dans le même domaine fréquentiel que la modulation portant l'information numérique.
- La visualisation des débuts de trame constituées d'un land 11T et d'un pit 11T permet de constater l'existence de ce type de dégradation.
- L'étude des débuts de trame consiste à déterminer un profil moyen sur 1000 à 2000 débuts de trame, en éliminant éventuellement les plus déformés, puis à comparer chaque début de trame à ce profil moyen.



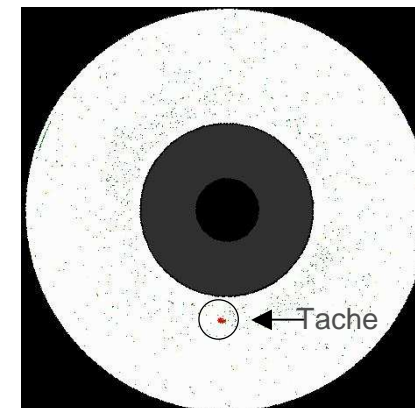
Défauts localisés : leur détection

- Les défauts localisés sont des défauts dans le polycarbonate ou au niveau de la couche sensible. Ils ne sont pas toujours facilement repérables à l'œil nu
- Ils font apparaître un excès d'erreurs de second niveau
La quantité $E12 + 2 E22 + 3 E32 - 3E31$ peut être utilisée pour la détection des défauts localisés
- La représentation de surface du BLER permet la visualisation des défauts les plus importants

Erreurs E22 en fonction de la position

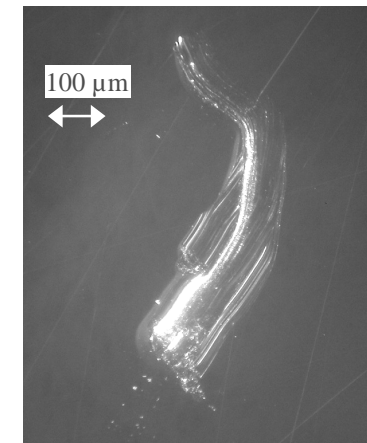
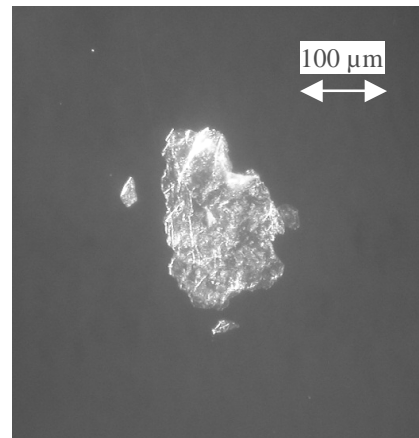
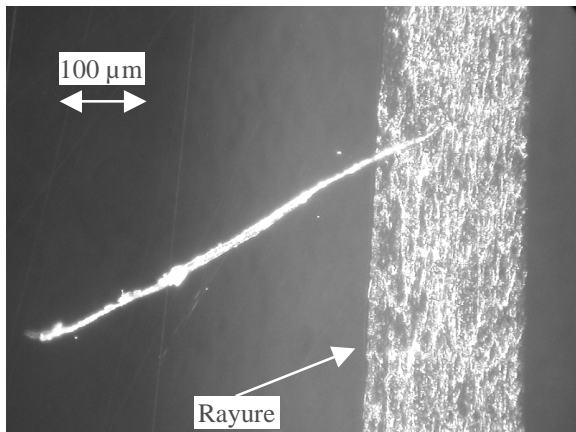


Représentation de surface du BLER



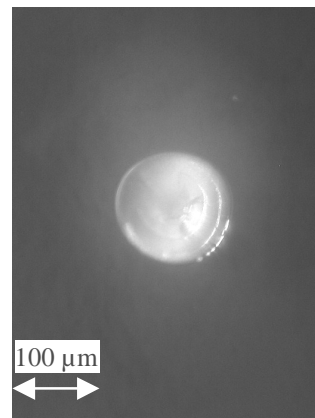
Défauts localisés dans le polycarbonate

- Rayures, poinçonnements en surface du polycarbonate
 - Souvent dues à la manipulation des disques, parfois « spontanées »



