



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

ETUDE DU VIEILLISSEMENT EN CONDITIONS CLIMATIQUES SEVERES DE 2 REFERENCES DE CD-R

**Recherche sur la conservation des Archives numériques
dans le cadre du GIS DON**

Auteur : Jean-Michel LAMBERT

Fiche R&D N° 202/2005

Avril 2007

SOMMAIRE

1. PRESENTATION DE L'ETUDE	3
1.1. CONTEXTE.....	3
1.2. CHOIX DES REFERENCES DE CD-R ETUDIEES	4
2. ESSAIS REALISES	6
2.1. CYCLES DE VIEILLISSEMENT	6
2.2. ANALYSES	6
2.2.1. <i>Analyse à la vitesse de lecture 24x</i>	6
2.2.2. <i>Analyse à la vitesse de lecture 1x</i>	7
2.2.3. <i>Visualisation du signal HF</i>	7
2.2.4. <i>Traitement du signal HF</i>	8
2.2.5. <i>Evaluation des erreurs à partir de l'histogramme des transitions</i>	11
3. RESULTATS.....	14
3.1. EVOLUTION DU TAUX D'ERREURS (BLER)	14
3.2. EVOLUTION DES PARAMETRES D'AMPLITUDE DU SIGNAL HF	15
3.3. EVOLUTION DU PARAMETRE DE SYMETRIE DU SIGNAL HF	16
3.4. ANALYSE DES POSITIONS DES TRANSITIONS (PASSAGE AU SEUIL) DU SIGNAL HF	17
3.4.1. <i>Déviations</i>	17
3.4.2. <i>Analyse de l'histogramme</i>	17
4. SYNTHESE DES RESULTATS	19
4.1 VARIABILITE DU VIEILLISSEMENT DES DISQUES D'UNE MEME REFERENCE	19
4.2 NATURE DU VIEILLISSEMENT DES REFERENCES 1 ET 2-A	19
4.3 AMPLIFICATION DE LA DETERIORATION DES DISQUES SUR LE BORD EXTERNE	21
5. CONCLUSIONS.....	22
 ANNEXE 1 – CYCLES DE VIEILLISSEMENT REALISES POUR CHAQUE DISQUE	 23
ANNEXE 2 – EVOLUTION DU TAUX D'ERREUR (BLER).....	26
ANNEXE 3 – REPRESENTATIONS DE SURFACE DU TAUX D'ERREUR (BLER)	33
ANNEXE 4 – NIVEAUX DE REFLEXIVITE DES LANDS 11T (A_{MAX}) ET DES PITS 11T (A_{MIN})	40
ANNEXE 5 – PARAMETRE SYM.....	41
ANNEXE 6 – DEVIATIONS DES POSITIONS ET DES LONGUEURS DES PLAGES GRAVEES ET NON-GRAVEES	42
ANNEXE 7 – HISTOGRAMMES DES POSITIONS DES TRANSITIONS	45

1. PRESENTATION DE L'ETUDE

1.1. CONTEXTE

Le vieillissement des CD-R est une dégradation dans le temps qui produit une augmentation significative du taux d'erreurs, pouvant conduire à la perte des données numériques gravées. Un tel vieillissement a été observé après conservation à température ambiante et à l'abri de la lumière sur environ 10% des disques d'une collection de 69 disques conservée au LNE (cf. rapport de 2004 de la fiche R&D 021 / 2000).

Plus récemment, des vieillissements très significatifs ont été observés sur des CD-R ayant subi, pendant des durées de l'ordre d'un mois, des conditions climatiques sévères (température jusqu'à 80°C, hygrométrie de 85%). Un tel vieillissement a été observé sur au moins une référence lors de l'essai comparatif réalisé pour l'INC en 2004 et sur deux références lors d'un essai réalisé en 2006 pour la Direction des Archives de France.

L'objectif qui est proposé dans le programme de recherche du GIS DON, est de modéliser le vieillissement des CD-R afin d'être à même de prévoir la date à laquelle le risque de perte définitif de données surviendra. Une telle modélisation existe dans la norme ISO 18927 : 2002 (Méthode pour estimer la durée de vie des CD-R basée sur les effets de la température et de l'humidité). Elle s'appuie sur la loi d'Eyring qui est une variante de la loi d'Arrhenius concernant la cinétique des réactions chimiques.

Cette loi peut s'appliquer à l'évolution chimique de la couche de polymère photo-sensible (dye), mais les observations montrent que la dégradation des CD-R n'est en général pas homogène sur tout le disque (vieillissement très souvent amplifié près du bord externe) et qu'elle peut aussi être corrélée à l'état de la couche de vernis protecteur sur la surface extérieure du disque (apparition des motifs de l'étiquette). En d'autres termes, le vieillissement des CD-R est un phénomène complexe qui ne se réduit sans doute pas à une réaction chimique dont la cinétique ne dépendrait que de la température et de l'hygrométrie.

L'objectif de cette étude est d'essayer **de mieux décrire et de mieux comprendre le mécanisme du vieillissement observé sur 2 références de CD-R**. En particulier on a souvent constaté assez peu de corrélation entre l'évolution des paramètres du signal optique mesurés par l'analyseur de CD-R, et les taux d'erreurs relevés par ce même analyseur, alors même que le signal numérique est directement décodé à partir du signal optique. Cela indique que les paramètres mesurés par l'analyseur ne sont pas forcément pertinents. On s'attend à ce qu'une observation plus détaillée du signal optique (moins statistique) permette de déceler l'origine des erreurs numériques et d'en déduire éventuellement le (ou les) mécanisme(s) du vieillissement.

Les références de CD-R étudiées sont des références qui présentent un vieillissement indiscutable, tout au moins en conditions climatiques sévères. On verra que le mécanisme du vieillissement n'est par contre pas le même pour chacune d'elles.

1.2. CHOIX DES REFERENCES DE CD-R ETUDIEES

L'étude réalisée en 2006 pour la Direction des Archives de France a fait apparaître un vieillissement très significatif des deux références de disque suivantes :

Référence N° 1 : VERBATIM CD-R Super Azo 52x

Référence N° 2 : TDK CD-R80 (up to 52x speed)

Le vieillissement a été constaté après 10 à 20 jours d'exposition à la température de 80 °C avec un taux d'hygrométrie de 85%. Une exposition à 30 jours entraîne généralement la perte complète des données au moins dans le cas de la référence N°1. Par contre, un essai préalable à 60°C pendant 24 jours n'avait pas montré un vieillissement vraiment franc de ces deux références (cf. rapport d'étude pour la Direction des Archives de France).

Ces deux références ont été retenues dans la présente étude, car leur dégradation ne se produit pas ponctuellement, mais sur de larges zones de la surface des disques, même si toutes les zones d'un disque ne sont pas dégradées avec la même intensité. Lorsque le vieillissement apparaît sous forme de défauts ponctuels, visibles dans la représentation de surface du taux d'erreurs, il est toujours difficile de faire la part entre l'effet de l'exposition aux conditions climatiques sévères et les conséquences de la manipulation des disques. De plus, les défauts ponctuels ne couvrent qu'une infime partie du disque et leur étude nécessiterait de procéder à des mesures sur un grand nombre de disques (faible répétabilité).

Les essais ont été réalisés sur des disques approvisionnés en mars 2006 dans le cadre de l'étude réalisée pour la Direction des Archives de France, ainsi que sur des disques d'un nouvel approvisionnement effectué en décembre 2006.

Pour la référence N°2, il est apparu, au vu des résultats de mesure, que le nouvel approvisionnement, bien qu'effectué chez le même fournisseur et ayant une présentation identique, ne correspondait pas à des disques de même origine. Cela est confirmé par le code du fabricant inscrit sur le sillon (code ATIP). Les disques de l'approvisionnement initial ont le code 1505 (fabricant TDK), alors que les disques du second approvisionnement ont le code 1706 (fabricant Moser Baer India Ltd).

Finalement l'étude a porté sur les références de disque suivantes :

- 1- : VERBATIM CD-R Super Azo 52x Fabricant Mitsubishi Chemicals Corp. (code ATIP 3423)
- 2-A : TDK CD-R80 (up to 52x speed) Fabricant TDK Corp. (code ATIP 1505)
- 2-B : TDK CD-R80 (up to 52x speed) Fabricant Moser Baer India Ltd (code ATIP 1706)

Les photographies des pages suivantes donnent un aperçu des étiquettes des boîtes, ainsi que l'aspect des disques vus du côté non enregistrable. Les références N° 2-A et 2-B sont identiques pour l'aspect et le conditionnement des disques.

Référence de disque N° 1



Références de disque N° 2-A et N° 2-B

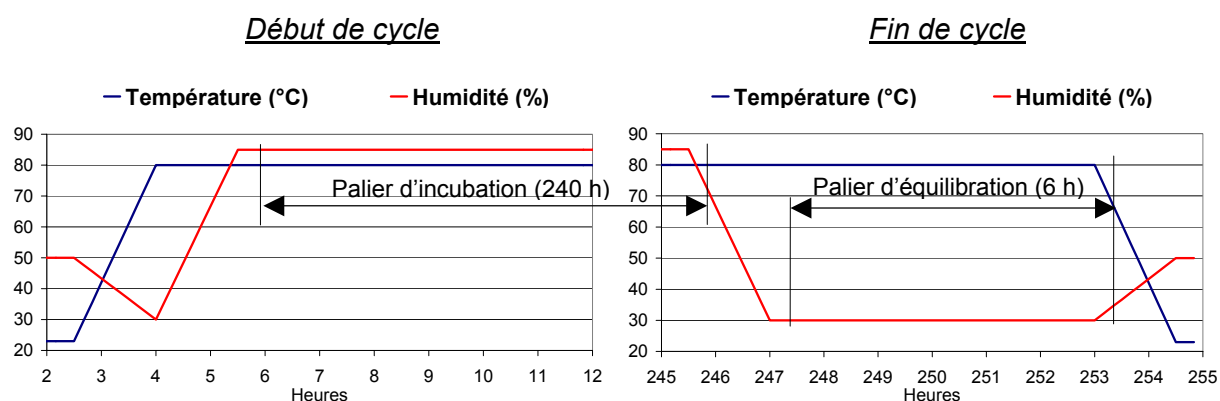


2. ESSAIS REALISES

2.1. CYCLES DE VIEILLISSEMENT

Les disques sont placés dans une enceinte climatique programmable en température et hygrométrie. On a réalisé des cycles de vieillissement à la température de 80 °C avec un taux d'hygrométrie de 85%. La montée et la descente en température et en hygrométrie doivent être progressives.

Afin d'éviter la formation de bulles d'eau dans le polycarbonate, il est nécessaire de « purger » le polycarbonate de l'eau qu'il a absorbée à température élevée. Pour cela, le taux d'humidité est d'abord diminué jusqu'à 30% tout en maintenant la température à son niveau élevé. Un palier dit « d'équilibration », d'une durée de 6 heures, est ensuite effectué, en maintenant toujours la température élevée, selon les prescriptions de la norme ISO 18927 : 2002. Les graphiques ci-dessous montrent l'évolution de la température et du degré hygrométrique au début et à la fin d'un cycle de 10 jours à 80°C et 85% d'humidité.



Ont été réalisés trois cycles d'une durée respective de 5 jours (palier de 120 heures), 10 jours (palier de 240 heures) et 5 jours (palier de 120 heures). Tous les disques n'ont pas subi les 3 cycles. Certains disques ont été gravés après avoir subi un ou plusieurs cycles. En tout, 27 disques ont été testés pour la référence N°1, 15 disques pour la référence N° 2-A et 15 disques pour la référence N° 2-B.

La description détaillée des essais de vieillissement est donnée en annexe 1, l'instant de gravure de chaque disque étant représenté par une flèche verticale.

Tous les disques ont été gravés par le logiciel Nero avec le même graveur (HP Dvd 840), la vitesse de gravure étant de 40x. La qualité de gravure initiale est toujours correcte (taux de BLER inférieur à 5).

2.2. ANALYSES

2.2.1. Analyse à la vitesse de lecture 24x

Il s'agit d'une analyse rapide effectuée sur tous les disques après gravure et après chaque cycle de vieillissement. L'analyseur DATARIUS (modèle CD-R 40XE - version logicielle 1.5), donne les taux d'erreurs numériques (BLER, E22, E32, etc..) moyens par seconde. Pour le taux de BLER, on dispose également d'une représentation de surface qui permet le repérage des défauts localisés.

2.2.2. Analyse à la vitesse de lecture 1x

Cette analyse est effectuée à l'aide d'un analyseur de référence fabriqué par la société Audio Development (modèle CATS SA300 - version logicielle 3.0).

Outre les taux d'erreurs numériques cet analyseur fournit des informations sur le signal HF issu de la tête de lecture et sur les signaux d'asservissement de la tête de lecture. Les paramètres mesurés sont ceux définis dans le cadre du « Red Book » et de « l'Orange Book », documents rédigés par les fabricants à l'origine de la conception des CD et CD-R.

Dans la présente étude, on s'intéressera principalement aux paramètres caractéristiques du signal HF :

- REF : Réflectivité des parties non gravées du sillon (lands T11),
- I11R : Amplitude relative de la modulation maximale du signal (lands et pits T11),
- I3R : Amplitude relative de la modulation minimale du signal (lands et pits T3),
- SYM : Symétrie caractérisant l'écart entre les positions médianes des modulations T3 et T11,
- Déviations et Jitters : Moyenne et écart-type de la distribution des longueurs des pits et des lands.

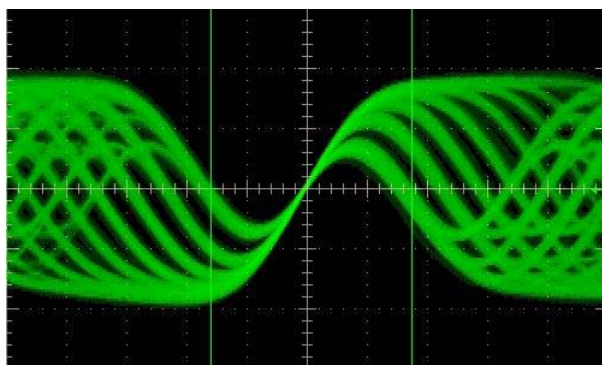
On dispose également des représentations de surface du taux de BLER et des paramètres REF, I11R, I3R, SYM.

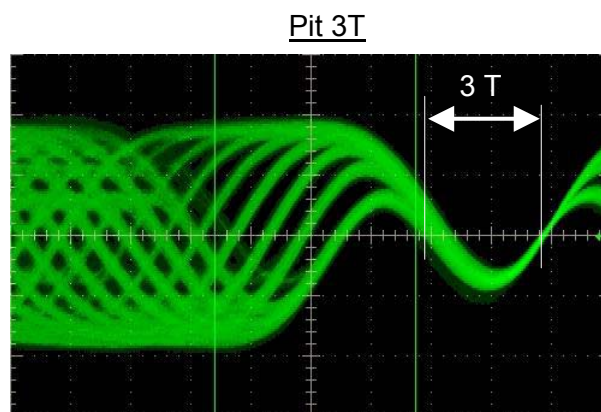
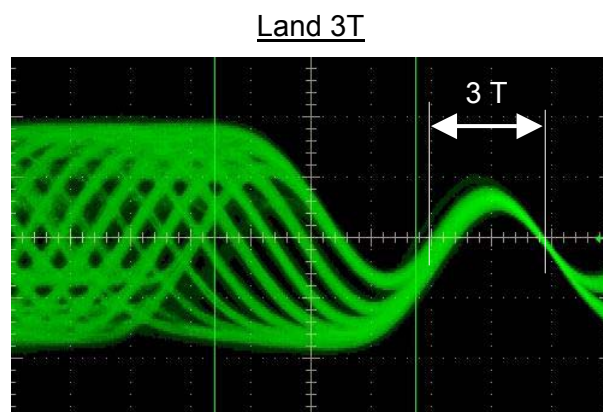
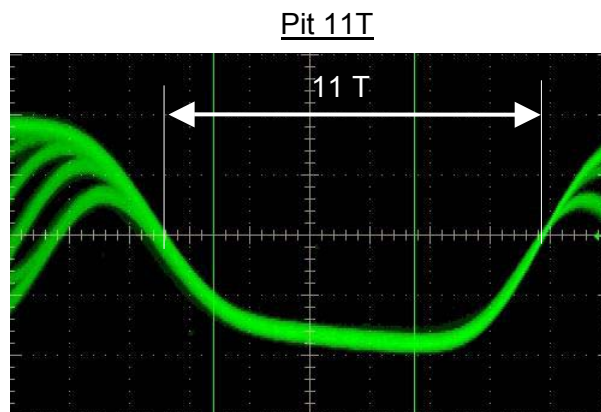
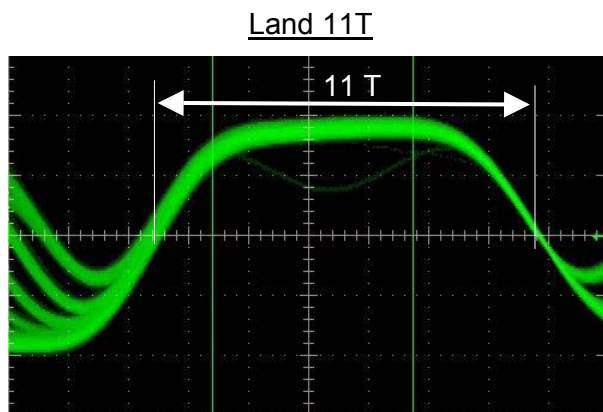
En raison de la durée d'analyse d'un disque (environ 75 minutes), les analyses à la vitesse 1x n'ont pas été effectuées sur la totalité des disques et pas systématiquement après chaque cycle de vieillissement.

2.2.3. Visualisation du signal HF

Le signal HF, en lecture à la vitesse 1x, peut être visualisé sur oscilloscope. La visualisation, avec déclenchement du trigger sur le niveau DC du signal donne la représentation traditionnelle dite de « l'œil ». En utilisant un mode plus avancé de trigger, il est possible de visualiser une zone particulière (land ou pit 3T, 4T, etc..). Les représentations données ci-après de l'écran de l'oscilloscope en donnent une idée.

Diagramme de « l'œil »

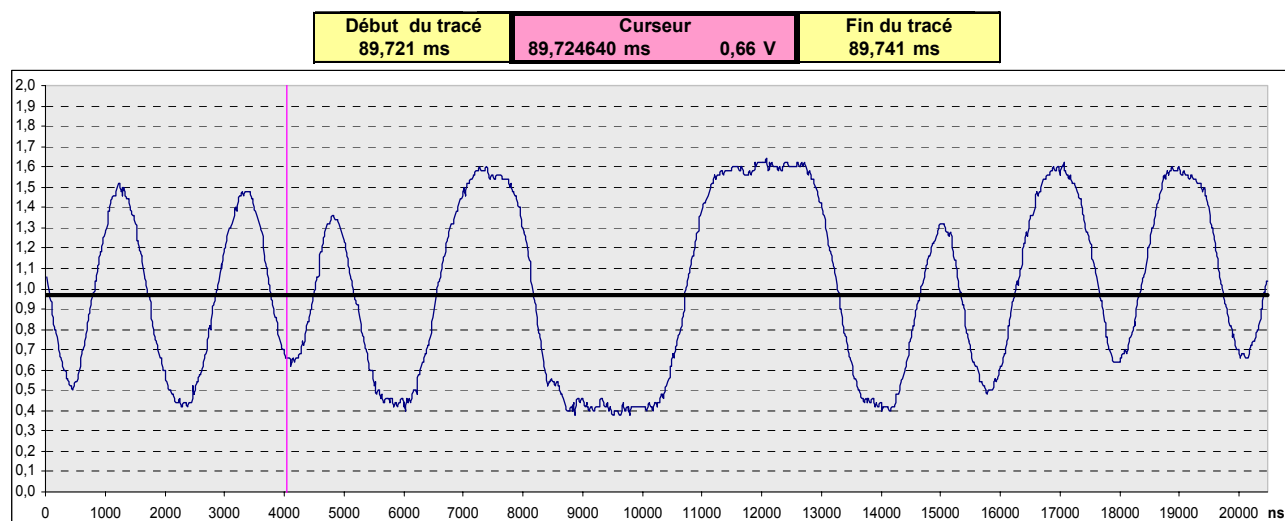




2.2.4. Traitement du signal HF

L'étude détaillée du signal HF est réalisée en transférant dans un tableau Excel une portion du signal échantillonné à l'aide d'un oscilloscope. L'oscilloscope utilisé (Tektronix type TDS5054B) permet de transférer 8 millions d'échantillons, ce qui correspond à 160 ms du signal HF échantillonné à la cadence de 20 ns. Deux macros ont été réalisées sous Excel :

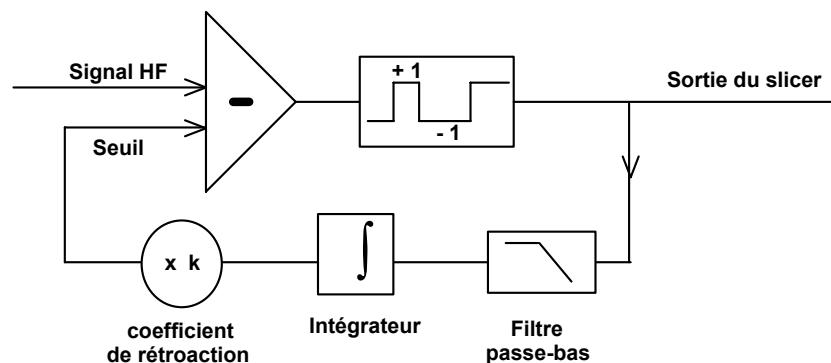
- La macro « **Chargt_signal** » effectue le transfert du fichier créé par l'oscilloscope (fichier texte) dans un tableau Excel. Le fichier Excel comporte un graphe permettant de visualiser le signal sur une portion quelconque de longueur 20 μ s (1000 échantillons). Un exemple de graphe est donné ci-dessous.