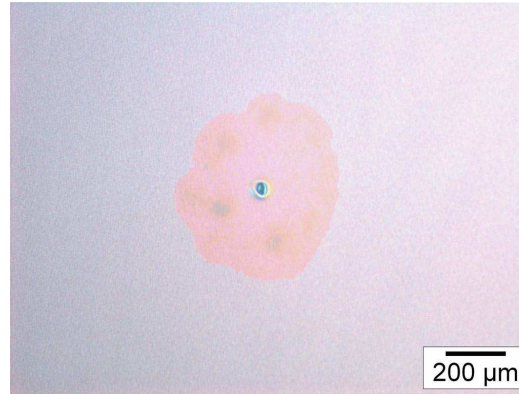
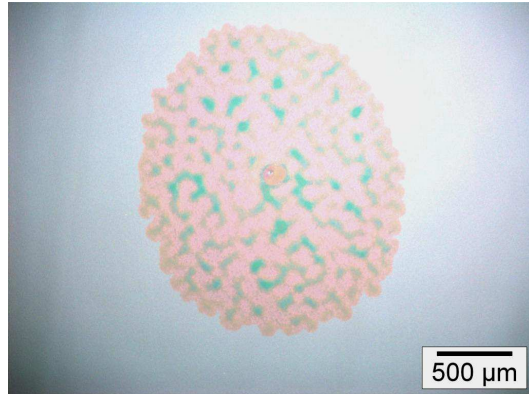
- Lacunes dans la masse du polycarbonate

Exemple de défauts apparus sur un modèle de CD-R après vieillissement en étuve



Défauts localisés au niveau de la couche sensible (1)

- Taches produites à partir d'un point (« piqûre » dans la couche métallique)

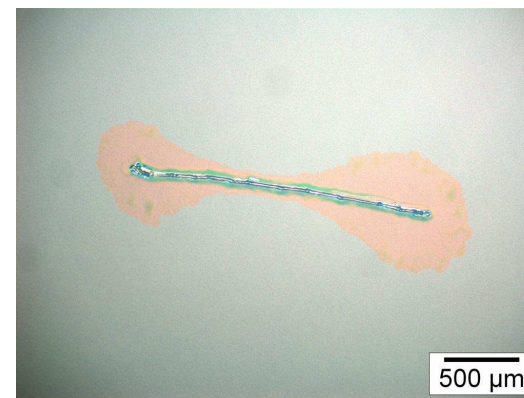


- Tache produite par une rayure de la couche métallique

Dos du disque

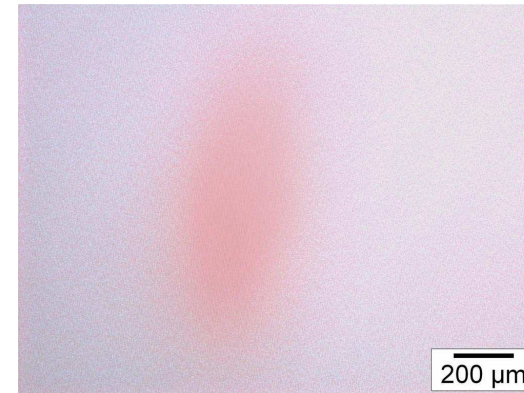
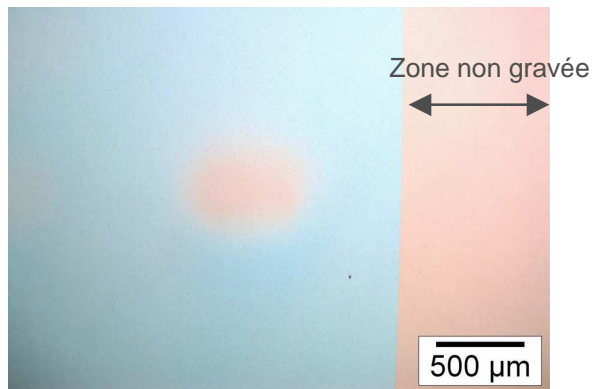


Vue côté lecture (couche sensible)

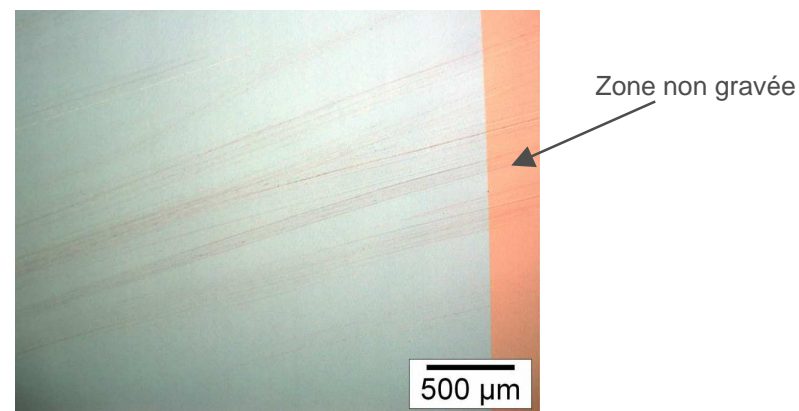


Défauts localisés au niveau de la couche sensible (2)

- Taches floues



- Stries sur la couche sensible (produites à la fabrication)

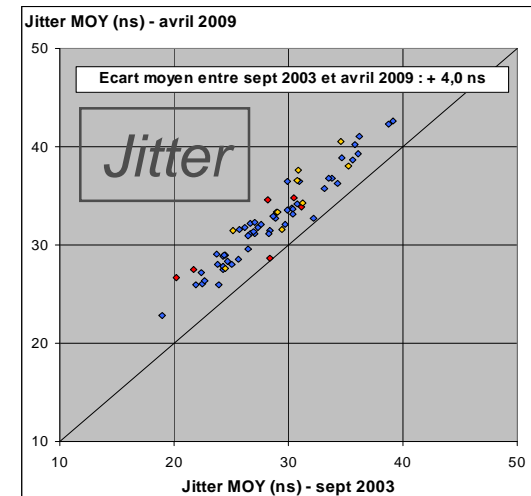
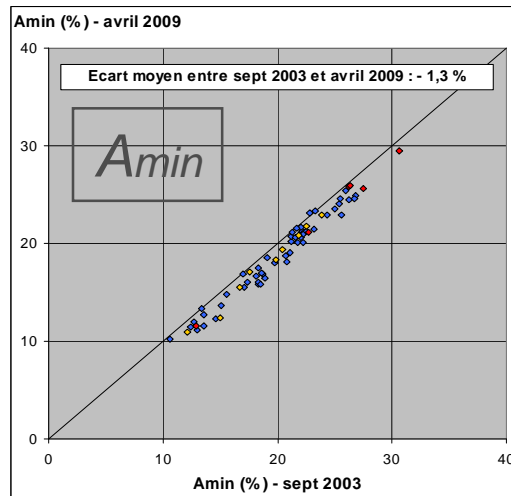
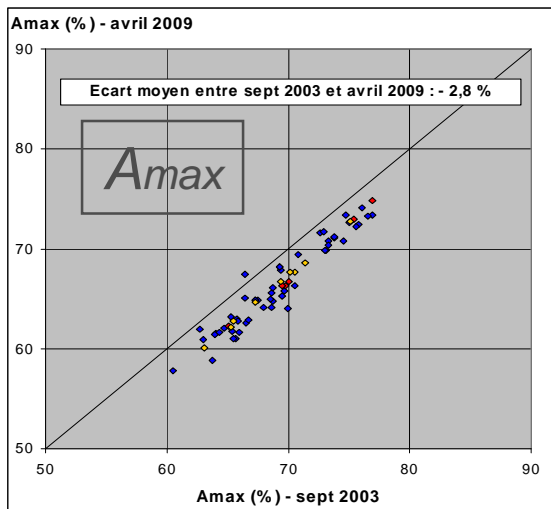


Dégradations non localisées

On peut distinguer deux types d'évolution :

- Une évolution des paramètres moyens du signal HF (amplitude, contraste, jitter)
 - ✓ Elle concerne pratiquement tous les modèles de CD-R en vieillissement naturel, avec en particulier une perte de réflectivité des zones non gravées.
 - ✓ Elle n'engendre pas d'erreurs au décodage numérique tant que l'évolution n'atteint pas un certain seuil.
 - ✓ En vieillissement naturel ce seuil n'est pas atteint sur une dizaine d'années.

Variation sur 6 ans de Amax, Amin et du Jitter en vieillissement naturel (68 CD-R)



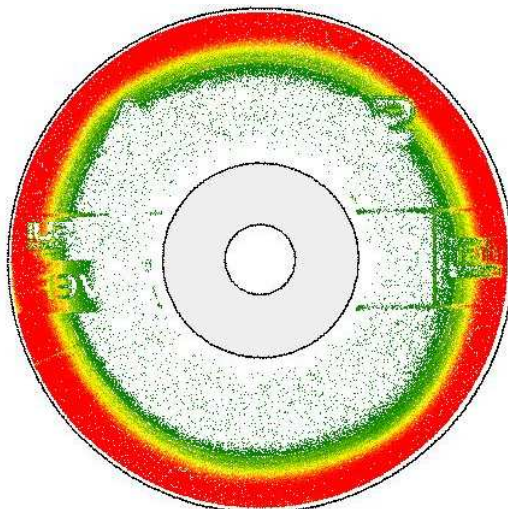
- Des évolutions « exceptionnelles » des taux d'erreurs numériques sur certains modèles