- La macro « Paramètres_HF » effectue un ensemble de calculs sur la portion de signal échantillonnée.

Les calculs réalisés par cette macro ont pour principal objectif de relier les caractéristiques du signal HF avec les taux d'erreurs mesurés par les analyseurs. Pour cela, il est nécessaire de reconstituer une horloge asservie au signal HF, comme cela est fait par les lecteurs.

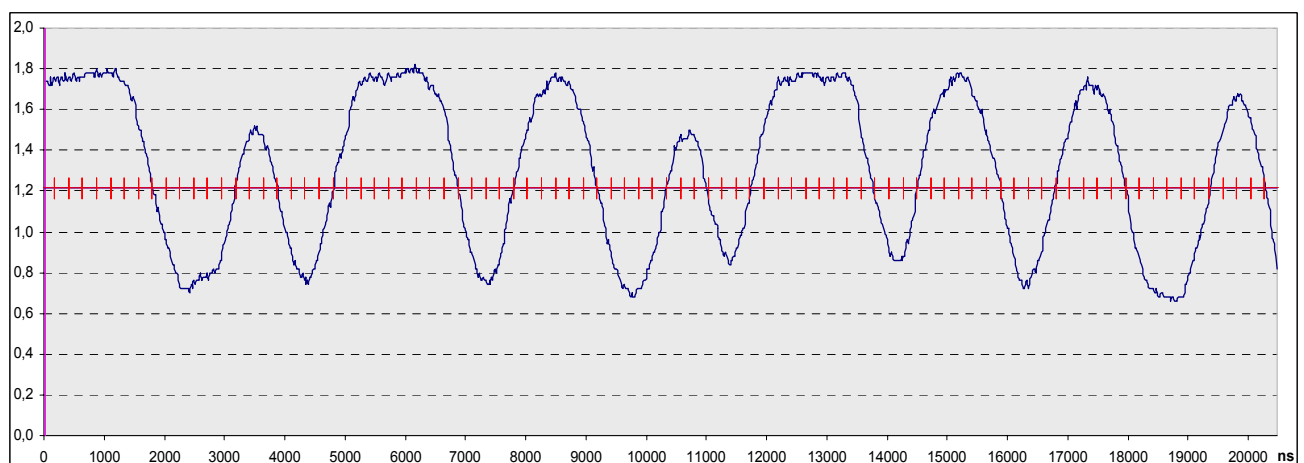
La reconstitution de l'horloge passe d'abord par la détermination du seuil de décision. Dans les lecteurs, ceci est réalisé par un « slicer ». Le signal de sortie du slicer est ± 1 , selon que le signal HF est supérieur ou inférieur au seuil. La valeur du seuil est asservie pour minimiser la composante continue du signal de sortie selon le schéma ci-dessous. Ainsi le signal de sortie du slicer comporte des durées positive et négative égales.



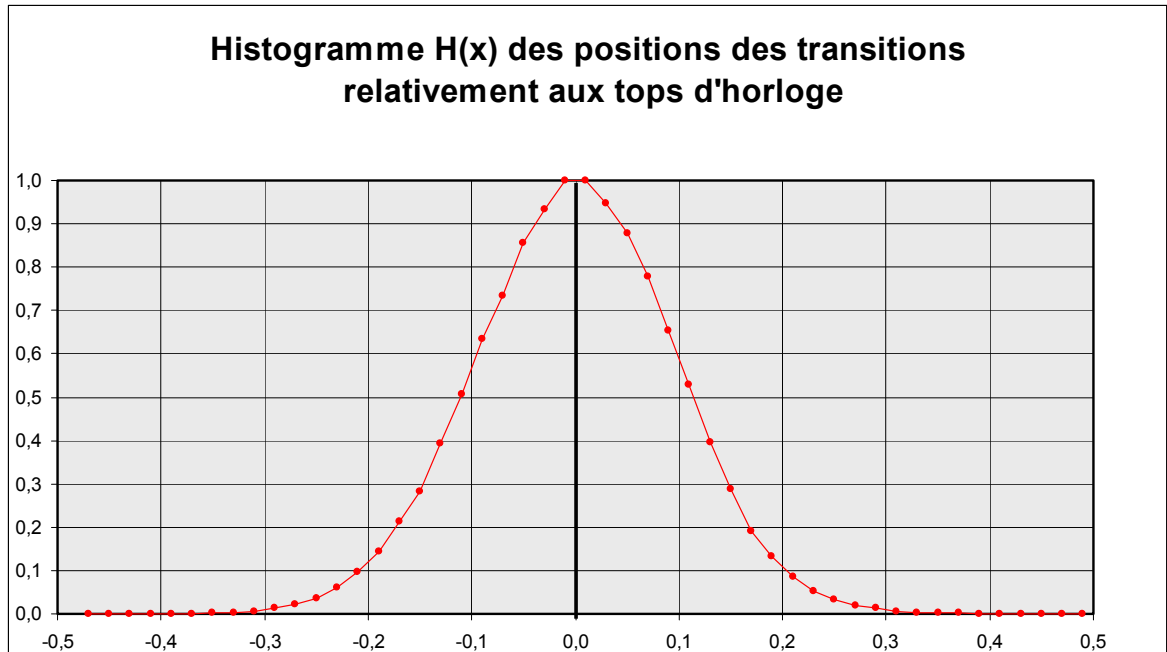
Le slicer est caractérisé par la fréquence du filtre passe-bas et la valeur du coefficient de rétroaction k .

Le second élément des lecteurs, nécessaire à la reconstitution d'horloge, est un système de boucle à verrouillage de phase (PLL), qui synchronise l'horloge avec le signal HF, de manière à minimiser leur déphasage relatif. Dans la macro, on réalise une simulation approchée d'un tel système : on calcule l'écart moyen entre les tops d'horloge et les positions de passage du signal HF à la valeur du seuil. La position des tops d'horloge est corrigée de cet écart multiplié par un coefficient de rétroaction. Comme pour le slicer, l'asservissement dépend de deux paramètres : la constante de temps sur laquelle l'écart est moyenné et le coefficient de rétroaction.

Le graphique ci-dessous montre une portion de signal avec le seuil de décision et la position des tops de l'horloge reconstituée



La reconstitution d'horloge permet d'obtenir une information primordiale qui est la **distribution des positions des transitions** (passage à la valeur du seuil) vis à vis des tops d'horloge. Cette distribution a en général une allure globalement gaussienne comme le montre l'exemple ci-dessous. L'axe des abscisses est un écart de temps exprimé par rapport à la base de temps de l'horloge ($dT \approx 231,4 \text{ ns}$). Un écart supérieur à $+ 0,5 dT$ ou inférieur à $- 0,5 dT$ conduit à une erreur lors du décodage numérique de l'information.

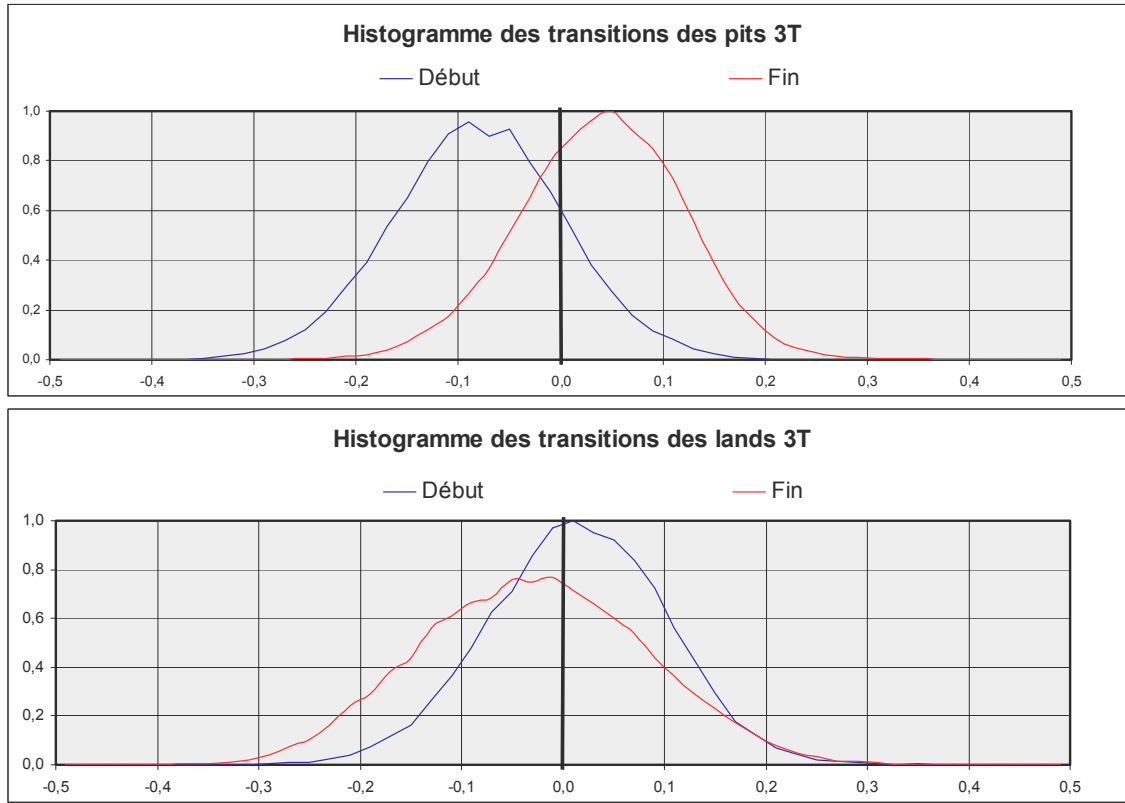


L'écart-type de cette distribution est le « **Jitter to clock** ». Ce paramètre n'est pas donné par l'analyseur CATS.

L'histogramme obtenu sur 160 ms de signal porte sur environ 145 000 transitions. Il est possible de distinguer les transitions de début ou de fin des différentes plages (lands et pits 3T, 4T, 11T). On peut ainsi obtenir un histogramme pour chaque type de plage, l'histogramme global en étant le cumul pondéré par les proportions de chaque type de plage. Les plages courtes (3T, 4T) sont les plus nombreuses et contribuent davantage que les plages longues (10T, 11T).

On présente, page suivante, un exemple des histogrammes pour des plages 3T. Sur cet exemple, on constate que les transitions de début d'un pit 3T sont en avance d'environ $0,1 dT$ et les transitions de fin en retard d'environ $0,05 dT$. Ceci correspond à des pits 3T trop longs. Sur ce même exemple, on constate que les lands 3T sont d'une longueur en moyenne correcte. Leur histogramme est plus élargi que celui des pits. Ceci est assez général, car ce sont les pits (parties sombres) qui sont gravés et les lands ne sont que les parties restantes. La position des transitions limitant les lands est une combinaison des positions des différents types de pits.

L'analyse des histogrammes permet de reconnaître les défauts de la gravure. Idéalement, la position moyenne du début et de la fin des pits et des lands devrait être centrée sur zéro.



2.2.5. Evaluation des erreurs à partir de l'histogramme des transitions

Une erreur, au niveau du premier correcteur d'erreur, est due à un décalage d'une transition hors de l'intervalle $[-0,5 \text{ dT} ; + 0,5 \text{ dT}]$

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

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

Si N_{Tr} est le nombre moyen de transitions par bloc (de l'ordre de 124), le taux de blocs erronés τ_{blocs} est lié au taux de transitions erronées $\tau_{transitions}$ par la relation :

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

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

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

Pour des taux d'erreurs faibles on peut écrire :

$$BLER = 7350 N_{Tr} \tau_{Transitions} \approx 0,9 \cdot 10^6 \tau_{Transitions}$$

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

Cas d'une distribution gaussienne

La distribution des positions des transitions est de la forme :

$$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad \text{où } \sigma \text{ est l'écart-type de la distribution (« jitter to clock »)}$$

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

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

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

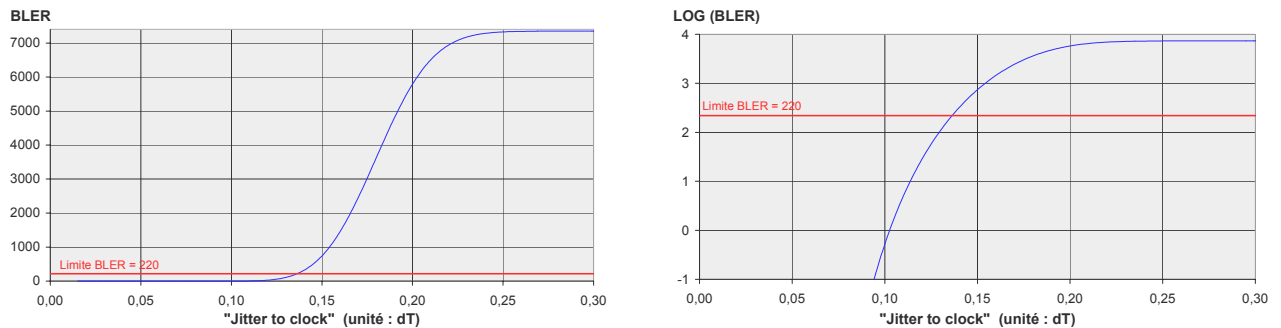
On en déduit :

$$BLER = 7350 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0,5}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]$$

Pour des taux d'erreurs faibles : $BLER \approx 0,9 \cdot 10^6 \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0,5}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right]$

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

Les graphes suivants présentent la relation entre le BLER et le « jitter to clock », dans le cas d'un histogramme gaussien.



Le BLER atteint la limite normalisée de 220 pour un « jitter to clock » égal à 0,14 dT. Au-delà de 0,15 dT, les taux d'erreurs montent rapidement et ne sont plus acceptables.

Histogrammes mesurés

Les histogrammes mesurés sont « normalisés » en les divisant par leur valeur maximale (pour $x \approx 0$). On obtient un histogramme noté $\tilde{H}(x)$.

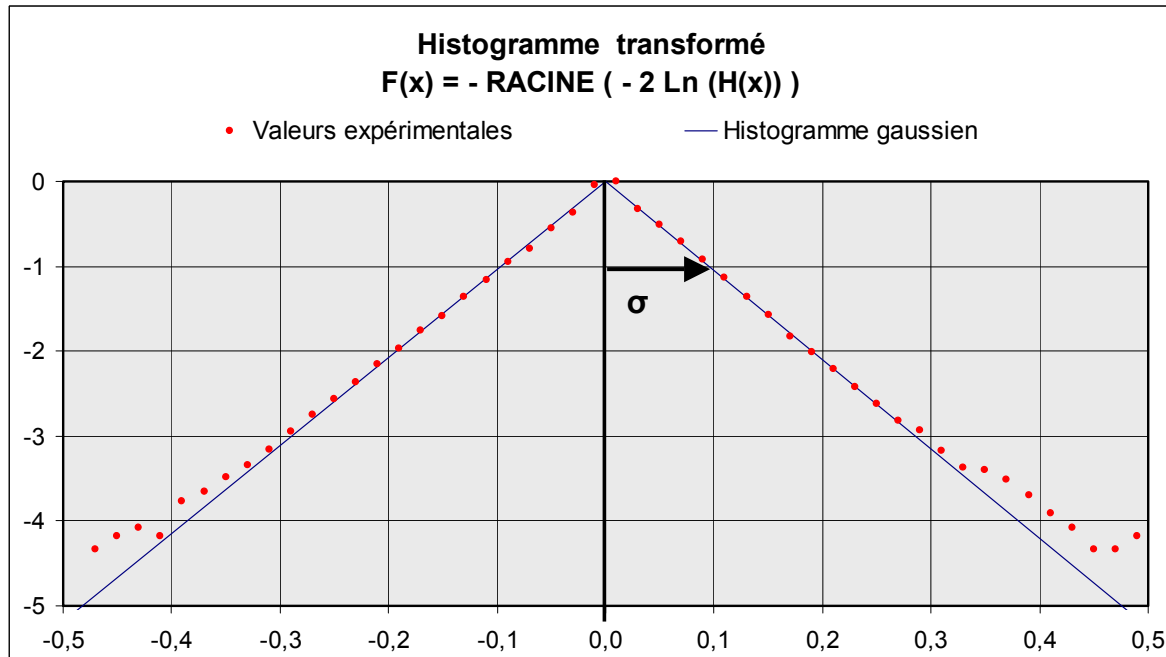
Afin d'apprécier le caractère gaussien des histogrammes mesurés, on réalise la transformation suivante de l'histogramme $\tilde{H}(x)$:

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

Si l'histogramme correspond à une distribution gaussienne la fonction $F(x)$ est linéaire pour x positif d'une part et x négatif d'autre part :

$$F(x) = -\frac{|x|}{\sigma}$$

La figure ci-dessous montre le résultat de la transformation de l'histogramme de la page 8.



L'évaluation du taux d'erreurs des transitions, à partir de l'histogramme des positions des transitions, nécessite l'évaluation de l'histogramme en dehors de l'intervalle $[-0,5 \text{ dT} ; + 0,5 \text{ dT}]$. Il faut donc prolonger l'histogramme mesuré, dans un domaine de valeurs très faibles.

Dans le cas de l'exemple ci-dessus, les points expérimentaux s'alignent bien sur un histogramme gaussien d'écart-type $\sigma \approx 0,095 \text{ dT}$, tout au moins pour des valeurs de x comprises entre $-0,3$ et $+ 0,3$. En dehors de cet intervalle, les valeurs expérimentales excèdent celles de la distribution gaussienne. Une extrapolation de l'histogramme, au-delà de l'intervalle $[-0,5 \text{ dT} ; + 0,5 \text{ dT}]$, par la distribution gaussienne conduit à une estimation du taux de BLER égale à 0,2 sur cet exemple, alors que la valeur mesurée par l'analyseur CATS est de l'ordre de 4.

Sur cet exemple, on constate que l'évaluation du taux de BLER ne peut pas se faire en tenant compte uniquement de la partie principale de l'histogramme (de $-0,3\text{dT}$ à $+0,3\text{dT}$) qui contient pourtant plus de 99% des échantillons. L'extrapolation doit être faite sur les « ailes » de la distribution.

Si on fait une extrapolation par une régression linéaire de la fonction $F(x)$ sur les intervalles $[-0,5 \text{ dT} ; - 0,3 \text{ dT}]$ et $[+0,3 \text{ dT} ; +0,5 \text{ dT}]$, l'estimation correspondante des taux de BLER passe respectivement à 2,5 et 4,2 soit au total 6,7. Cette valeur est un peu plus élevée, mais du même ordre de grandeur, que la valeur mesurée par l'analyseur CATS.

3. RESULTATS

3.1. EVOLUTION DU TAUX D'ERREURS (BLER)

Les résultats sont présentés en annexe 2 sous la forme de courbes donnant Log(Bler) en fonction de la distance au centre du disque, et en annexe 3 sous la forme des représentations de surface du taux de Bler. Les disques représentés sont caractéristiques de l'ensemble des disques soumis aux essais.

Pour les représentations de surface obtenues à la vitesse de lecture 24x (analyseur Datarius), les taux d'erreurs sont représentés avec 4 couleurs : blanc, vert, jaune, rouge. Les zones entièrement rouges correspondent à un taux de Bler supérieur à 1400, les zones jaunes à un taux de Bler supérieur à 1000, les zones vertes à un taux de Bler supérieur à 600. Les zones ayant un taux de Bler correct (inférieur à la limite de 220) sont des zones mélangées vert et blanc avec moins de 50% de vert.

Pour les représentations de surface obtenues à la vitesse de lecture 1x (analyseur CATS), les taux d'erreurs sont représentés également avec des couleurs allant du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune. Le noir représente les taux de Bler les plus élevés.

Référence N°1

L'effet du vieillissement sur le taux de BLER est similaire pour l'ensemble des disques de la référence N°1.

On note les points suivants :

- Pour les disques n'ayant pas subi de conditions climatiques sévères avant gravure, la détérioration devient importante à partir de 10 jours d'exposition. A 15 jours, les disques peuvent n'être que partiellement lisibles et à 20 jours ils sont en général illisibles. L'évolution du logarithme du taux de Bler est à peu près proportionnelle à la durée d'exposition, tout au moins dans la zone centrale du disque.
- Pour les disques ayant subi une exposition avant gravure, la détérioration est du même ordre si l'on prend en compte la totalité de la durée d'exposition (avant et après gravure).
- Le vieillissement n'est pas homogène sur le disque : les dégradations majeures apparaissent d'abord sur le bord externe du disque, puis se propagent vers le centre. En analyse à la vitesse de lecture 1x, il y a un très fort contraste entre un anneau extérieur dans lequel le taux de BLER est de l'ordre de 4000 et la partie intérieure où il reste compris entre 150 et 300. Ce contraste est moins prononcé en analyse 24x, la partie intérieure ayant des taux de BLER plus élevés qu'en analyse 1x (de l'ordre de 1000).

Référence N°2-A

L'effet du vieillissement sur le taux de BLER est similaire pour l'ensemble des disques de la référence N°2-A.

On note les points suivants :

- Pour les disques n'ayant pas subi de conditions climatiques sévères avant gravure, la détérioration devient importante à partir de 15 jours d'exposition. A 20 jours, les disques restent encore lisibles dans leur totalité.
- Pour les disques ayant subi une exposition avant gravure, la détérioration est du même ordre si l'on prend en compte la totalité de la durée d'exposition (avant et après gravure).

- Comme pour la référence N° 1, le vieillissement n'est pas homogène sur le disque : les dégradations majeures apparaissent sur le bord externe du disque. On note également des dégradations sur le bord interne, mais pas sur toute la circonférence du disque (taches).
- Les représentations de surface font apparaître l'étiquette des disques. Les inscriptions (texte, sigle TDK) apparaissent comme des zones avec très peu d'erreurs, même après une exposition de 20 jours et à proximité du bord externe. Ces inscriptions sont faites en « négatif », c'est à dire qu'elles correspondent aux zones non traitées lors de la réalisation de l'étiquette sur le dos du disque. Il semble donc que la détérioration du disque soit due ou tout au moins fortement aggravée par le processus de réalisation de l'étiquette.

Référence N°2-B

15 disques de cette référence ont été utilisés provenant de 3 paquets de cinq disques achetés ensemble chez le même distributeur. Les disques ne se comportent pas de la même manière selon le paquet et semblent provenir de lots de fabrication différents notés 2-B(a), 2-B(b) et 2-B(c).

On note les points suivants :

- Les disques du lot b présentent une « signature » en représentation de surface des erreurs (24x) que l'on ne retrouve pas sur les disques des lots a et c.
- Pour les disques des lots a et b, on relève très peu d'évolution du taux d'erreur après 15 jours d'exposition.
- Une dégradation sensible apparaît sur les disques du lot c dès 10 jours d'exposition. Elle concerne la partie centrale du disque, à l'exclusion du bord interne et du bord externe. Après 15 jours d'exposition, le taux de Bler mesuré dans cette partie centrale atteint 800 en lecture 24x et 400 en lecture 1x.
- Les disques du lot c ayant subi une exposition avant gravure présentent un taux d'erreur anormalement élevé, mais à un degré moindre que les disques ayant subi la même exposition après gravure.
- Le vieillissement des disques du lot c ne fait pas apparaître de relation importante avec l'étiquette, comme c'est le cas pour les disques de la référence 2-A. De plus, lorsque l'étiquette est visible (disque N° 23 après une exposition de 15 jours), les zones de texte ne sont pas protégées, mais au contraire ont les plus forts taux d'erreur. Ainsi, la représentation de surface des taux d'erreur des disques du lot c est inversée par rapport à celle des disques de la référence 2-A, que ce soit pour l'effet de bord ou pour l'effet de l'étiquette.

3.2. EVOLUTION DES PARAMETRES D'AMPLITUDE DU SIGNAL HF

Le signal HF peut être caractérisé en amplitude, par les niveaux correspondant à chaque type de plage non gravée (Land 3T à 11T) ou gravées (Pits 3T à 11T). Les plages 11T sont les plus intéressantes car leur longueur (3 μm) est supérieure au diamètre du faisceau laser de lecture. Il n'en est pas de même des plages 3T dont la longueur (0,9 μm) est inférieure au diamètre du faisceau. Ainsi, les niveaux des plages 11T sont caractéristiques de la réflexion des zones gravées et non gravées. Il y a toutefois une légère incidence des 2 sillons voisins sur ces niveaux, car le faisceau laser déborde légèrement sur ces sillons (écart inter sillons : 1,6 μm).

L'évolution du niveau du signal HF sur les pits 11T ($A_{\min}$) et sur les lands 11T ($A_{\max}$) est significatif de l'évolution de la réflectivité des zones gravées et non gravées.

Les graphes de l'annexe 4 montrent les niveaux $A_{\max}$ et $A_{\min}$ en fonction de la position sur le disque. Ces niveaux sont portés en pourcentage d'une valeur de référence correspondant à une surface très réfléchissante. Chaque courbe est une moyenne de plusieurs disques.

Référence N°1

- La réflectivité chute du centre vers la partie externe du disque, aussi bien pour les parties gravées que pour les parties non gravées, la chute en valeur relative est plus importante pour les zones gravées ($A_{\min}$).
- Au cours du vieillissement, les zones gravées s'éclaircissent progressivement : $A_{\min}$ augmente de près de 50% sur le bord externe du disque après un vieillissement de 15 jours.
- Au cours du vieillissement la réflectivité des zones non gravées commence par augmenter puis chute, à partir de 5 à 10 jours de vieillissement.
- Le contraste des zones gravées et non gravées (I11R) baisse au cours du vieillissement sur tout le disque, mais du fait qu'il est nettement plus élevé vers le bord externe au départ, le contraste après vieillissement de 15 jours près du bord externe est comparable à celui près du centre avant vieillissement.

Références N°2-A et 2-B

Il n'y a pas de différence flagrante entre les comportements des références de disque 2-A et 2-B, pour ce qui concerne la réflectivité des zones gravées et non gravées.

- Les niveaux de réflectivité sont sensiblement les mêmes sur l'ensemble du disque.
- L'évolution au cours du vieillissement reste très faible et se limite à un léger éclaircissement des zones gravées (inférieur à 10%).

3.3. EVOLUTION DU PARAMETRE DE SYMETRIE DU SIGNAL HF

Ce paramètre caractérise la valeur moyenne des signaux de type 3T (lands et pits alternés) par rapport à la valeur moyenne des signaux de type 11T. Lorsque le paramètre SYM a une valeur positive, la valeur moyenne du signal 3T est supérieure à celle du signal 11T.

Les graphes de l'annexe 5 présentent les valeurs du paramètre SYM, en fonction de la distance au centre du disque. Chaque courbe est une moyenne obtenue avec plusieurs disques.

Référence N°1

- Le paramètre SYM a des valeurs plus faibles sur la partie extérieure du disque. Sur cette partie elles sont dans une fourchette anormalement basse (-10 à -15%), même avant vieillissement.
- Le paramètre SYM baisse d'environ 5% après vieillissement, la chute se produisant dès 5 jours de vieillissement.

Référence N°2-A

- Le paramètre SYM a des valeurs plus élevées sur la partie extérieure du disque. Sur cette partie, elles sont comprises entre +5 et +10%, ce qui est un peu trop élevé.
- Le paramètre SYM est très peu modifié par le vieillissement.

Référence N°2-B

- Le paramètre SYM a des valeurs correctes sur tout le disque voisines de -5%.
- Le paramètre SYM est très peu modifié par le vieillissement.

3.4. ANALYSE DES POSITIONS DES TRANSITIONS (PASSAGE AU SEUIL) DU SIGNAL HF

L'analyseur CATS ne donne pas de paramètres liés directement à la position des transitions par rapport aux tops de l'horloge reconstituée à partir du signal lui-même. Les analyses sont réalisées à partir de l'échantillonnage (résolution 20 ns) de portions du signal HF de durée 160 ms (8 000 000 points), comme décrit au paragraphe 2.2.5.

3.4.1. Déviations

Les histogrammes des positions des transitions par rapport aux tops d'horloge (cf. page 11) permettent d'estimer, pour chaque type de transition, la valeur moyenne des positions (déviations). Les graphes de l'annexe 6 présentent les valeurs des déviations des transitions de début et de fin de chaque type de plage. On donne également les déviations des longueurs des différentes plages qui sont, elles, indépendantes de la reconstitution d'horloge.

Référence N°1

- Les longueurs des différentes plages présentent très peu d'évolution après vieillissement, si ce n'est une légère diminution des longueurs des pits 3T et 4T.
- L'évolution des déviations par rapport à l'horloge est plus importante que celle des longueurs. En particulier, la position des pits 8T, 9T, 10T, 11T se décale d'environ 20ns (retard).

Référence N°2-A et 2-B

- On constate peu d'évolution après vieillissement des disques. L'écart avant après vieillissement est moins important que l'écart entre le début et la fin du disque.

3.4.2. Analyse de l'histogramme

Pour chaque référence de disque, on présente en annexe 7 l'histogramme des positions des transitions avec une échelle normale et avec une échelle modifiée permettant la comparaison avec un histogramme gaussien. Cette dernière permet aussi de mieux visualiser les valeurs évanescences des ailes de l'histogramme (cf. § 2.2.4.).

Référence N°1

- La forme des histogrammes est assez proche d'une courbe gaussienne, les valeurs de l'histogramme au-delà de 3 écart-types étant légèrement supérieures aux valeurs attendues pour une gaussienne.
- On observe une très nette augmentation de l'écart-type après que les disques ont été soumis à vieillissement. Cette augmentation est sensiblement la même si le vieillissement est effectué avant ou après la gravure.

Référence N°2-A

- La forme des histogrammes se décompose en deux parties : jusqu'à environ 2,5 écart-types l'histogramme s'ajuste bien sur une gaussienne d'écart-type environ 0,08 dT. Au-delà, l'histogramme s'ajuste sur une autre gaussienne d'écart-type beaucoup plus important.
- Après vieillissement, la partie principale de l'histogramme reste quasiment inchangée. La partie au-delà de 3 écart-types évolue fortement et est à l'origine de l'augmentation du taux d'erreur.
- L'évolution de l'histogramme est similaire lorsque le vieillissement est réalisé avant la gravure.

Référence N°2-B

On note peu d'évolution des histogrammes avec le vieillissement.

Le tableau ci-dessous donne les « jitter to clock » associés aux histogrammes. L'évolution est importante pour les disques de la référence 1, avec des valeurs atteignant 0,14 ou 0,15 après 15 jours de vieillissement.

Les disques des références 2-A et 2-B ne montrent pratiquement pas d'évolution du « jitter to clock », avec des valeurs restant inférieures à 0,1. L'apparition de taux d'erreurs numériques élevés dans le cas de la référence 2-A n'est explicable que parce que les histogrammes s'écartent de la forme gaussienne à l'extérieur de l'intervalle $[-0,3 \text{ dT} ; + 0,3 \text{ dT}]$.

Jitter to clock : écart-type de la distribution des positions des transitions
(unité dT $\approx 231 \text{ ns}$)

	T0	+ 5 jours (80°C / 85%RH)	+ 10 jours (80°C / 85%RH)	+ 15 jours (80°C / 85%RH)	+ 20 jours (80°C / 85%RH)
Référence 1 <u>Gravé avant vieillissement</u>	0,095 (D) 0,078 (F)	0,101 (D) 0,097 (F)	0,115 (D) 0,100 (F)	0,142 (D) 0,158 (F)	
<u>Gravé après vieillissement</u> de 5 jours de 10 jours de 15 jours	0,112 (D) 0,124 (D) 0,140 (D)				
Référence 2-A <u>Gravé avant vieillissement</u>	0,072 (D) 0,080 (F)	0,071 (D) 0,092 (F)		0,076 (D) 0,085 (F)	0,081 (D) 0,097 (F)
<u>Gravé après vieillissement</u> de 5 jours de 15 jours de 20 jours	0,077 (D) 0,076 (D) 0,075 (D)				
Référence 2-B <u>Gravé avant vieillissement</u>	0,072 (D) 0,091 (F)		0,071 (D) 0,083 (F)	0,077 (D) 0,084 (F)	

(D) : Début du disque

(F) : Fin du disque

4. SYNTHESE DES RESULTATS

Les résultats des essais de vieillissement ont mis en évidence les points suivants :

- Une nette différence de comportement des références 2-A et 2-B pourtant vendues sous la même présentation (même marque, même modèle) et dans le cas de la référence 2-B des différences de comportement selon le lot de fabrication.
- Le vieillissement des références 1 et 2-A est comparable en ce qui concerne les taux d'erreurs et donc les risques de perte de données, mais les analyses montrent des différences importantes qui conduisent à penser que les phénomènes à l'origine du vieillissement ne sont pas les mêmes pour ces deux références.
- Les références 1 et 2-A se dégradent plus rapidement près du bord externe du disque et l'on peut se demander si ce phénomène est lié à l'état initial du disque (par exemple à l'épaisseur de la couche de dye) ou si on assiste à la propagation d'une détérioration à partir du bord externe du disque (par exemple action de l'oxygène de l'air).

4.1 VARIABILITE DU VIEILLISSEMENT DES DISQUES D'UNE MEME REFERENCE

L'essai a porté sur une trentaine de disque VERBATIM (référence 1). Bien que l'approvisionnement de ces disques n'ait pas été effectué en une seule fois, on n'a pas constaté de différences significatives dans la nature et la vitesse du vieillissement, selon les lots. Par exemple, aucun des disques de cette référence n'a résisté à 15 jours de conditions climatiques sévères (80°C) sans détérioration importante.

A contrario, pour les disques TDK, il est apparu clairement que les disques achetés début 2006, ne se comportaient pas comme ceux achetés à la fin 2006. Le code identifiant le fabricant (ATIP) a changé, montrant que TDK ne s'approvisionnait plus de la même façon. Les disques achetés à la fin de l'année 2006 sont fabriqués par le fabricant indien Moser Baer qui est devenu l'un des principaux fournisseurs mondiaux. Il est difficile de savoir quelle est la différence de fabrication entre le modèle TDK initial (référence 2-A) et celui fabriqué par Moser Baer (référence 2-B). Les différences portent-elles sur la nature des constituants, en particulier la couche sensible, sur le réglage de la machine de fabrication ou sur la réalisation d'éléments annexes comme l'étiquette de la marque ?

La tenue en conditions climatiques sévères des disques fabriqués par Moser Baer est nettement meilleure que celle des disques du modèle initial. Il est toutefois apparu que les trois paquets de 5 disques de la référence 2-B avaient des comportements sensiblement différents. Les disques de l'un des paquets (2-Bc) présentent un vieillissement significatif, mais quasiment inversé par rapport à la référence 2-A, pour ce qui concerne les zones touchées.

Cette expérience sur les disques TDK montre qu'il est difficile de porter un jugement définitif sur un modèle de disque sans avoir de connaissances sur sa fabrication. Elle montre aussi que le vieillissement est sensible aux conditions du process de fabrication (réglage de la machine, précision du master ...) et n'est pas lié uniquement à la nature de la couche sensible.

4.2 NATURE DU VIEILLISSEMENT DES REFERENCES 1 ET 2-A

Pour tenter de remonter à l'origine du vieillissement d'un disque, on s'intéresse à la liaison entre le taux d'erreurs numériques et le signal HF issu de la tête optique. Cette liaison existe forcément puisque le décodage numérique s'effectue uniquement à partir du signal HF.

Contraste du signal HF

Pour les disques de la référence 1, on a constaté, au cours de vieillissement, une diminution significative de l'amplitude de la modulation I11 assimilable à une baisse de contraste. Cette amplitude diminue principalement en raison de l'éclaircissement des zones gravées (voir courbes de l'annexe 4). Toutefois, la baisse de contraste n'explique pas, en tant que telle, l'augmentation des taux d'erreurs, car après vieillissement, la zone du disque près du bord externe reste plus contrastée que la zone interne où le taux d'erreurs est pourtant plus faible. On peut dire que le phénomène de vieillissement induit une baisse de contraste du signal HF, mais la cause des erreurs numériques n'est pas cette baisse de contraste.

Pour les disques de la référence 2-A, on n'observe pratiquement pas d'évolution de l'amplitude de la modulation du signal HF, ni d'ailleurs d'aucun paramètre global de ce signal.

Etude de la distribution des écarts de position des transitions

Les erreurs numériques sont directement liées à l'écart de position des transitions (au seuil de détection) par rapport aux tops de l'horloge reconstituée à partir du signal HF. En effet, il y a erreur de décodage dès lors que l'écart d'une transition excède la moitié de la période de l'horloge. Il est possible d'extrapoler le taux d'erreurs numériques, à partir de la forme de la fonction de distribution de ces écarts (cf. § 2.2.5.).

Dans le cas de la référence 1, la distribution des écarts est pratiquement gaussienne, avec un écart-type qui augmente au cours du vieillissement, ce qui explique l'augmentation du taux d'erreurs numériques.

Dans le cas de la référence 2-A, la distribution des écarts peut être considérée comme gaussienne pour des écarts inférieurs à un quart de la période d'horloge, mais on ne constate pratiquement pas d'évolution de l'écart-type de cette gaussienne au cours du vieillissement. Les erreurs numériques proviennent seulement d'une petite partie de l'ensemble des transitions (inférieur à 5%). L'écart-type associé à ce sous-ensemble de mauvaises transitions est élevé et augmente au cours du vieillissement, ce qui explique l'augmentation des taux d'erreurs numériques.

Hypothèses sur la nature du vieillissement

Dans le cas de la référence 1, la dégradation du disque semble liée à l'évolution de la couche sensible, dont les zones brûlées deviennent plus claires après vieillissement et les zones non brûlées légèrement plus sombres. On observe de manière concomitante une dispersion des positions des transitions. Cela pourrait s'expliquer en admettant que l'évolution des parties brûlées n'est pas rigoureusement homogène : Les positions des extrémités des pits n'évolueraient pas forcément en moyenne, mais leur écart-type s'en trouverait augmenté.

Dans le cas de la référence 2-A, le fait que la plupart des transitions ne semblent pas concernées par le vieillissement, ajouté au fait que les paramètres d'amplitude du signal HF sont insensibles au vieillissement, plaide en faveur de défauts localisés couvrant une faible proportion du disque. Ces défauts seraient très petits (éventuellement de l'ordre du μm) puisqu'ils n'apparaissent pas sous forme de petites taches sur les représentations de surface du taux d'erreurs. Ils évolueraient de façon importante en conditions climatiques sévères, soit en nombre, soit en taille. La réalisation de l'étiquette interférerait avec la création de ces défauts, puisque les zones non peintes sont exemptes d'erreurs numériques (voir les représentations de surface en annexe 3). Cela peut s'expliquer si la réalisation de l'étiquette engendre des points faibles sur la couche métallique. Ces points faibles seraient à l'origine de petits défauts ponctuels qui, au fur et à mesure du vieillissement en conditions climatiques sévères, s'accroîtraient et deviendraient source d'erreurs numériques.

4.3 AMPLIFICATION DE LA DETERIORATION DES DISQUES SUR LE BORD EXTERNE

Pour la référence 1 et comme pour la référence 2-A, les taux d'erreurs numériques sont particulièrement élevés, après vieillissement, près du bord externe. Les représentations de surface donnent même l'impression d'une progression du taux d'erreur à partir du bord externe, un peu à la manière dont une tache de rouille pourrait progresser. Cet aspect est-il fortuit en étant lié par exemple à une moins bonne qualité initiale près du bord externe couplée à un effet de seuil sur les erreurs, ou bien correspond-il à une progression réelle d'un phénomène physique à l'origine de la dégradation ?

On tentera de répondre à cette question séparément pour les deux références de disque, malgré une similitude apparente.

Référence 1

Pour la référence 1, on constate dès la gravure initiale des différences entre le bord interne et le bord externe. En particulier le niveau de réflectivité des pits 11T baisse régulièrement du centre vers le bord, indiquant que les parties gravées sont d'autant plus sombres que l'on va vers le bord externe. La progression est très régulière, sensiblement proportionnelle à la distance au centre du disque (voir annexe 4). Les zones non gravées présentent aussi une légère baisse de réflectivité, mais seulement pour une distance au centre supérieure à 48 mm. Ceci pourrait s'expliquer par l'augmentation de l'épaisseur de la couche de dye en allant du bord interne vers le bord externe du disque. L'évolution de la réflectivité en cours de vieillissement est très homogène sur tout le disque.

Lorsqu'on représente le taux d'erreurs numériques en échelle logarithmique, on constate que son évolution est d'abord homogène sur tout le disque (jusqu'à 5 jours de vieillissement), puis s'amplifie en partant du bord externe. (voir graphes de l'annexe 2). Il est difficile d'expliquer cette amplification, si le phénomène de vieillissement est de même nature sur tout le disque. En effet, l'amplification commence pour des taux d'erreurs plus faibles et d'autant plus tôt que l'on est près du bord externe du disque. Par contre cette évolution s'expliquerait si se superposent deux phénomènes de vieillissement : un phénomène homogène sur tout le disque et un phénomène se propageant à partir du bord externe. Le phénomène homogène pourrait être en relation avec l'éclaircissement des zones gravées, car on a noté que cet éclaircissement évolue lui aussi de manière homogène sur tout le disque. Concernant l'amplification à partir du bord externe, on constate que les zones coïncidant avec les inscriptions au dos du disque (non peintes), sont un peu moins touchées. Ce dernier point évoque le vieillissement des disques de la référence 2-A.