Évolutions exceptionnelles du taux d'erreur

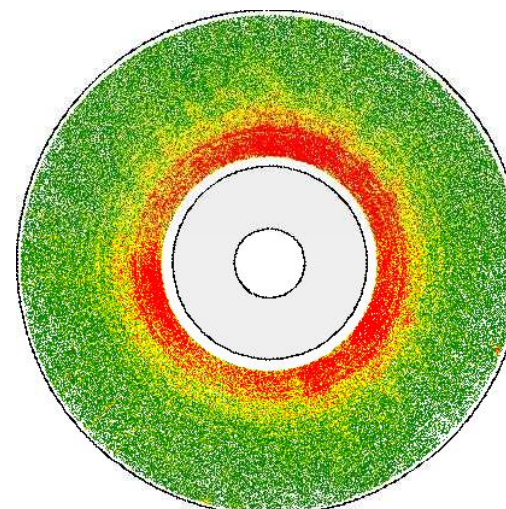
- La répartition des erreurs n'est en général pas homogène sur la surface et il n'y a aucune corrélation entre paramètres du signal HF et erreurs

Exemples de représentation de surface du taux de BLER de CD-R fortement dégradés

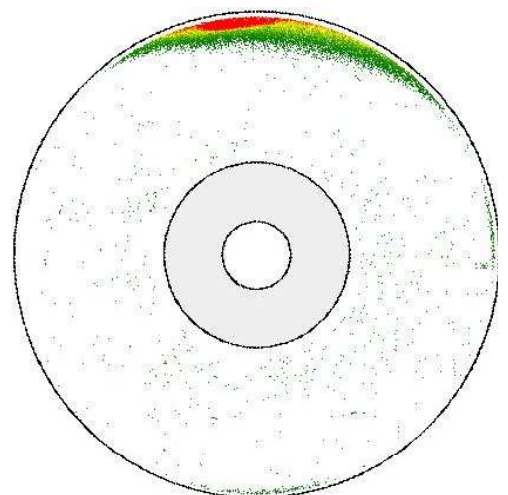
Dégradation par
le bord externe



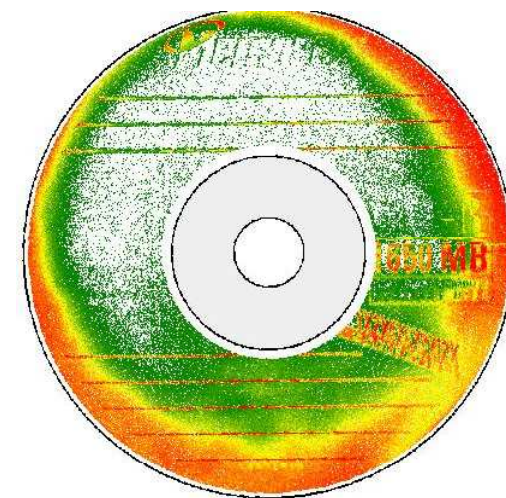
Dégradation par
le bord interne



Dégradation sur
un secteur



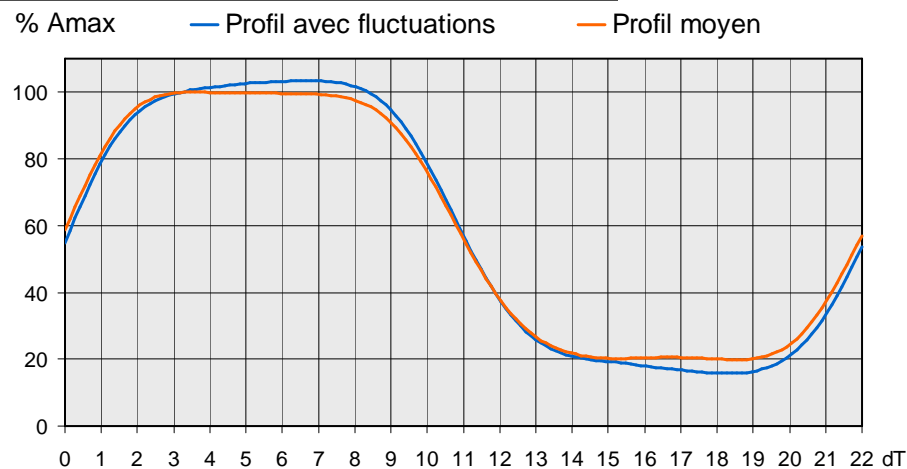