La dégradation observée sur des disques ayant vieilli uniquement avant gravure est relativement homogène sur le disque, l'amplification près du bord externe étant beaucoup moins marquée que pour un vieillissement après gravure.

Référence 2-A

La dégradation des disques de la référence 2-A n'est pas homogène sur la surface du disque. Ce qui semble le plus étonnant est l'absence quasi totale d'erreurs numériques sur certaines zones correspondant aux inscriptions au dos du disque (voir annexe 3). Par contre, les zones les plus endommagées apparaissent soit sous forme de taches soit près du bord externe. Il est intéressant de noter que la localisation et l'aspect des taches sont exactement les mêmes si le disque a subi un vieillissement avant ou après gravure. La dégradation semble donc totalement indépendante de la gravure. Cela est compatible avec l'hypothèse d'une dégradation basée sur l'apparition de petits défauts localisés qui auraient les mêmes conséquences, que le disque soit gravé après vieillissement ou vieilli après gravure.

5. CONCLUSIONS

La présente étude ne permet pas de porter des conclusions générales sur le vieillissement des CD-R, mais a valeur d'illustration sur quelques points. L'investigation a principalement portée sur deux références de CD-R (1 et 2-A). La troisième référence (2-B) est identique sous son aspect commercial à la référence 2-A mais en diffère par son origine de fabrication. Sa dégradation en conditions climatiques sévères est moindre et de plus variable d'un lot à l'autre, un seul lot de 5 disques sur les 3 lots achetés présentant une dégradation significative. Les résultats obtenus ne concernent qu'une seule condition climatique (température 80°C – humidité relative 85 %).

Les différences observées entre les références 1 et 2-A fait apparaître que **la dégradation en conditions climatiques sévères des disques optiques, n'est pas un phénomène « monolithique »** et qu'elle n'est certainement pas uniquement liée à l'évolution chimique de la couche de dye, par elle-même, sous l'effet de la température. Pour preuve, on retiendra le fait que, pour la référence 2-A, la localisation des zones dégradées coïncide avec la peinture sur le dos du disque. Sur cette même référence, les analyses faites sur le signal HF, sont compatibles avec une dégradation sous la forme de petites taches, plutôt qu'avec une dégradation uniforme sur la surface du disque. Ceci est à relier à des observations visuelles réalisées sur des DVD enregistrables et qui montrent l'apparition de taches circulaires, issues d'un point précis et dont le rayon augmente avec le vieillissement.

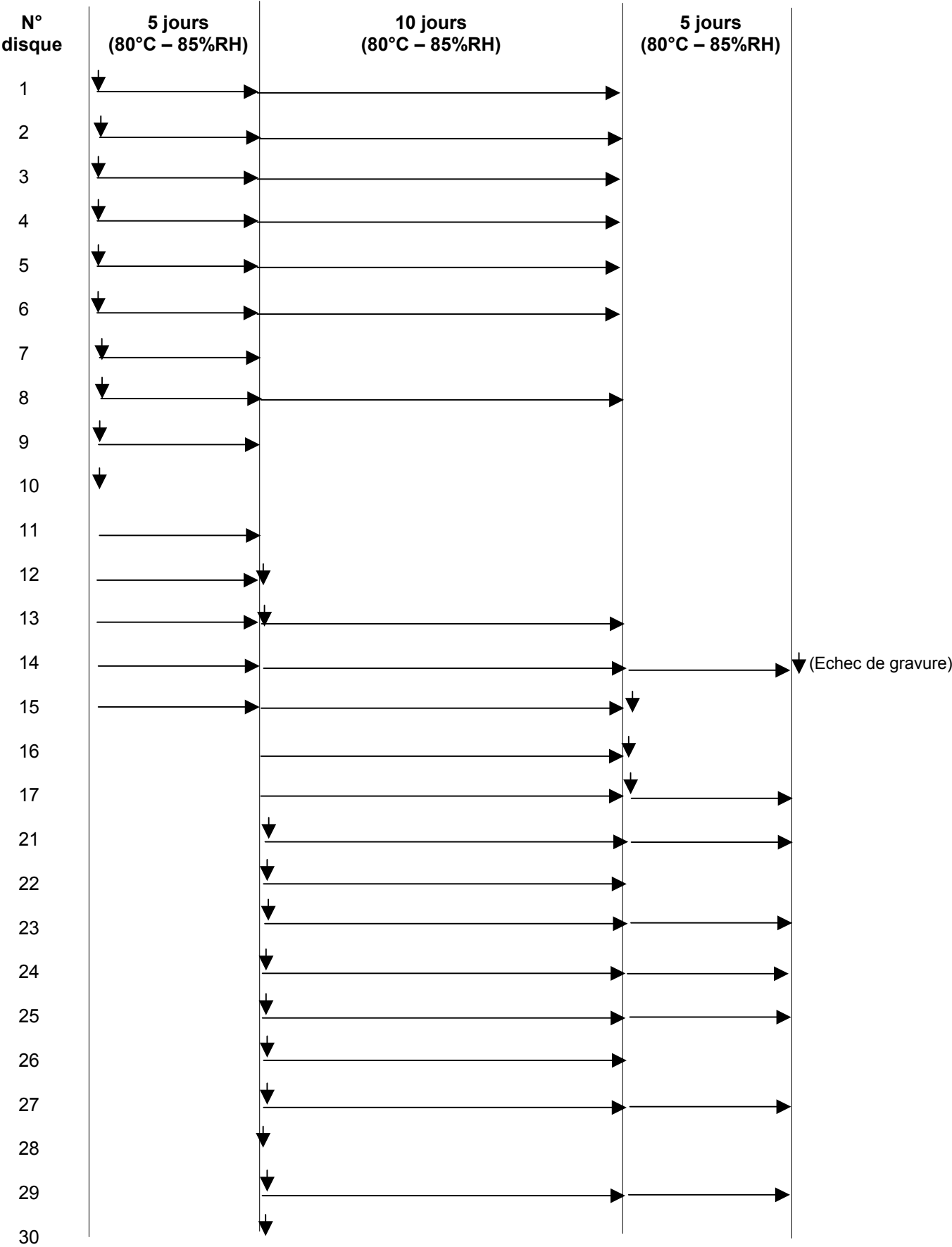
Dans le cas de la référence 1, l'apparition d'erreurs numériques très importantes, semblant se propager, à partir du bord externe du disque n'est guère compatible avec une transformation chimique intrinsèque du dye, même en tenant compte de la variabilité éventuelle de l'épaisseur de la couche lorsqu'on va du bord interne vers le bord externe du disque. L'hypothèse de l'infiltration d'un composant (oxygène de l'air par exemple) à partir du bord externe colle mieux aux observations. Si c'est le cas, cela implique que **la réalisation du disque (finition du bord, couche de vernis) a une grande importance**, et que les différents process ou réglages de fabrication peuvent influencer fortement sur la vitesse de vieillissement de disques ayant une couche de dye de même nature chimique.

On retiendra également que **les valeurs statistiques des paramètres optiques, qui sont données par les analyseurs, peuvent s'avérer insuffisantes pour appréhender la dégradation d'un disque**. Par exemple dans le cas de la référence 2-A, on n'observe, au cours du vieillissement, pratiquement aucune évolution des paramètres REF, I11, I3, SYM, Jitter, etc. Ceci s'explique par le fait qu'un faible pourcentage du signal est concerné par la dégradation (limitée à de petites taches) et que les valeurs moyennes et écart-types ne peuvent le détecter. Les erreurs numériques sont dues à des transitions décalées de plus d'une demi-période d'horloge. L'histogramme des positions des transitions par rapport aux tops de l'horloge, peut nous renseigner, à condition de s'intéresser à ses « ailes », c'est à dire au très petit nombre de transitions à fort décalage (supérieur à 0,3 fois la période d'horloge). Le suivi au cours du vieillissement du « jitter to clock » (écart-type de l'histogramme) peut s'avérer non significatif si la distribution n'est pas gaussienne, comme dans le cas de la référence 2-A. On gardera en mémoire qu'un taux de transitions erronées de 10^{-3} , donc faible dans l'absolu, génère dans le cas d'un CD, un taux de blocs erronés de l'ordre de 10% totalement inacceptable (Bler de l'ordre de 1000). L'ordre de grandeur est le même pour le décodage du signal HF en lecture d'un DVD, d'un HD-DVD ou d'un disque Blu-Ray.

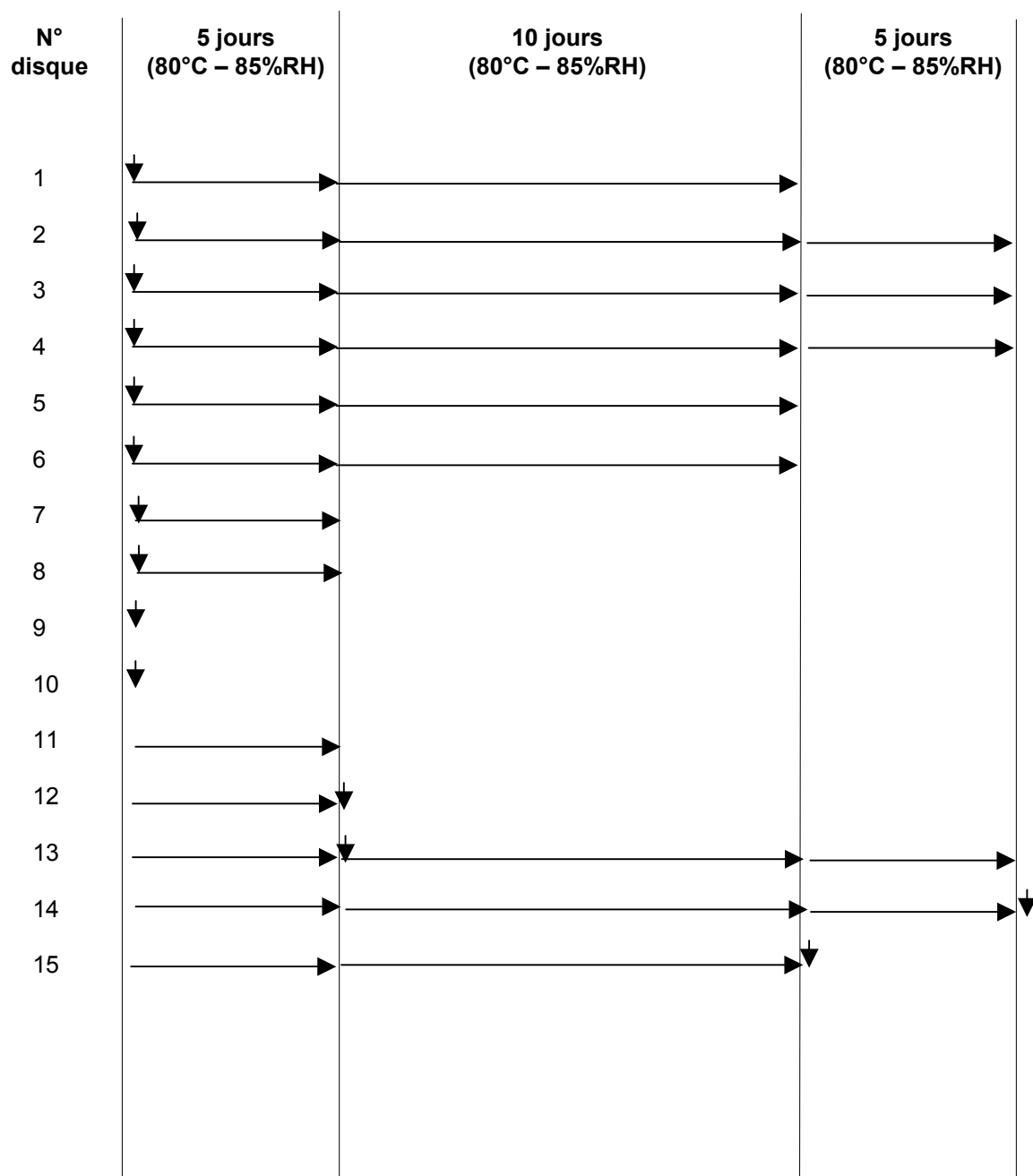
Notons enfin que cette étude ne permet pas de distinguer l'influence de l'hygrométrie par rapport à l'influence de la température. Pour faire cette distinction, des essais complémentaires pourraient être réalisés à la même température (80°C), mais en atmosphère sèche. On sait que les molécules d'eau peuvent diffuser dans le polycarbonate et donc atteindre la couche de dye par la face avant du disque. On s'attend à ce qu'une action directe (sans autre composant) des molécules d'eau sur le dye conduise à une dégradation homogène sur la surface du disque, mais cela reste à vérifier.

ANNEXE 1 – CYCLES DE VIEILLISSEMENT REALISES POUR CHAQUE DISQUE

Référence N° 1



Référence N° 2-A



Référence N° 2-B

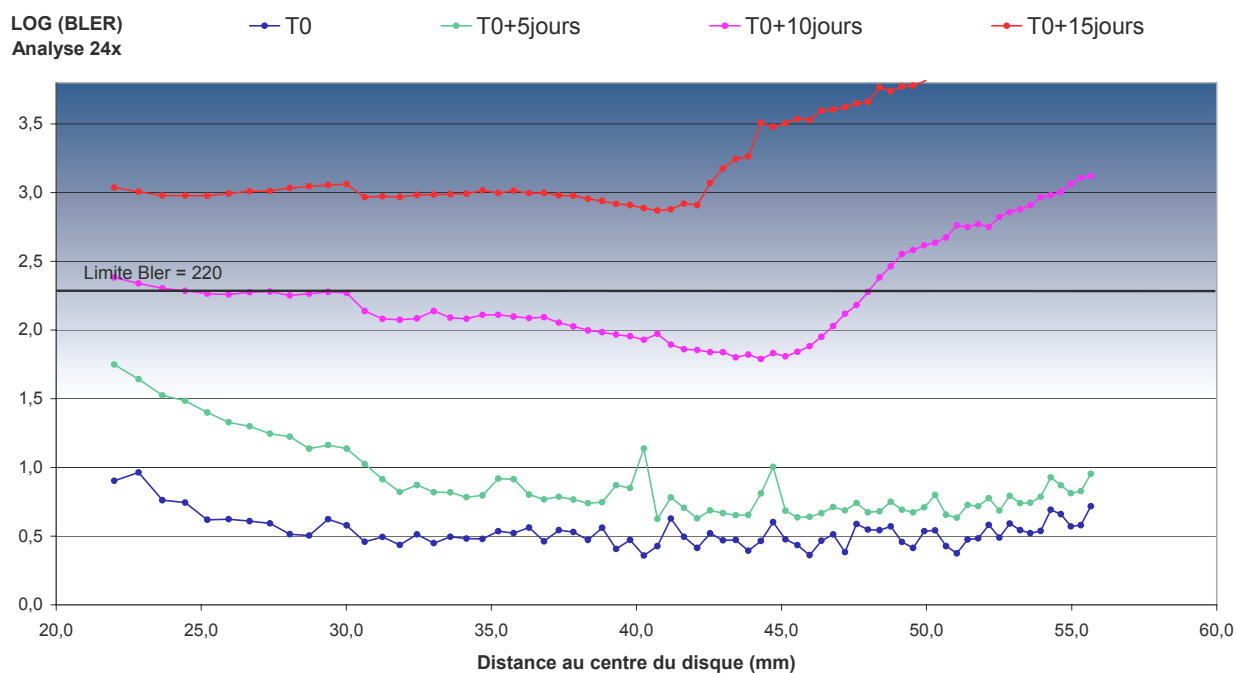
N° disque	5 jours (80°C – 85%RH)	10 jours (80°C – 85%RH)	5 jours (80°C – 85%RH)
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			

ANNEXE 2 – EVOLUTION DU TAUX D'ERREUR (BLER)