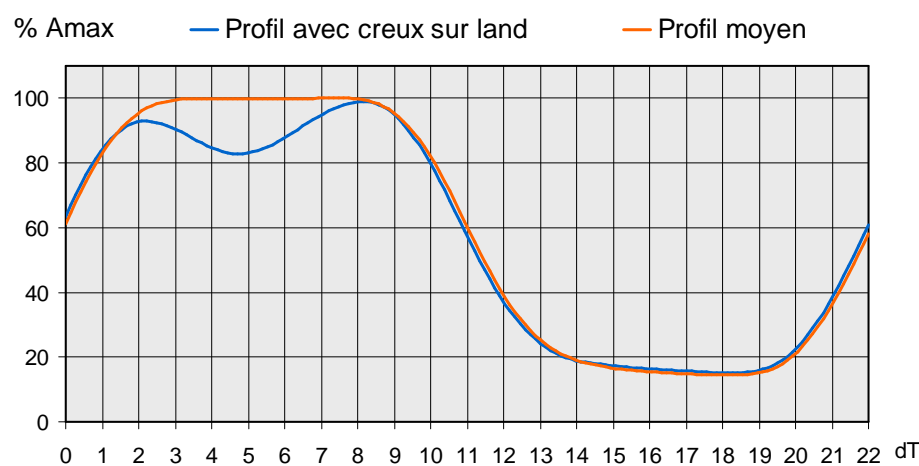
Dégradation par
le bord externe
avec Influence de
la sérigraphie
du dos du disque



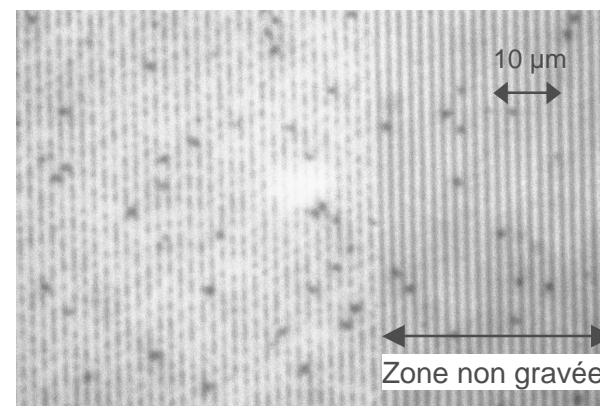
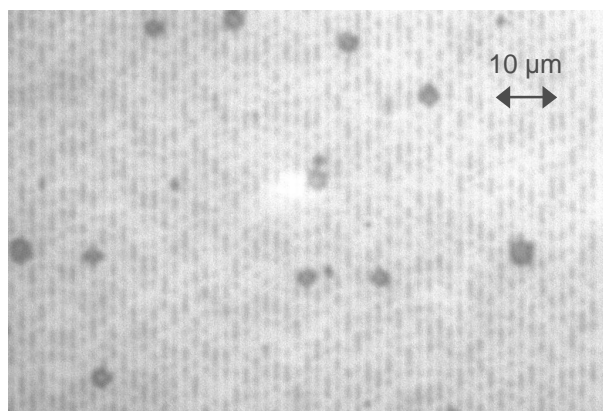
Évolutions exceptionnelles du taux d'erreur

- L'étude du signal HF sur les débuts de trame met en évidence des défauts à l'échelle micrométrique (creux ou fluctuations)

Exemples de débuts de trame avec creux ou fluctuations



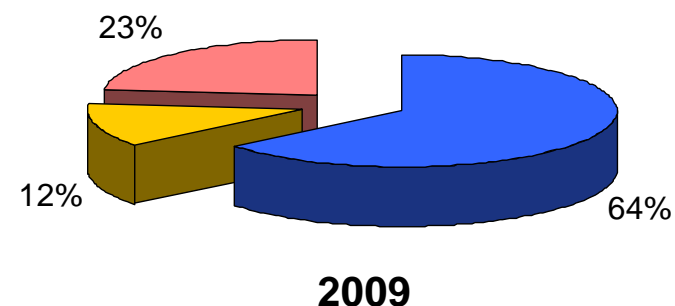
- Les creux correspondent à des taches pouvant être visibles au microscope