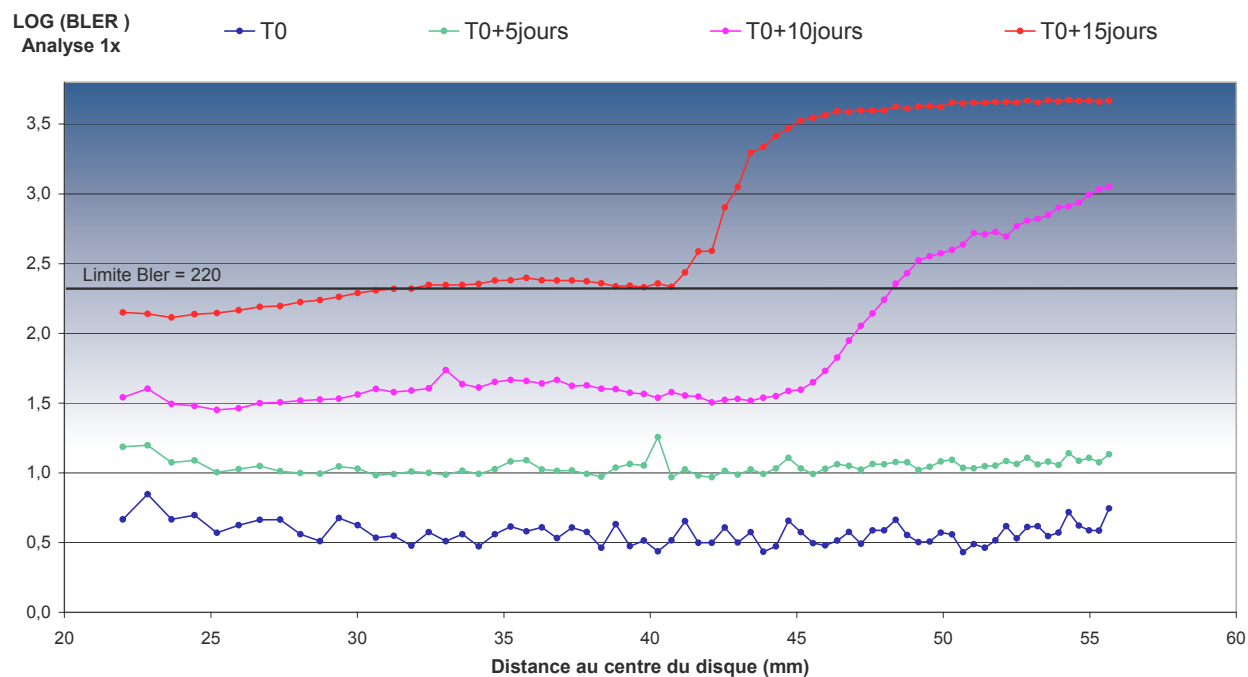
Référence N° 1

Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x



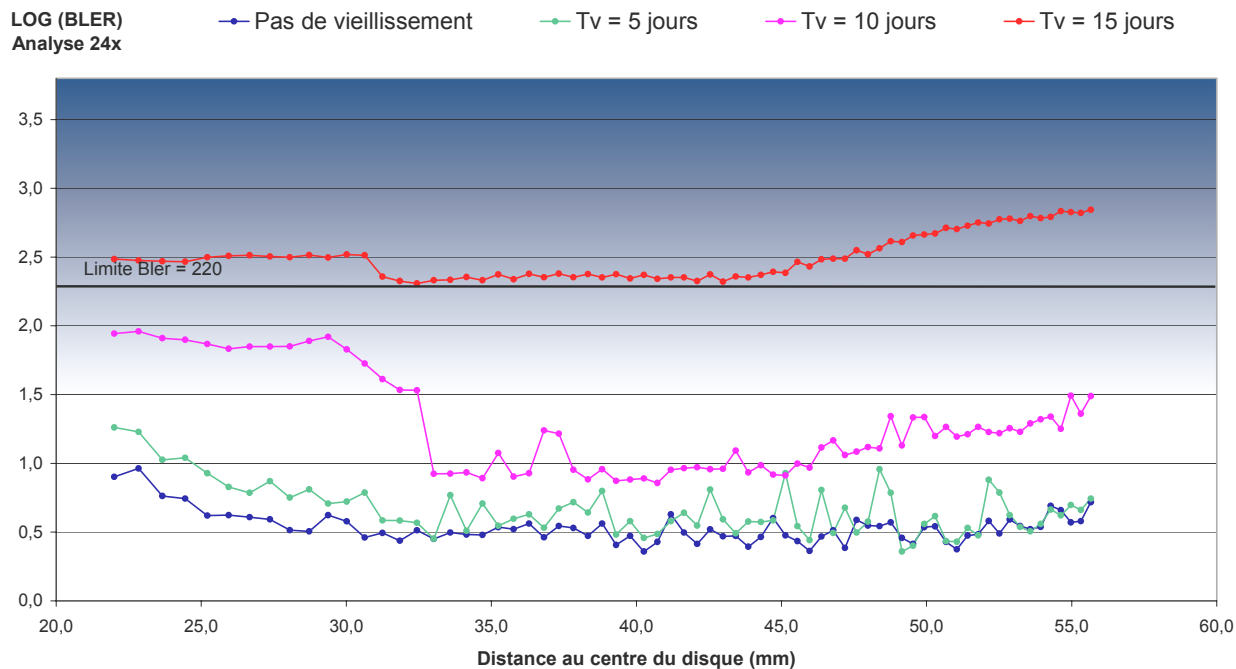
Analyse à la vitesse 1x



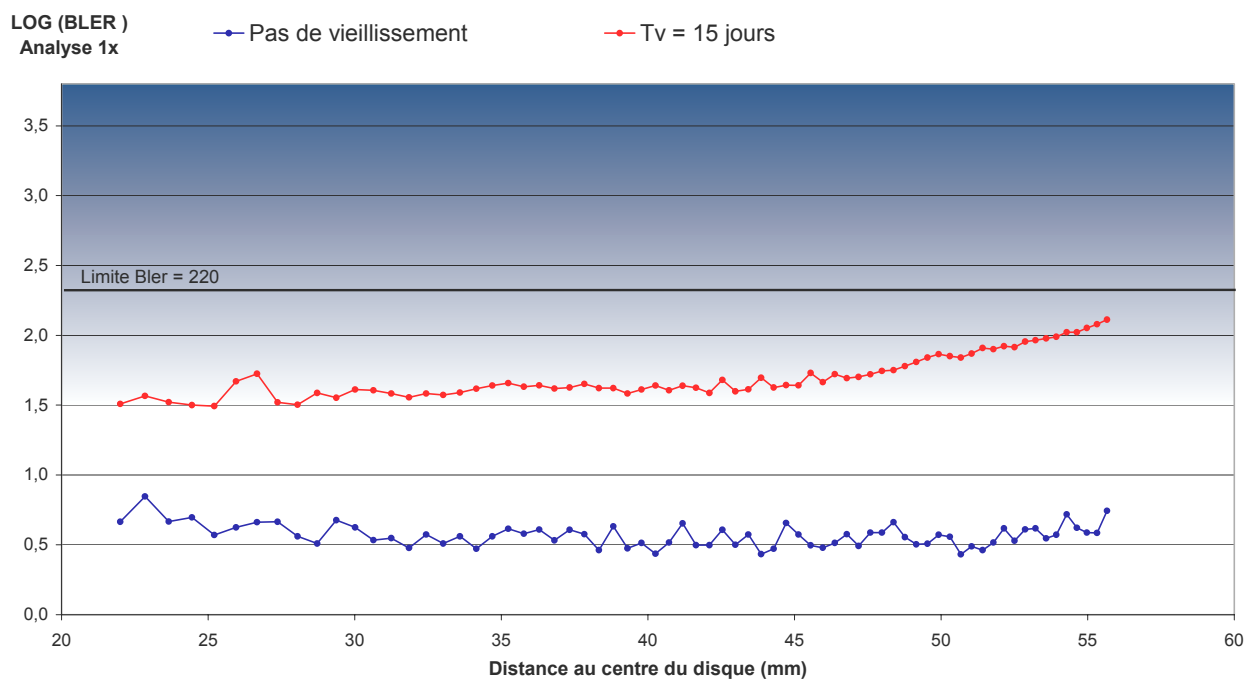
Référence N° 1

Disques vieilliss sur une durée Tv avant gravure - Pas de vieillissement après gravure

Analyse à la vitesse 24x



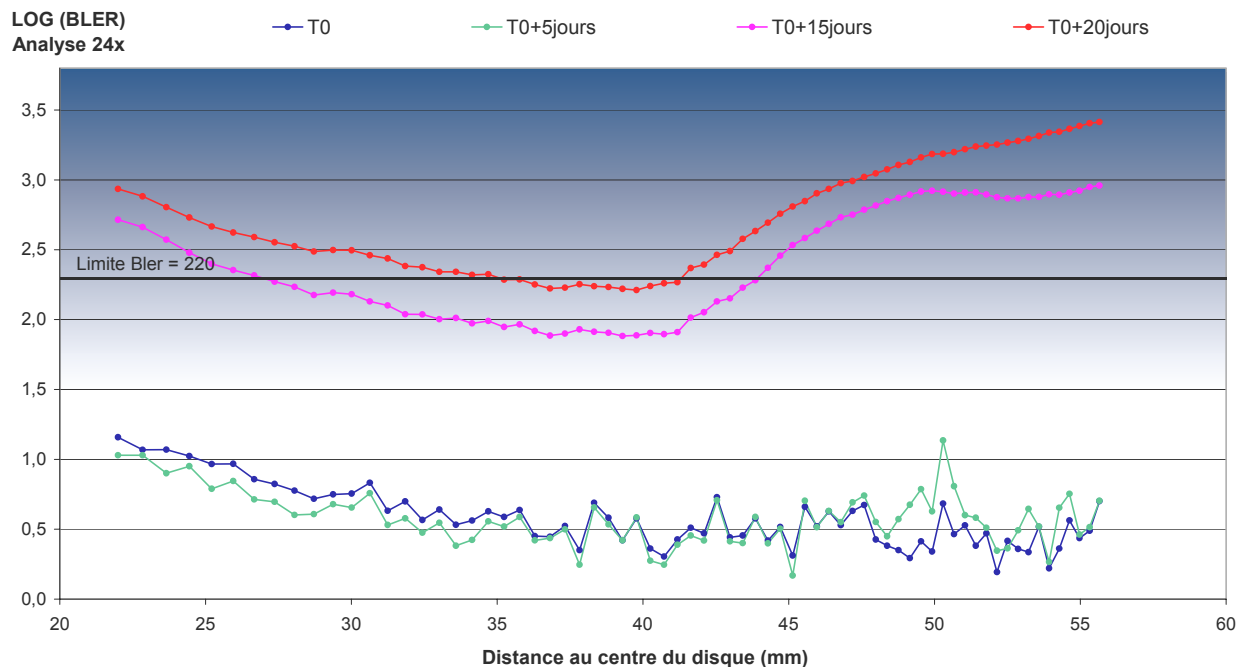
Analyse à la vitesse 1x



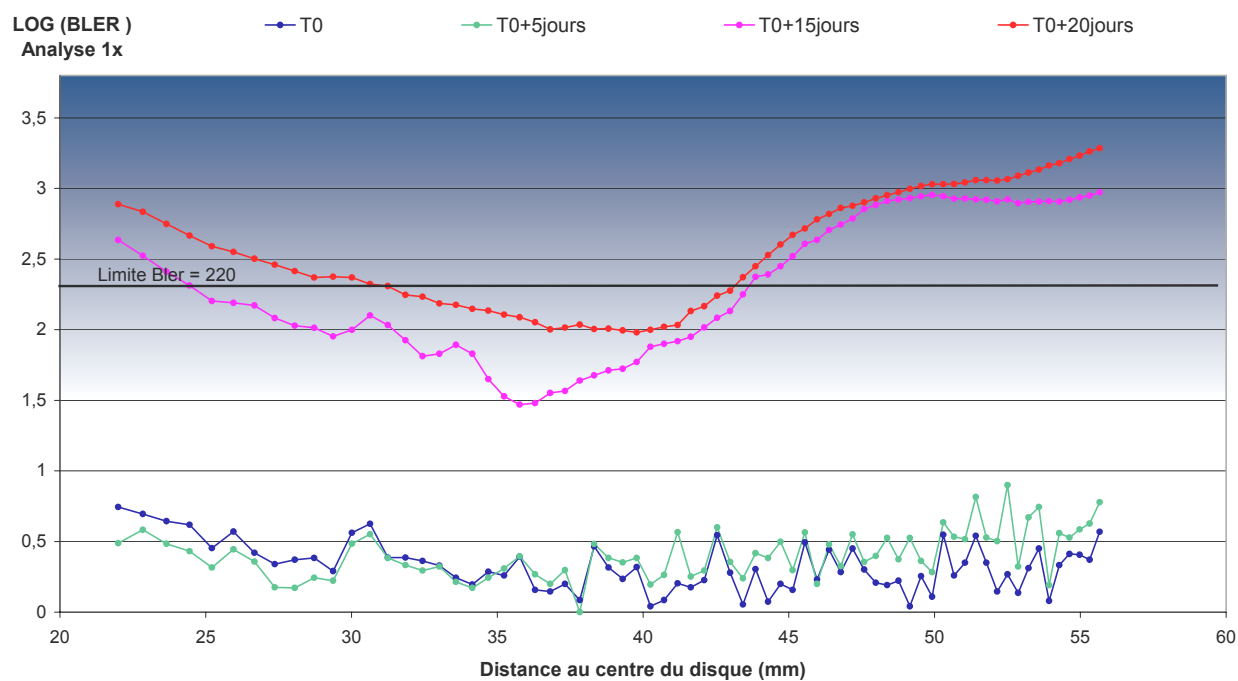
Référence N° 2-A

Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x



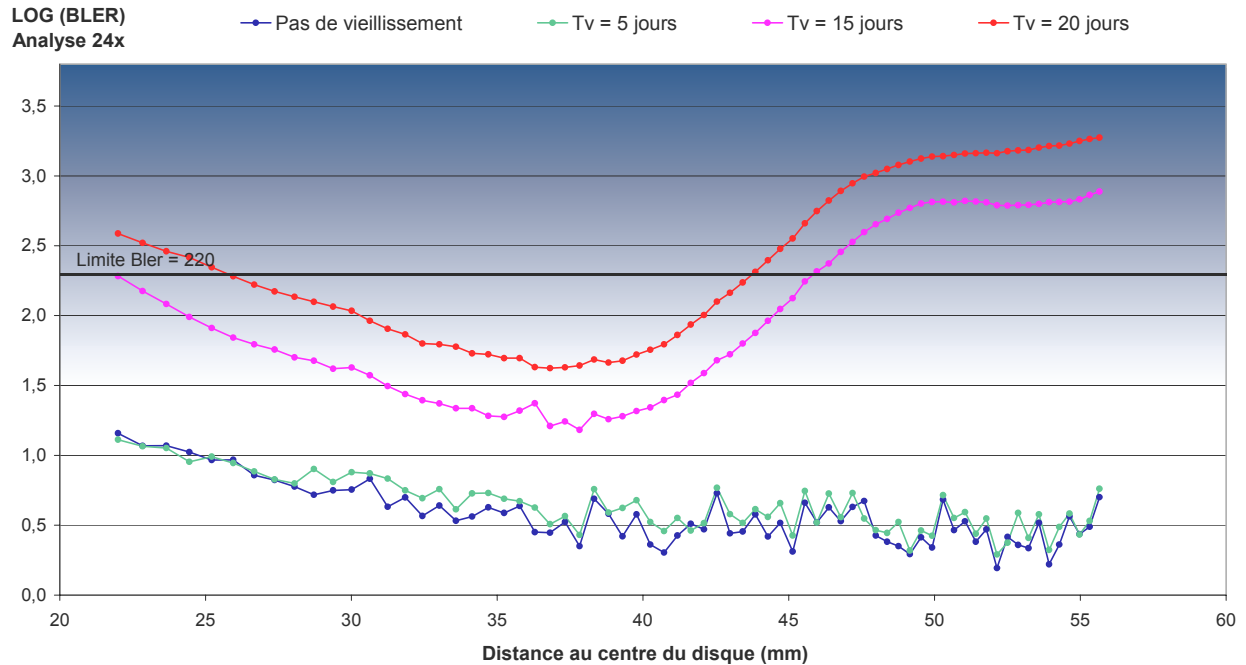
Analyse à la vitesse 1x



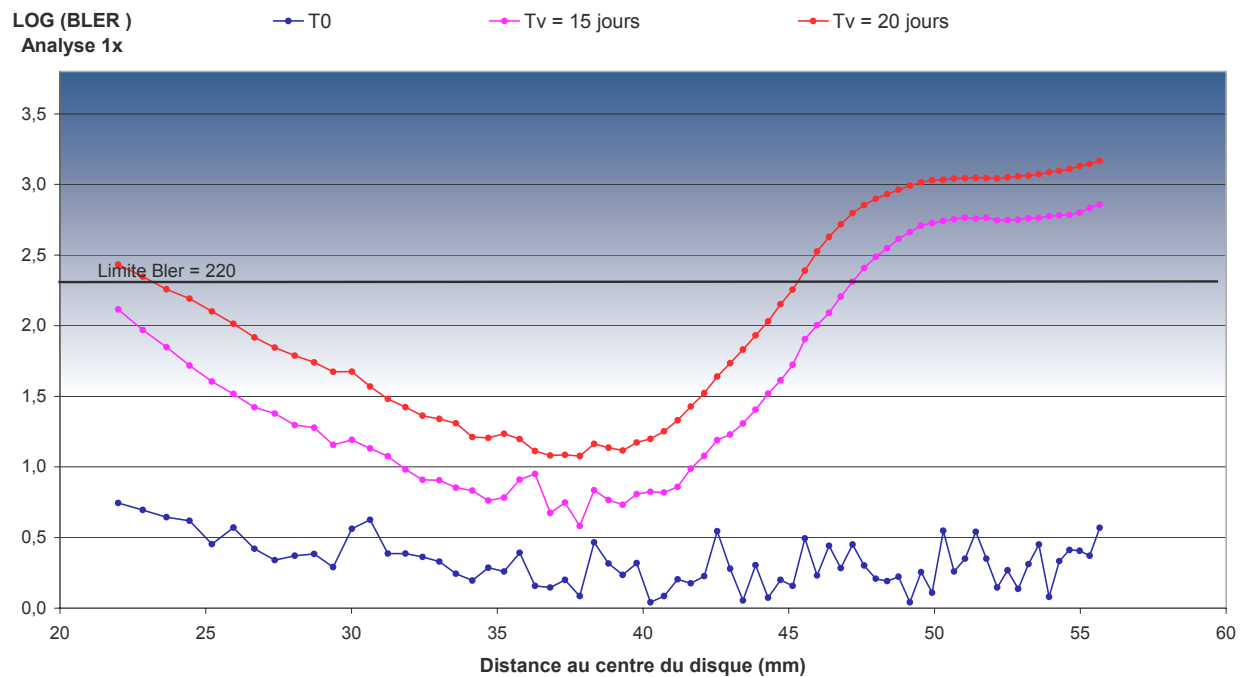
Référence N° 2-A

Disques vieillis sur une durée Tv avant gravure - Pas de vieillissement après gravure

Analyse à la vitesse 24x



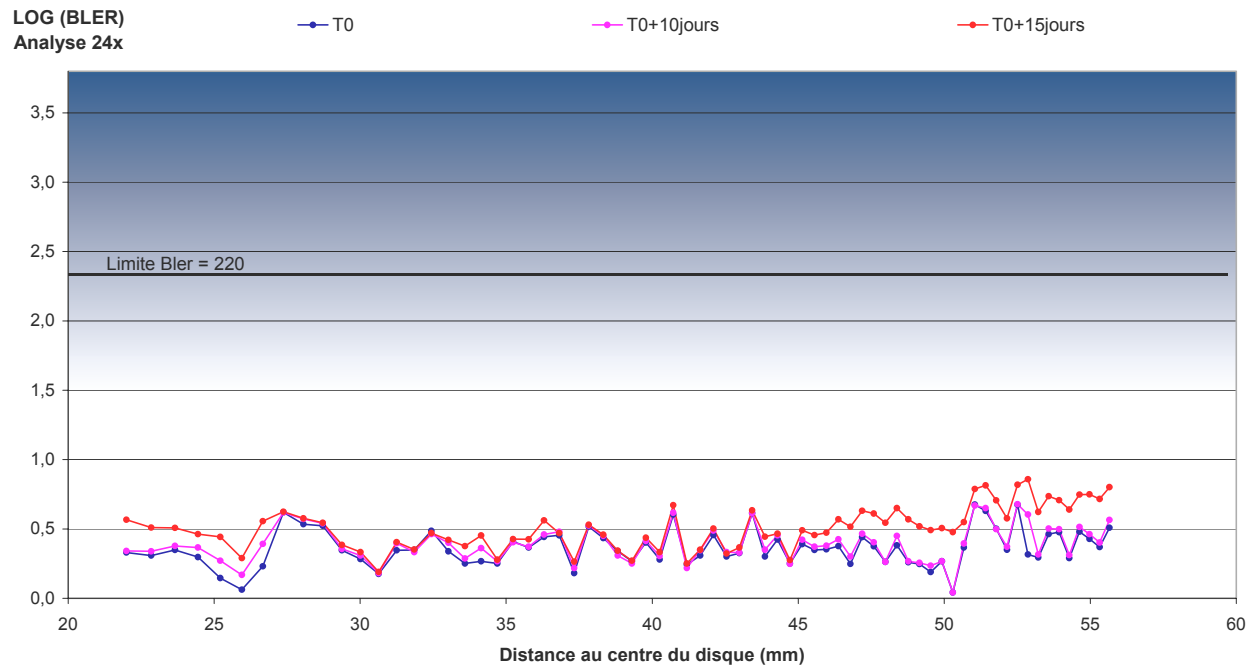
Analyse à la vitesse 1x



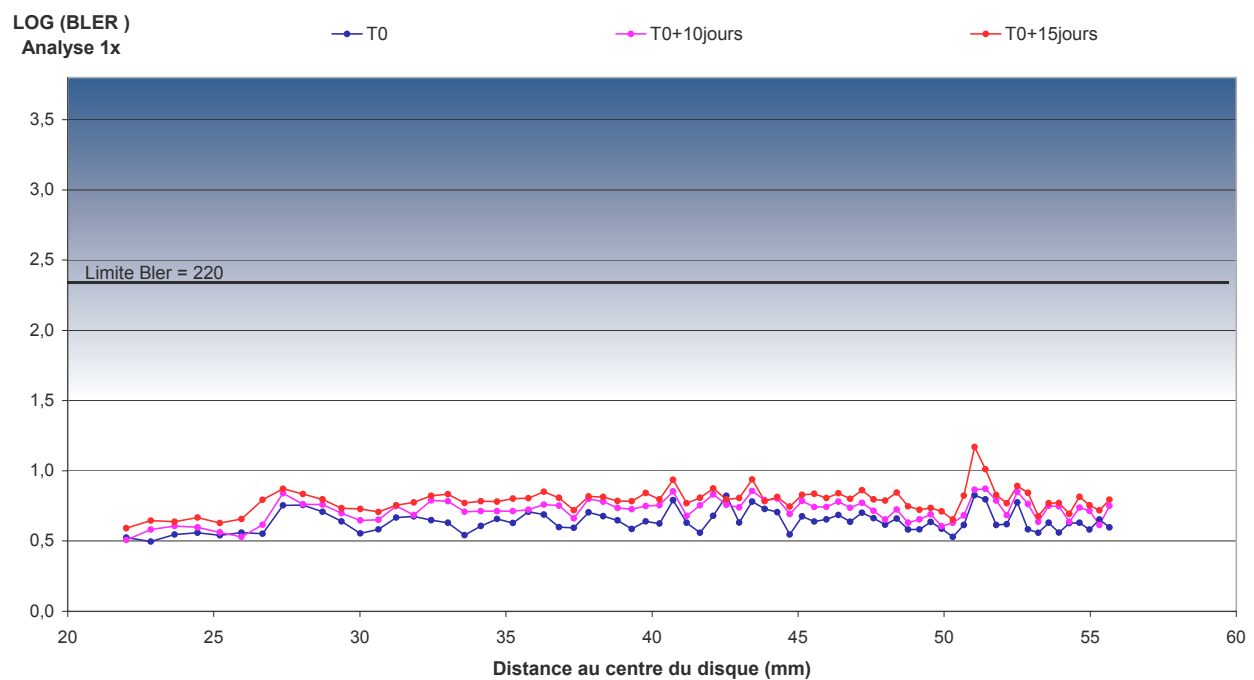
Référence N° 2-B (a)

Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x



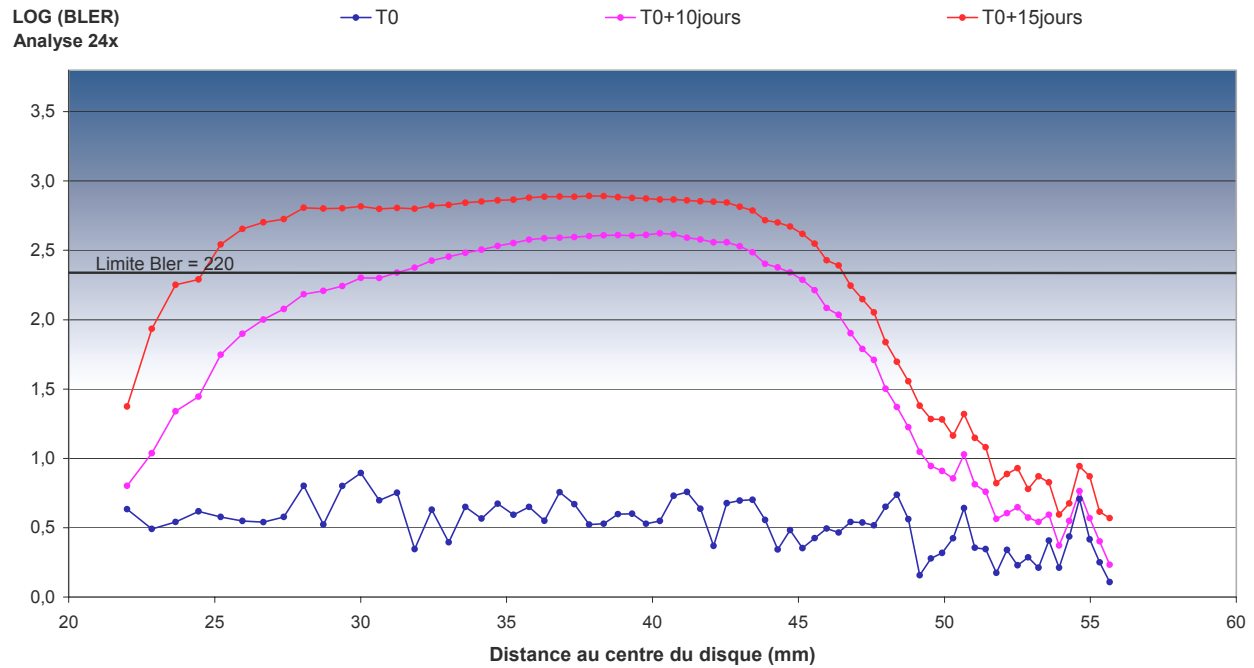
Analyse à la vitesse 1x



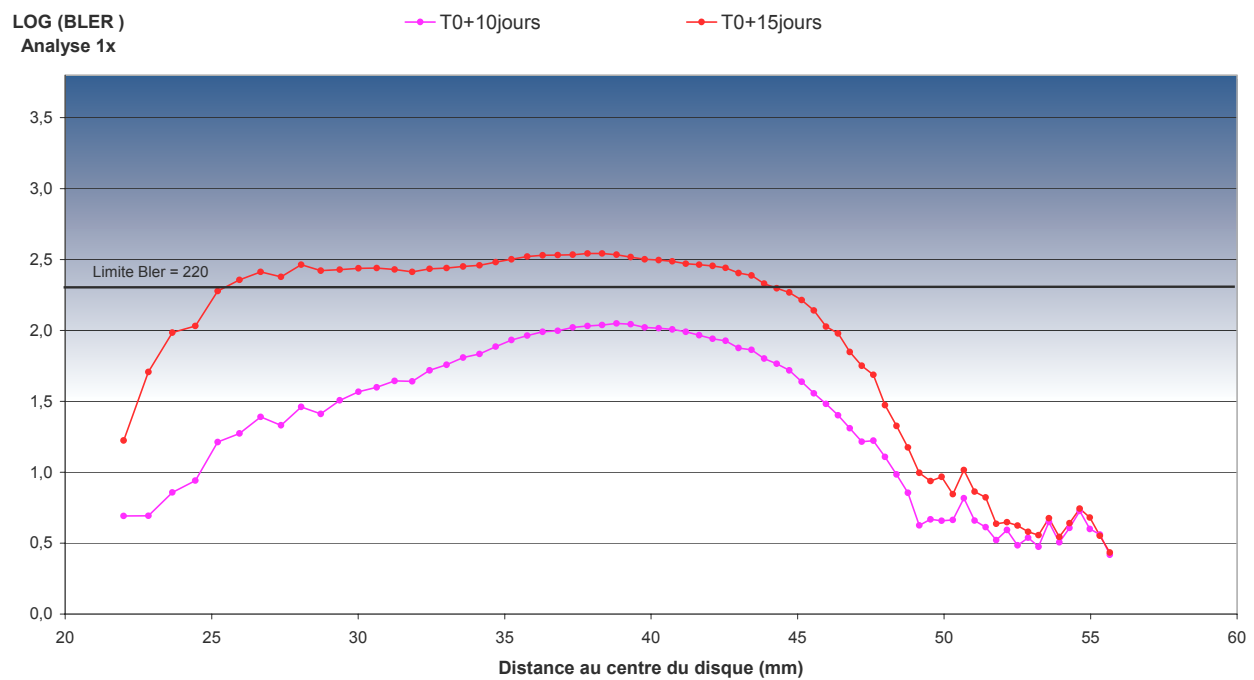
Référence N° 2-B (c)

Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x



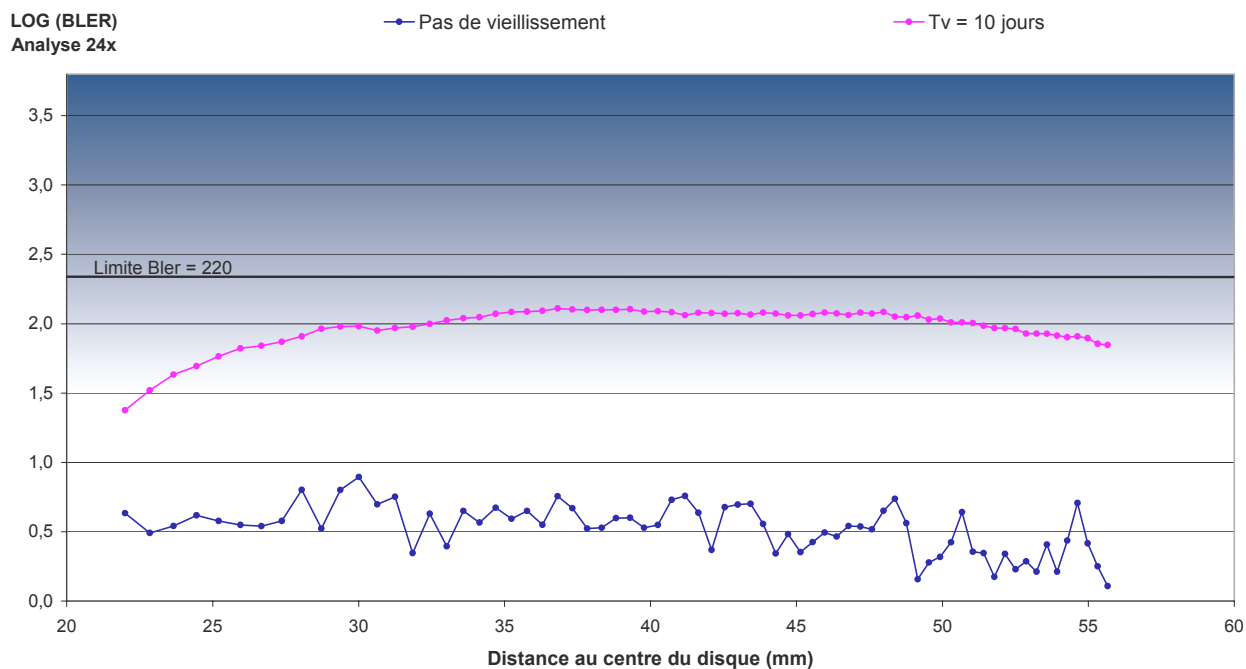
Analyse à la vitesse 1x



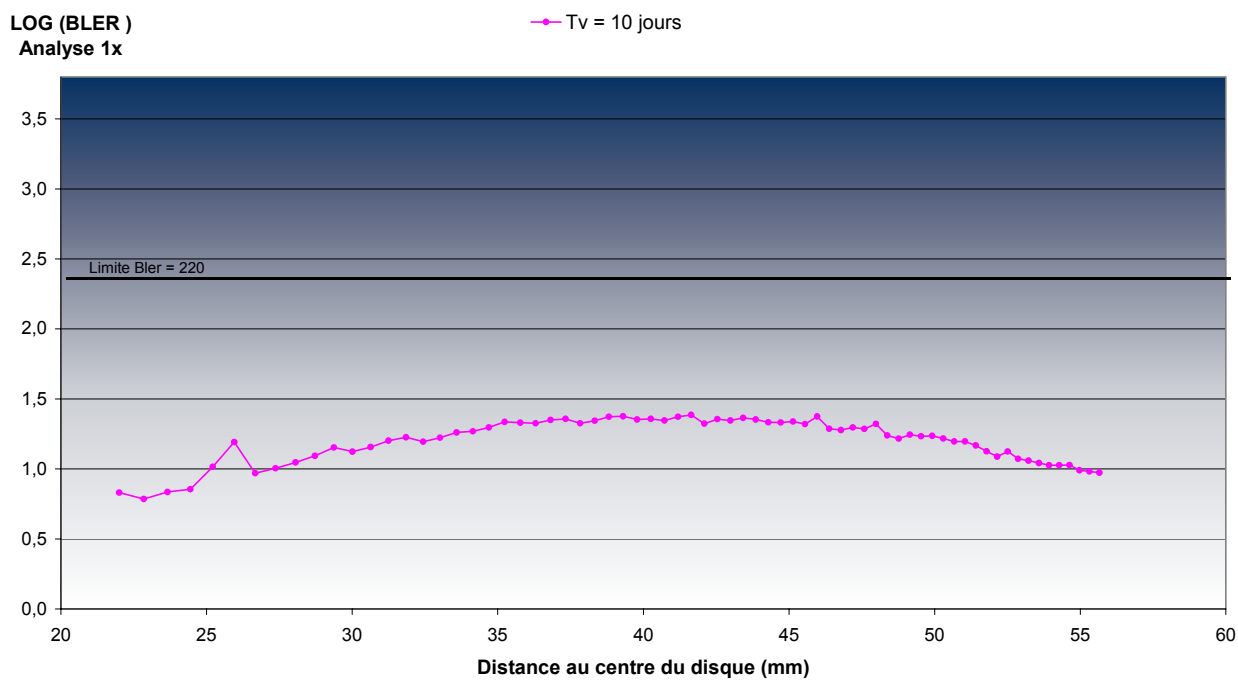
Référence N° 2-B (c)

Disques vieillis sur une durée Tv avant gravure - Pas de vieillissement après gravure

Analyse à la vitesse 24x



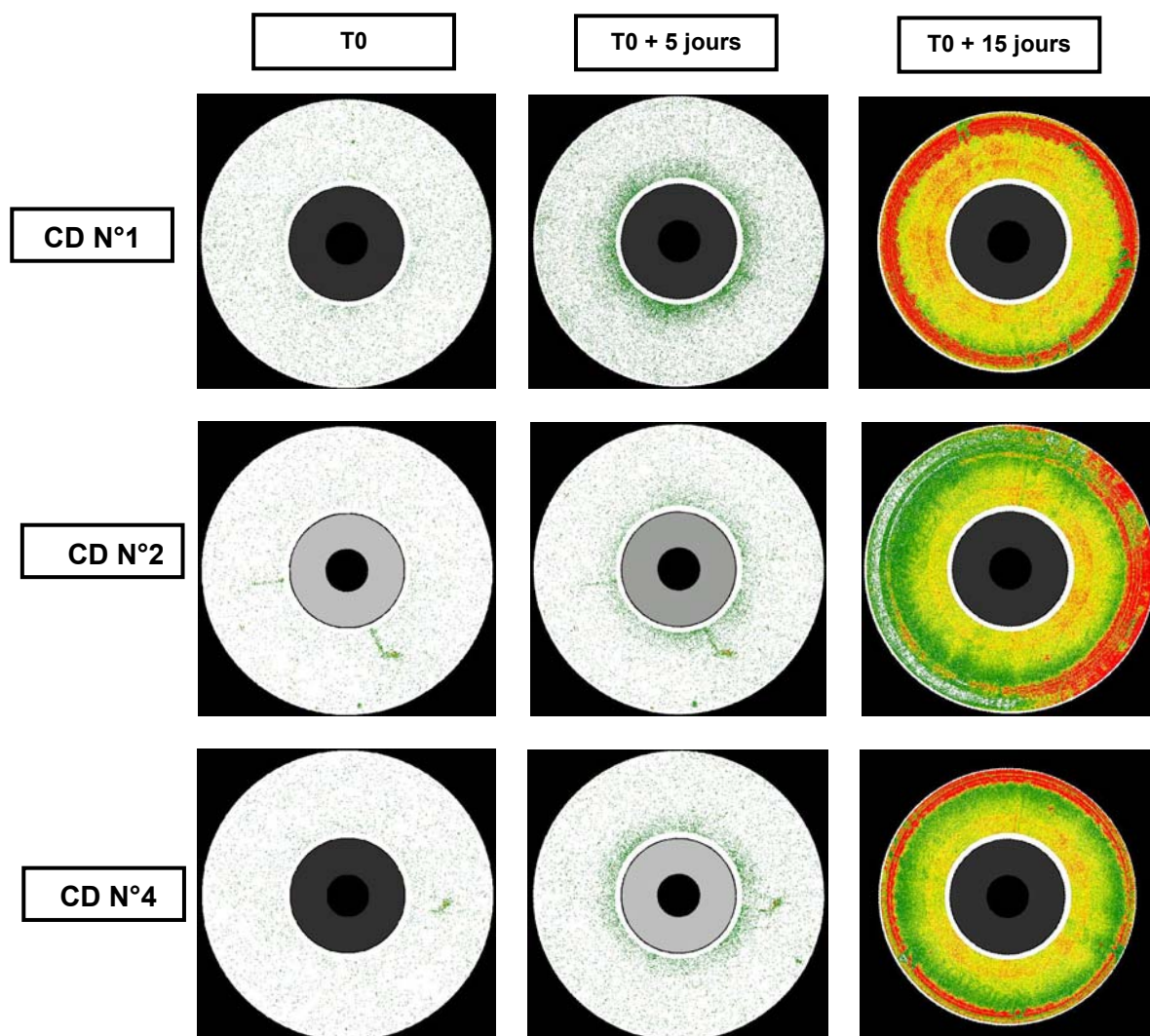
Analyse à la vitesse 1x



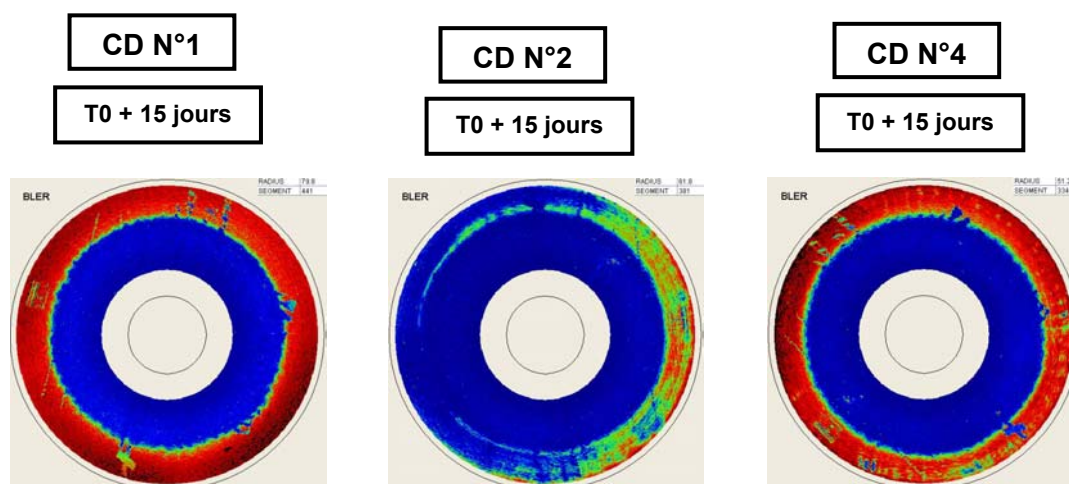
ANNEXE 3 – REPRESENTATIONS DE SURFACE DU TAUX D'ERREUR (BLER)

Référence N° 1 – Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x

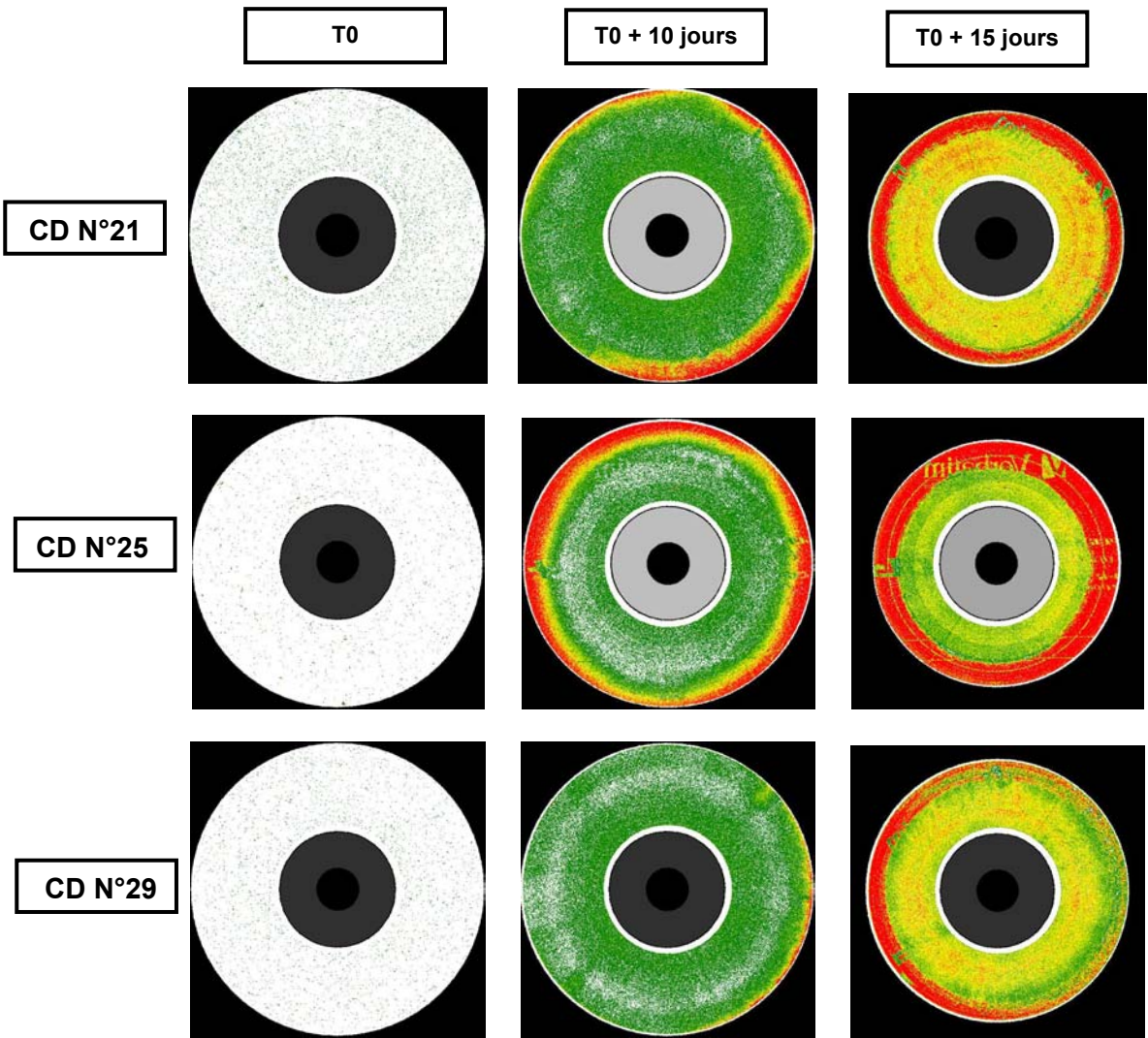


Analyse à la vitesse 1x

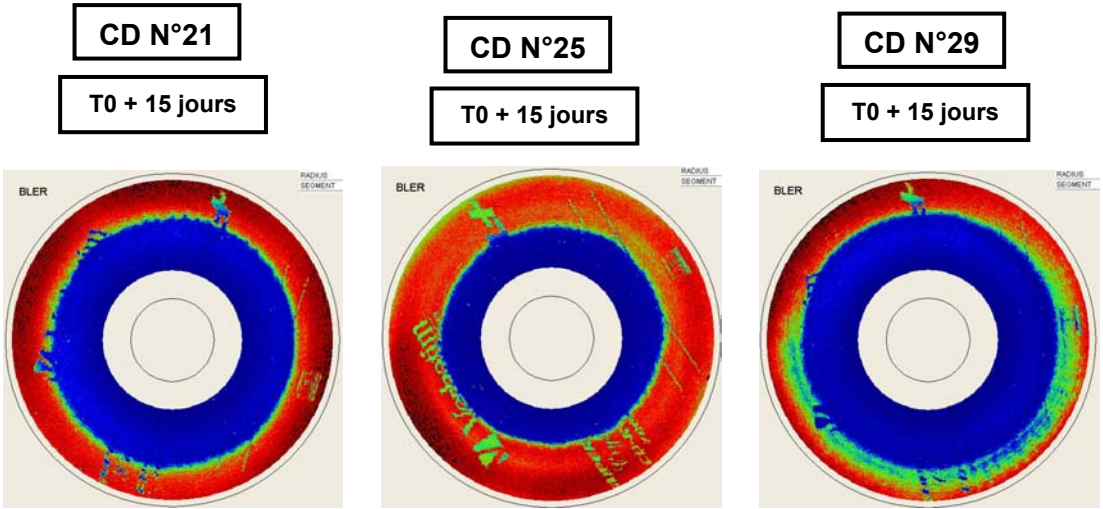


Référence N° 1 – Disques gravés avant vieillissement (suite)