Vieillessement naturel : proportion de disques dégradés

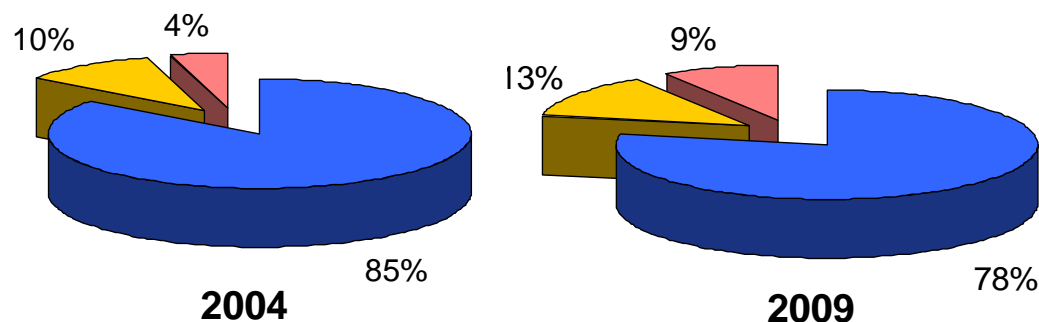
■ Collection privée de 98 CD-R

- CD-R gravés entre 1994 et 2004
- Disques de modèles variés (34 références)
- Conservation : appartement
- Analyses effectuées en 2009



■ Collection de 68 CD-R extraits d'essais réalisés au LNE

- CD-R gravés entre 2000 et 2002
- Disques de modèles très variés (60 références)
- Conservation : faible lumière, 20 à 23 °C, faible hygrométrie
- Analyses effectuées en 2004 et 2009



■ Échantillon de 1500 CD-R d'une collection patrimoniale (INA)

- CD-R gravés entre 1994 et 2004 (135 CD par année)
- 5 références de CD-R représentent 96% de l'échantillon
- Conservation en ambiance contrôlée, sans lumière
- Analyses effectuées en 2005

- ✓ Pas de dégradation pouvant être attribuée à un vieillissement naturel
- ✓ Environ 3% des disques présentent des risques de perte de données dues à des défauts localisés

Vieillesse naturelle : les différents types de dégradation

- Les dégradations sont assez similaires pour les disques d'un même modèle.
 - Elles ne sont pratiquement jamais corrélées à l'évolution des paramètres moyens du signal HF (amplitude, contraste..).
 - La répartition des dégradations à la surface des disques est très souvent inhomogène
 - Augmentation des dégradations près du bord externe dans plus de 50% des cas,
 - Augmentation des dégradations près du bord interne dans environ 10% des cas,
 - Influence de la sérigraphie du dos du disque visible dans plus de 40% des cas.
- Ceci semble mettre en cause « l'encapsulage » de la couche sensible et de la couche métallique entre le substrat (polycarbonate) et le vernis du dos. L'adhérence, en particulier au niveau du bord externe serait un facteur important.
- Les dégradations se manifestent souvent sous la forme de fluctuations ou de creux du signal HF, à l'échelle micrométrique :
 - Apparition de micro-taches sombres dans près de 30% des cas,
 - Fluctuations dans plus de 20% des cas