Analyse à la vitesse 24x

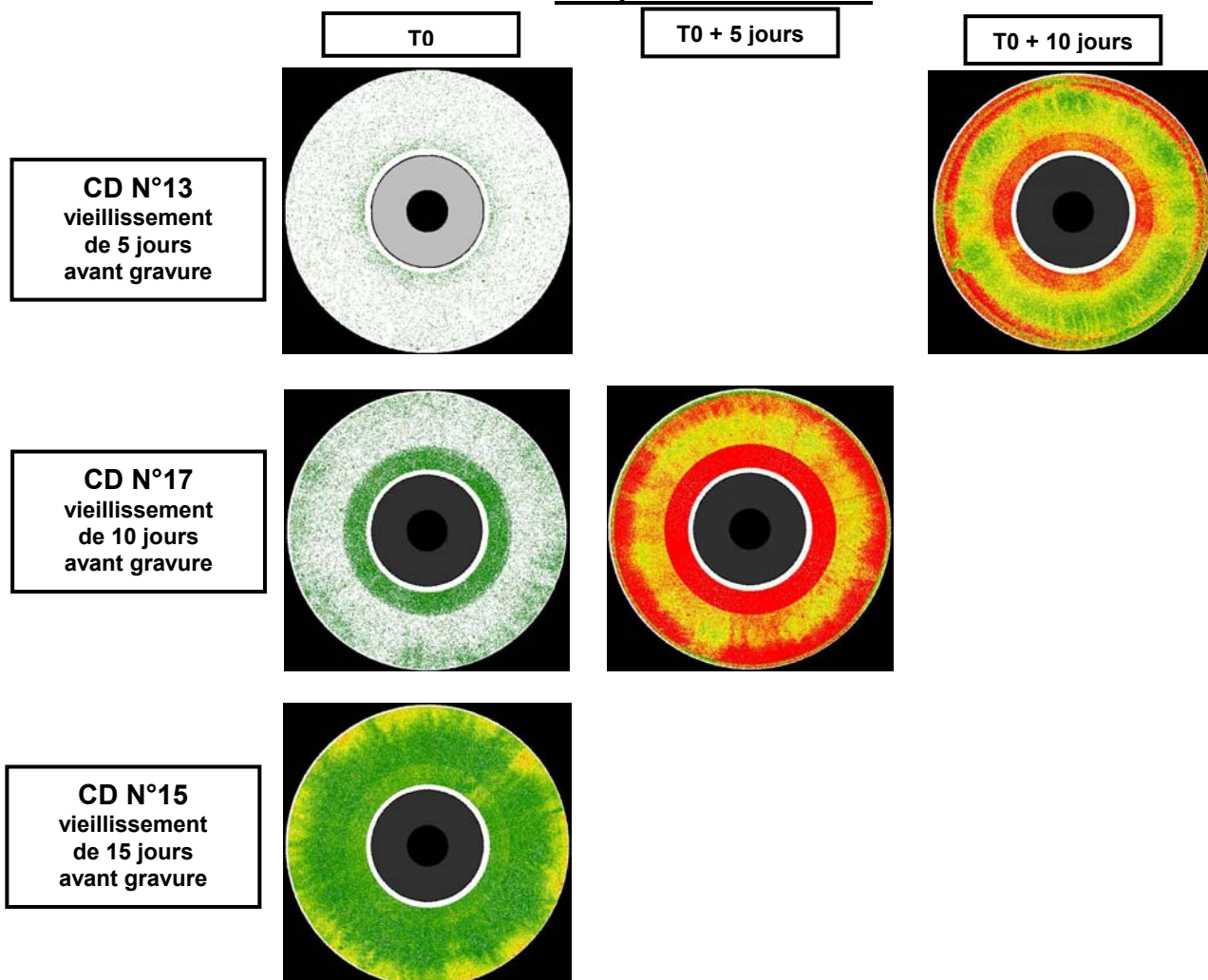


Analyse à la vitesse 1x

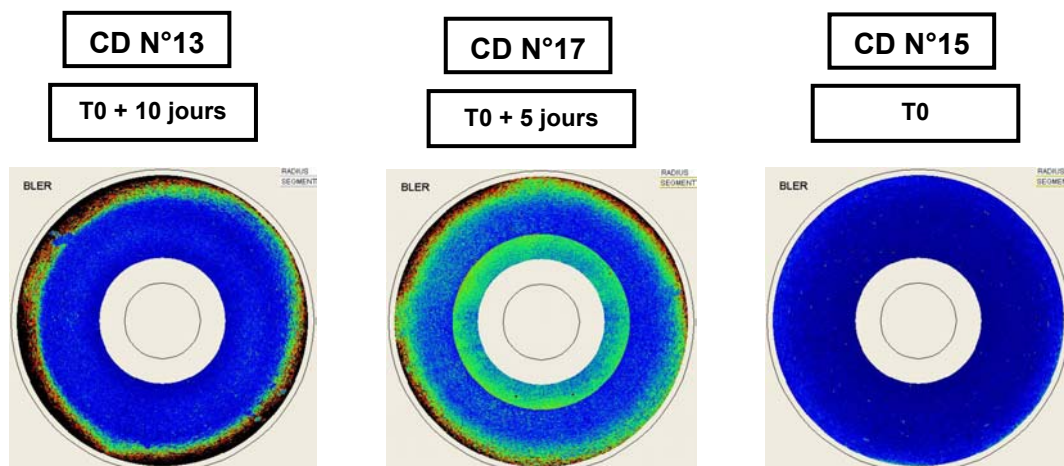


Référence N° 1 – Disques vieilliss avant gravure

Analyse à la vitesse 24x

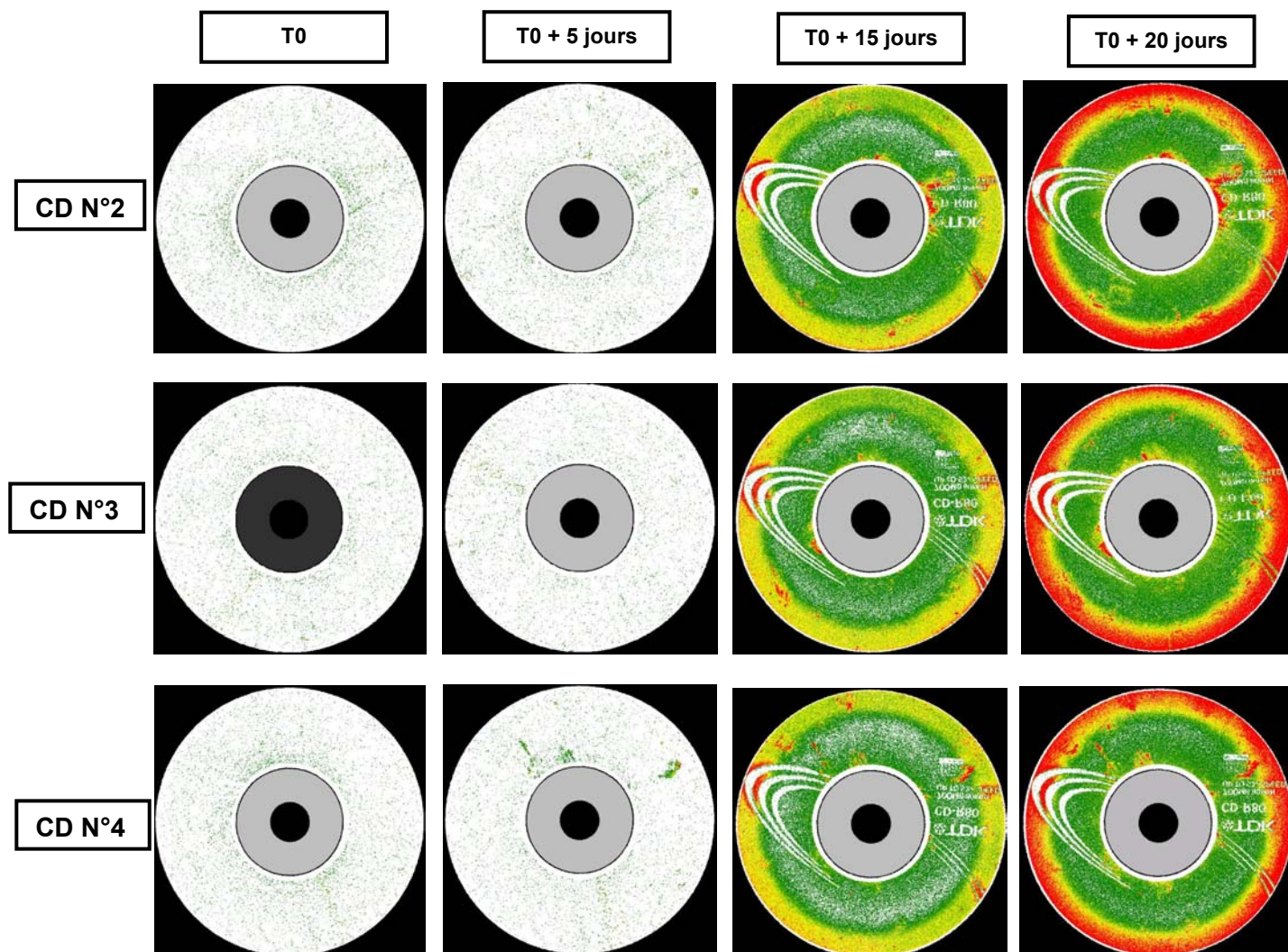


Analyse à la vitesse 1x

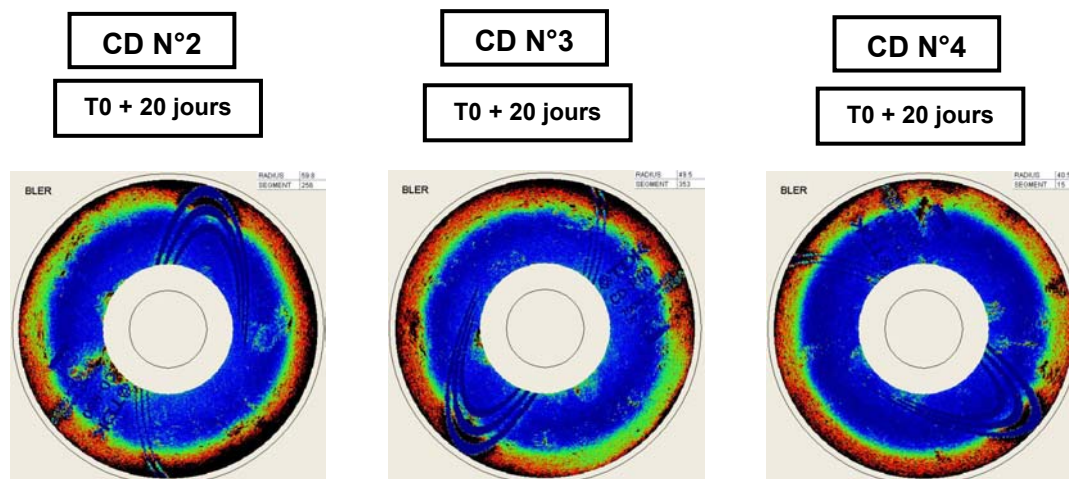


Référence N° 2-A – Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x

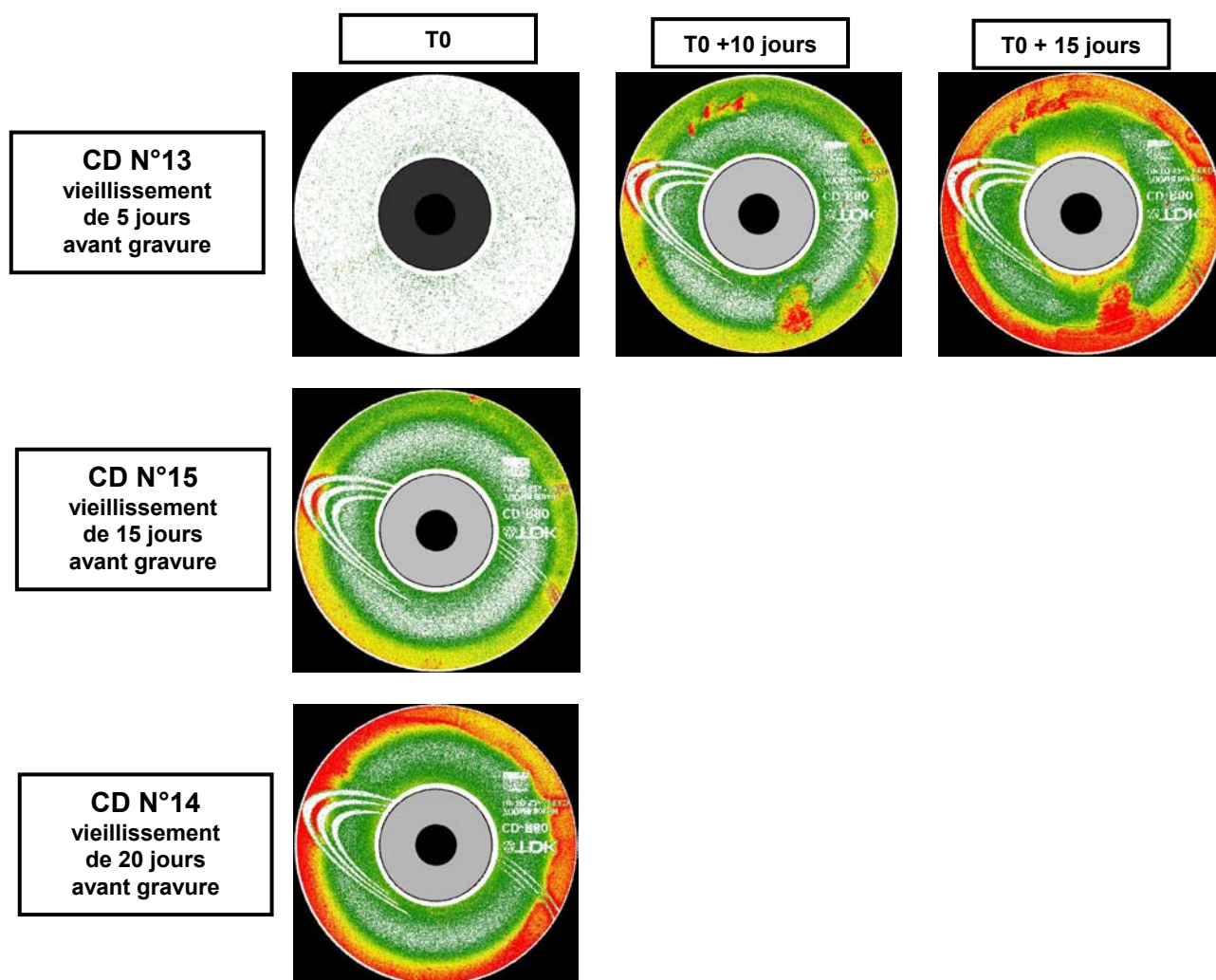


Analyse à la vitesse 1x

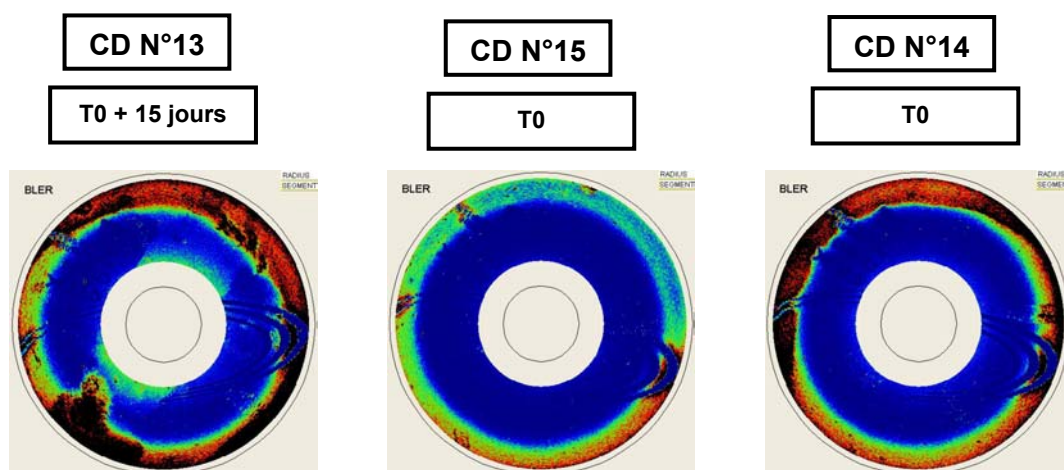


Référence N° 2-A – Disques vieilliss avant gravure

Analyse à la vitesse 24x

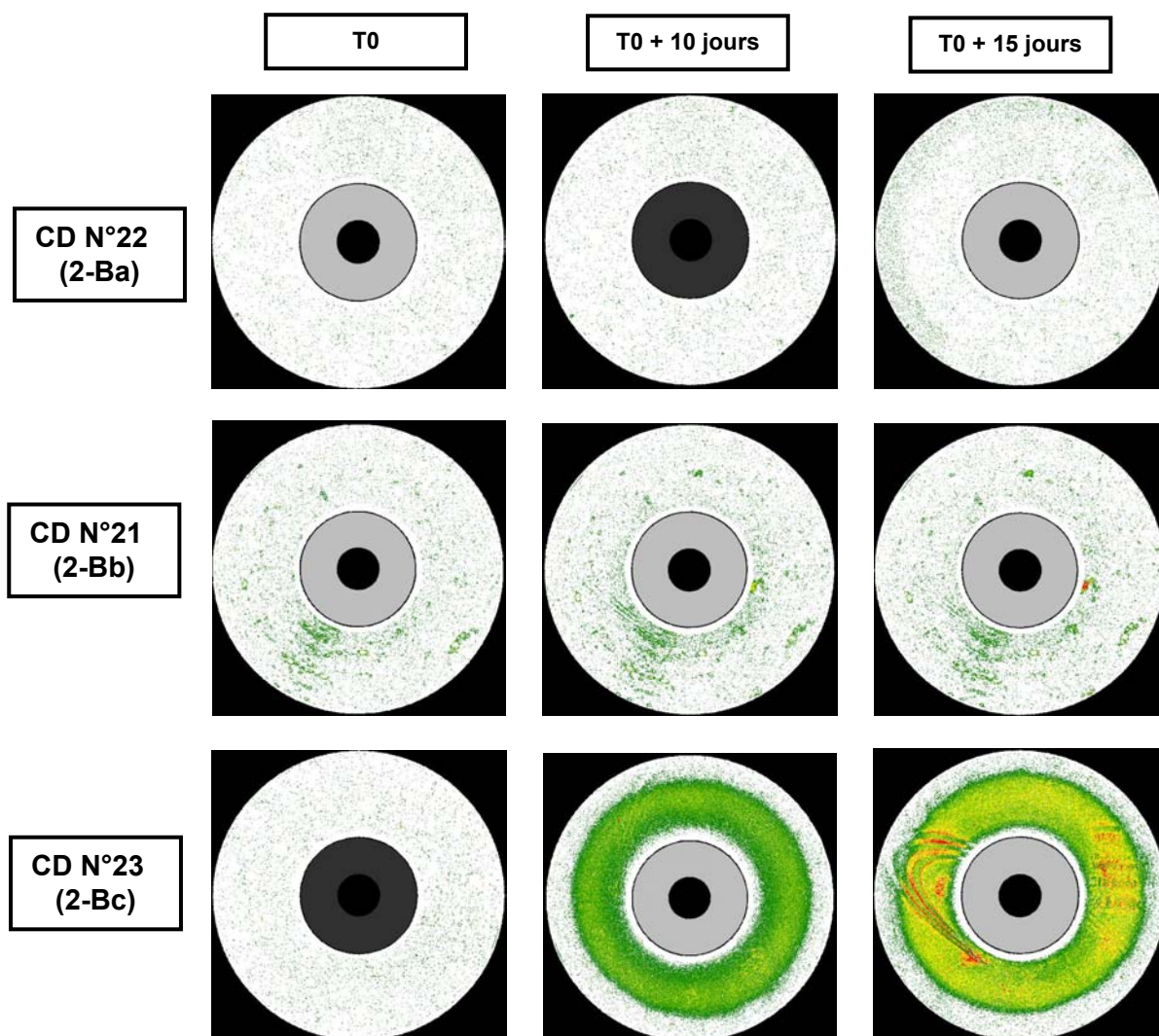


Analyse à la vitesse 1x

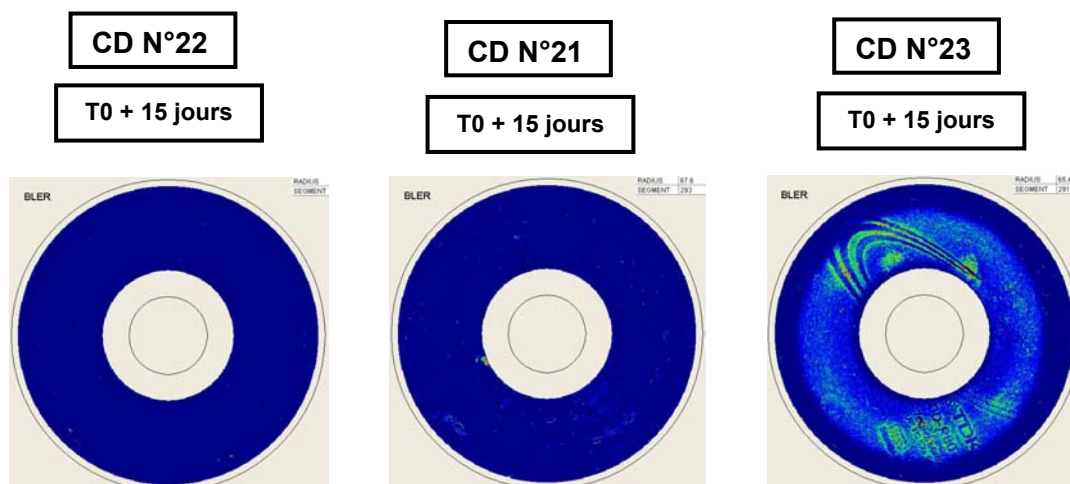


Référence N° 2-B – Disques gravés avant vieillissement

Analyse à la vitesse 24x



Analyse à la vitesse 1x



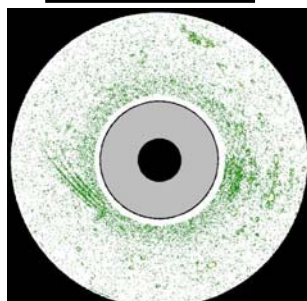
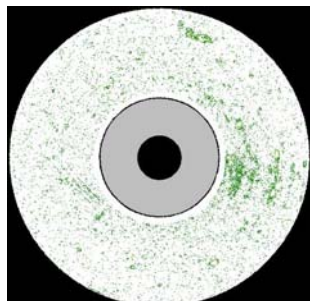
Référence N° 2-B – Disques vieillis avant gravure