VIEILLISSEMENT ACCELERE EN ETUVE

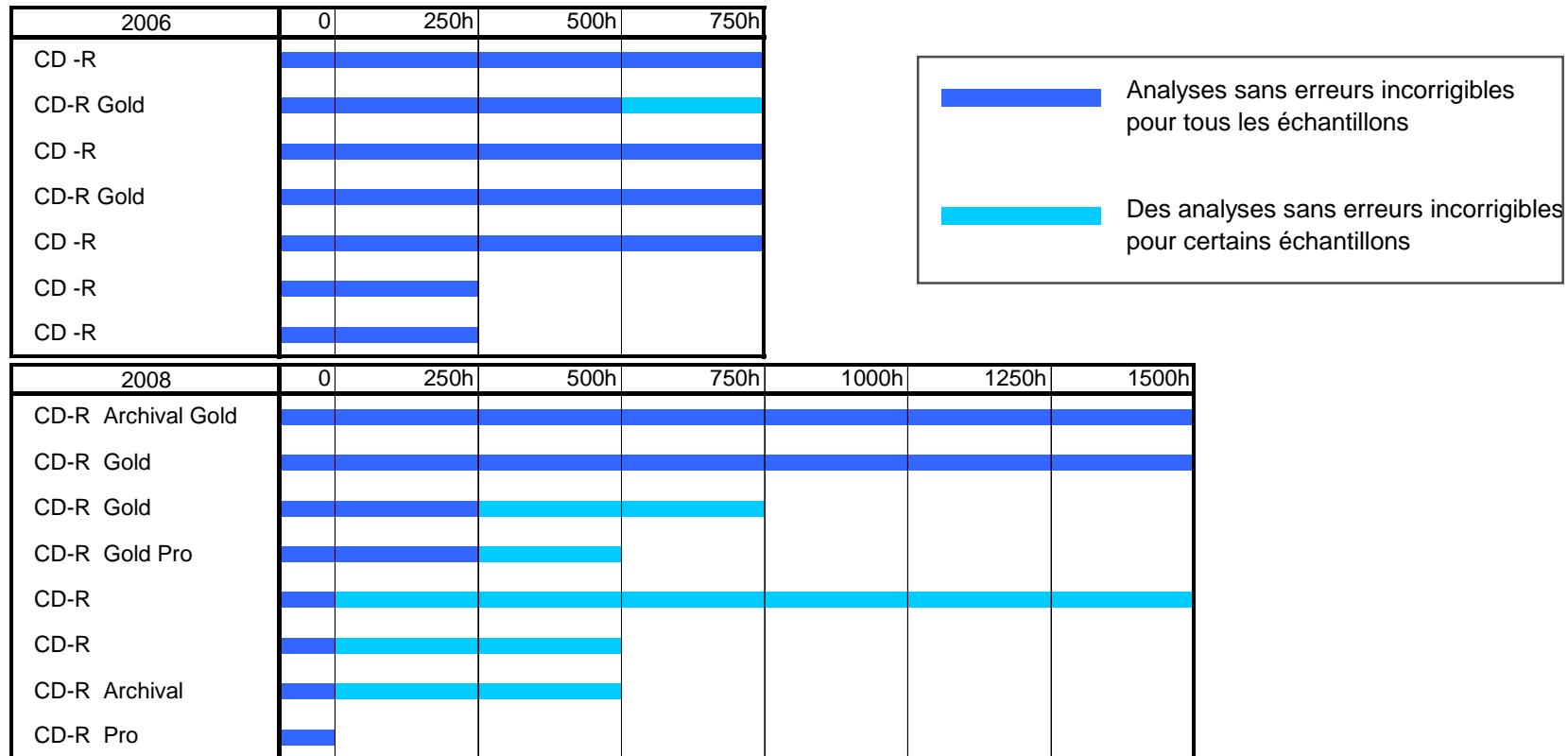
- La température et le taux d'hygrométrie élevées accélèrent les processus de vieillissement
 - ✓ Les essais sont réalisés dans une étuve dont la température et l'hygrométrie sont régulées.
 - ✓ La température utilisée est de 85°C, le taux d'hygrométrie relative est de 85%
 - ✓ La durée des essais peut aller jusqu'à 1500 heures (2 mois). Des analyses sont effectuées au cours de l'exposition en retirant les disques de l'étuve.

Disposition de CD-R dans l'étuve



Résultats de vieillissement en étuve (T=80°C – HR=85%)

Données issues d'études pour la sélection de modèles destinés à l'archivage



Vieillessement naturel et vieillissement accéléré en étuve

On retrouve des similitudes dans les dégradations en vieillissement naturel et en vieillissement accéléré. Toutefois on ne dispose pas de données montrant que, pour un même modèle de disque, les phénomènes physiques sont les mêmes en vieillissement naturel et accéléré.

VIEILLISSEMENT A LA LUMIERE (Suntest)

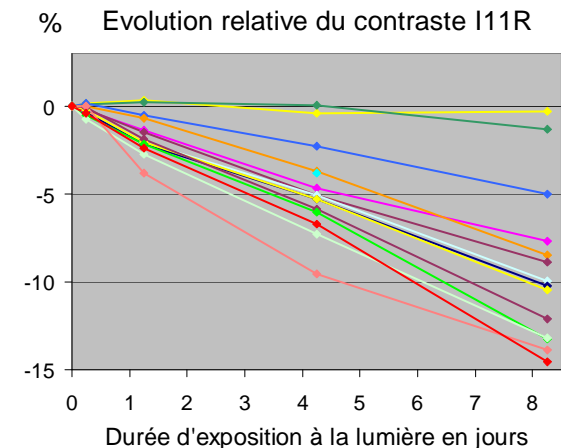
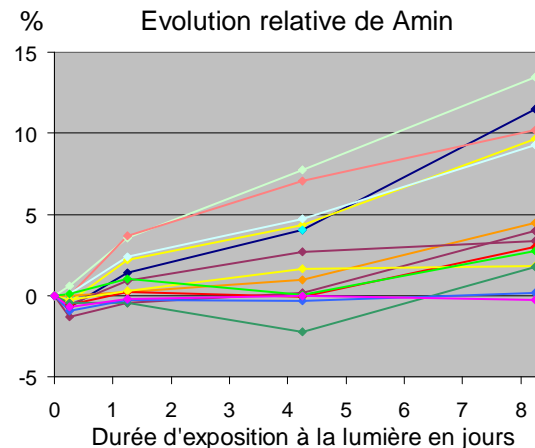
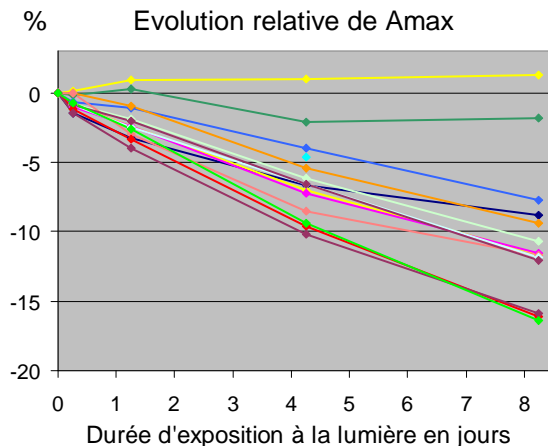
- Le but est de simuler l'éclairage en intérieur, la durée des essais étant réduite grâce à un éclairage de forte intensité.
 - ✓ Les essais sont réalisés dans une enceinte comportant une lampe à arc au Xénon. La lumière est filtrée dans les domaines infra-rouge et ultra-violet. La température est régulée
 - ✓ L'éclairage des disques peut atteindre 750 W/m^2 dans le domaine visible.
 - ✓ Plusieurs analyses sont effectuées au cours de l'exposition.



Résultats de vieillissement à la lumière

- Le vieillissement à la lumière affecte la plupart des modèles de CD-R et présente les caractéristiques suivantes :
 - ✓ Baisse de réflectivité des zones non gravées, parfois augmentation de réflectivité des zones gravées.
 - ✓ Les variations de réflectivité sont très homogènes à l'échelle microscopique.
 - ✓ Les variations de réflectivité sont proportionnelles au temps d'exposition.

Vieillissement à la lumière de 15 modèles de CD-R



- L'impact sur le taux d'erreurs se produit lorsque la baisse de contraste du signal HF atteint 15 à 20%. Au-delà, la dégradation en terme d'erreurs numériques s'amplifie rapidement (effet de seuil).

Conclusions

- L'étude du vieillissement des CD-R fait apparaître une typologie des phénomènes plus complexe que ce que l'on pouvait imaginer à priori.
- **Plusieurs phénomènes de vieillissement** concourent à la dégradation du signal HF et de son décodage. Certaines dégradations surviennent en seulement quelques années.
- **Les phénomènes les plus dangereux** pour les données numériques sont ceux qui présentent une inhomogénéité à l'échelle microscopique, telle que l'apparition de taches de taille micrométrique.
- **La baisse de réflectivité ou de contraste** du signal optique observée en vieillissement naturel ne conduit pas à une dégradation importante du décodage numérique sur une dizaine d'années.
Il pourrait en être autrement sur des durées supérieures.
- Les dégradations obtenues en **vieillissement accéléré** ne présentent pas toujours les mêmes caractéristiques que celles obtenues en vieillissement naturel et pourraient être engendrées par des phénomènes physico-chimiques différents.
Les estimations de durée de vie qui sont faites par la méthode normalisée seraient alors systématiquement surévaluées.

Perspectives

- L'élucidation des mécanismes de vieillissement est un préalable pour mettre en place des essais pertinents en vue d'évaluer la durée de vie d'un modèle de CD-R.

Une thèse a débuté sur ce sujet, en partenariat entre le Laboratoire de Photochimie Moléculaire et Macro-moléculaire (LPMM) de Clermont-Ferrand et le LNE.

Thèmes abordés :

- Evolution chimique de la couche sensible sous l'effet de la température, de la lumière, en présence ou non d'oxygène.
 - Evolution du substrat en polycarbonate, avec les mêmes sollicitations : réactions chimiques, propriétés optiques, propriété de surface (micro dureté, morphologie du sillon).
 - Diffusion des molécules d'eau à travers le polycarbonate et tangentiellement par le bord externe du disque.
 - Etude chimique de la couche de protection (vernis) du dos des CD-R.
- Une synthèse sur le vieillissement des DVD±R est en préparation au LNE. Elle prendra en compte des essais réalisés depuis 2004.

Merci de votre attention