Analyse à la vitesse 24x

T0

T0 +5 jours

**CD N°17
(2-Bb)**
vieillissement
de 10 jours
avant gravure



**CD N°18
(2-Bc)**
vieillissement
de 10 jours
avant gravure



**CD N°19
(2-Bc)**
vieillissement
de 15 jours
avant gravure



Analyse à la vitesse 1x

CD N°17

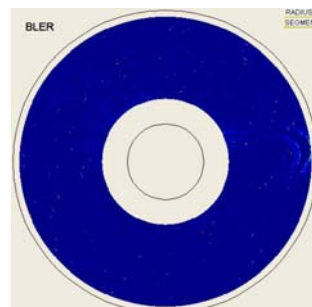
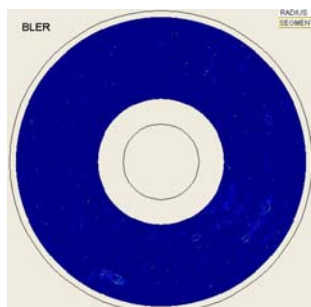
CD N°18

CD N°19

T0 + 5 jours

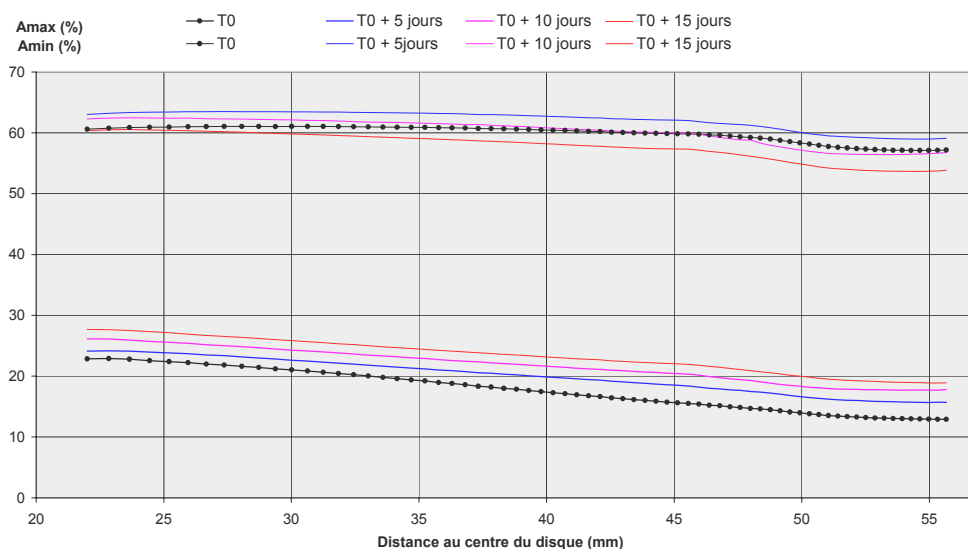
T0

T0

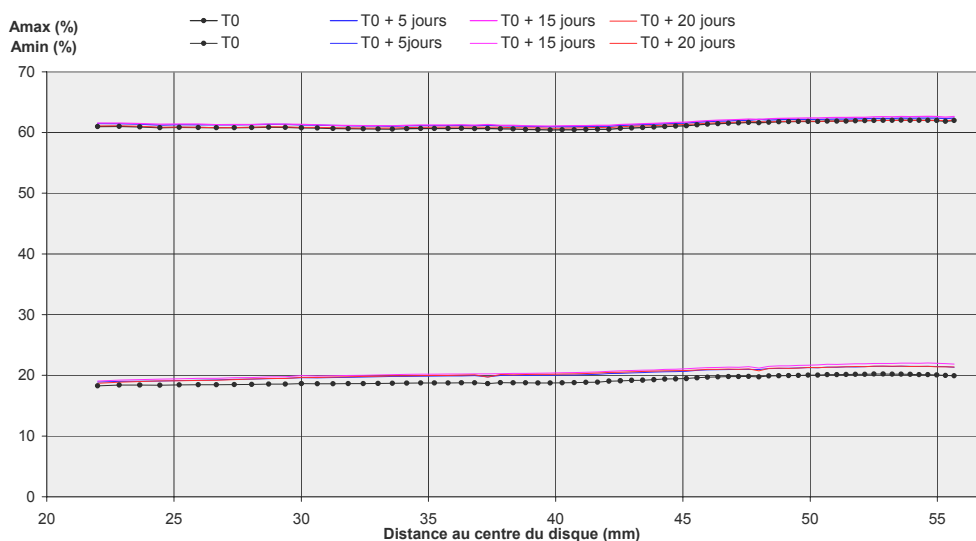


ANNEXE 4 – NIVEAUX DE REFLEXIVITE DES LANDS 11T (A_{MAX}) ET DES PITS 11T (A_{MIN})

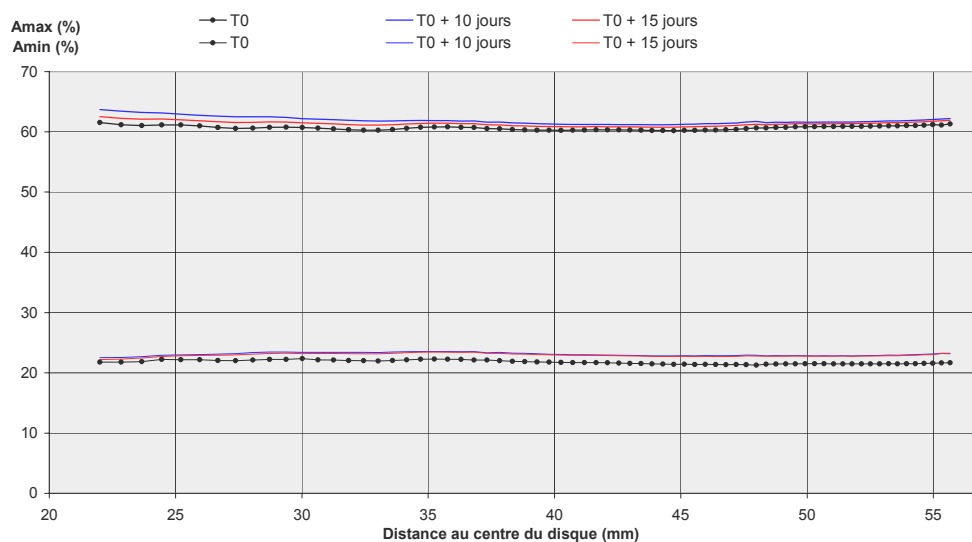
Référence N°1



Référence N°2-A

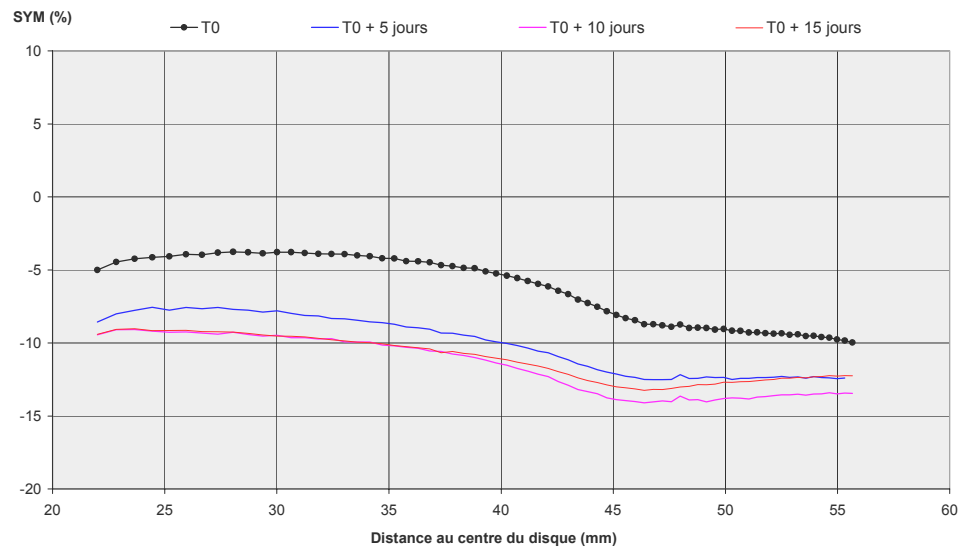


Référence N°2-B

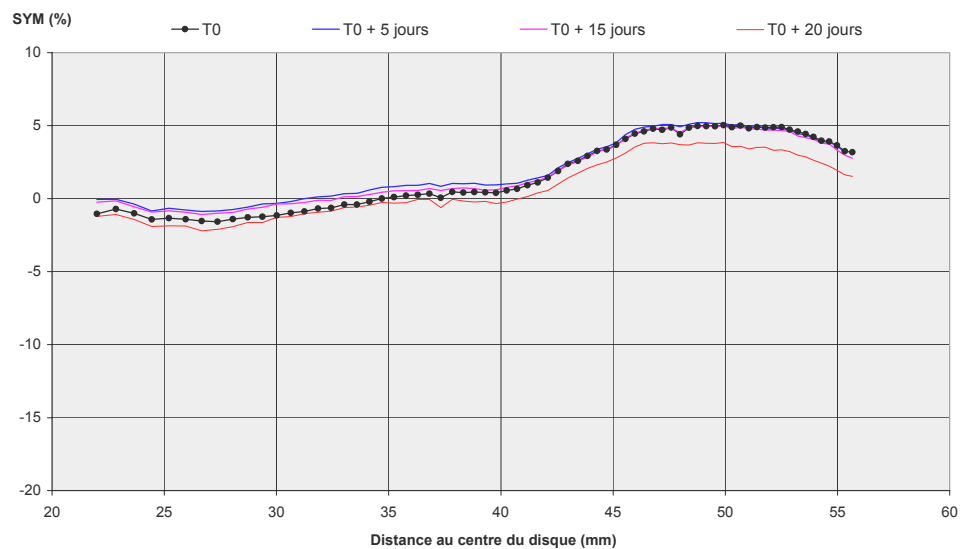


ANNEXE 5 – PARAMETRE SYM

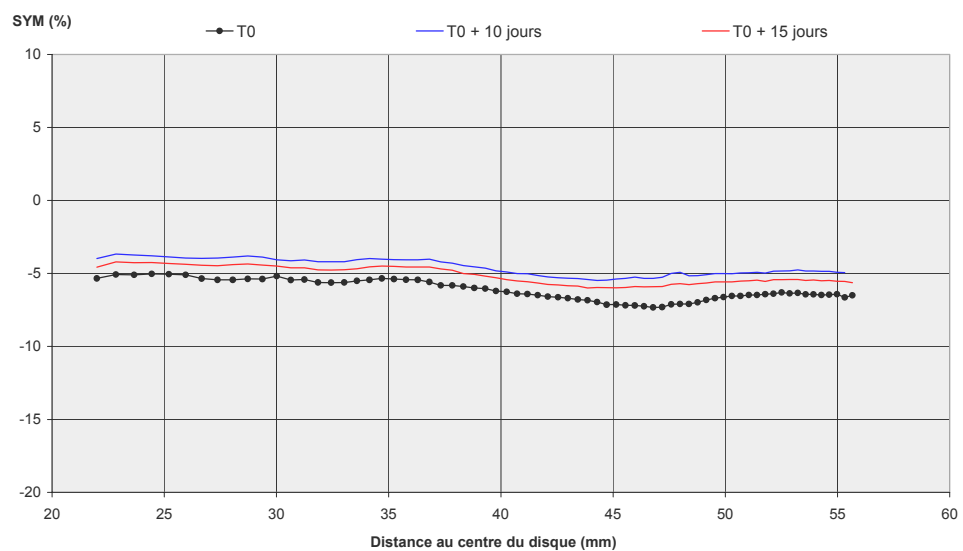
Référence N°1



Référence N°2-A



Référence N°2-B

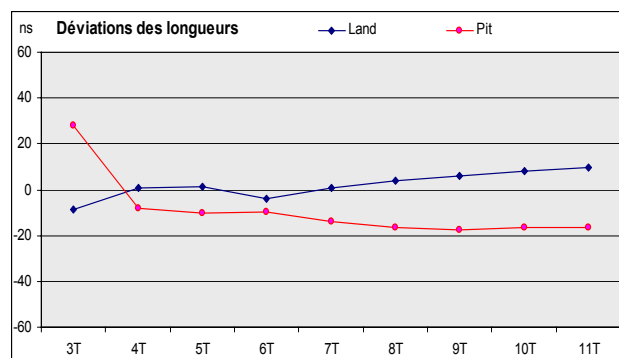
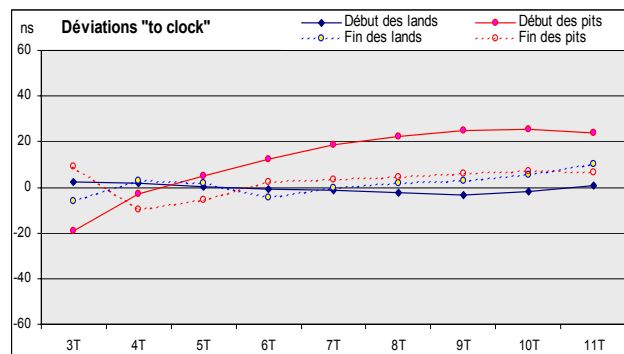


ANNEXE 6 – DEVIATIONS DES POSITIONS ET DES LONGUEURS DES PLAGES GRAVEES ET NON-GRAVEES

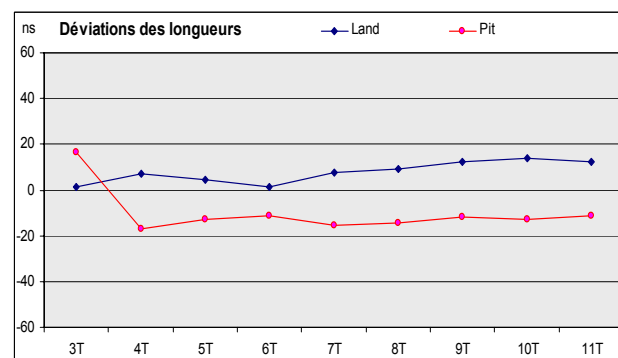
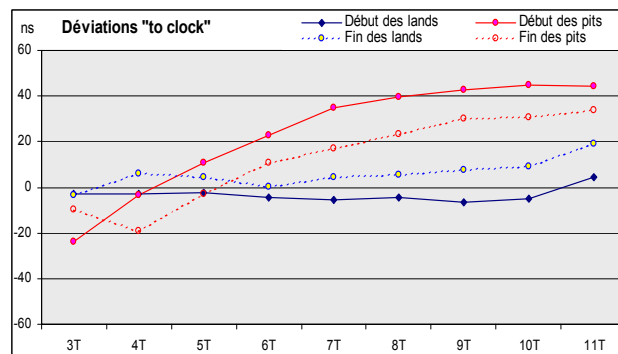
Référence N° 1 – Disques gravés avant vieillissement

Avant vieillissement (T0)

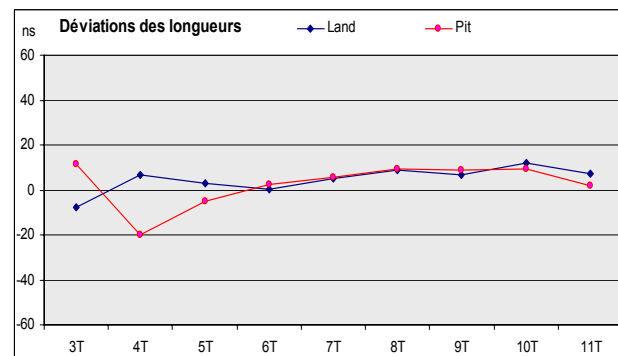
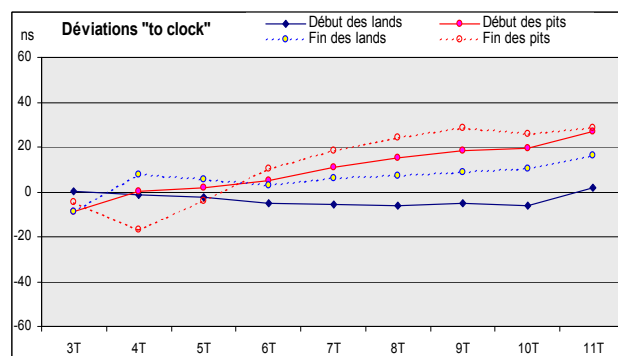
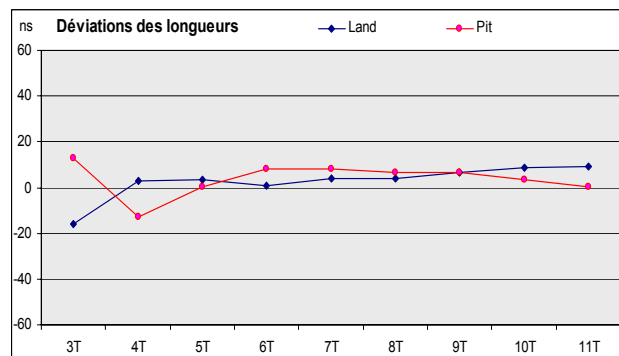
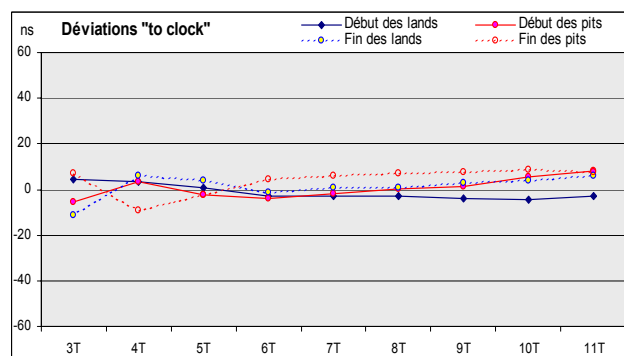
Début du disque (0 min)



Après vieillissement (T0 + 15jours)



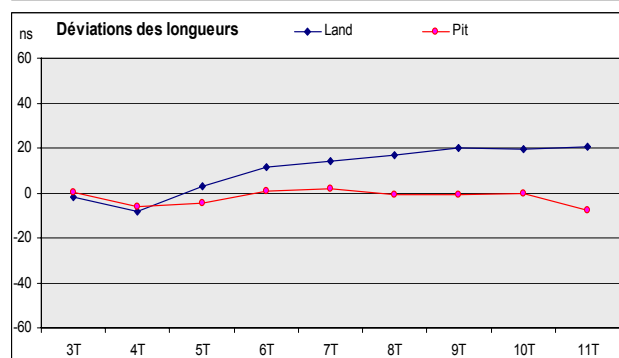
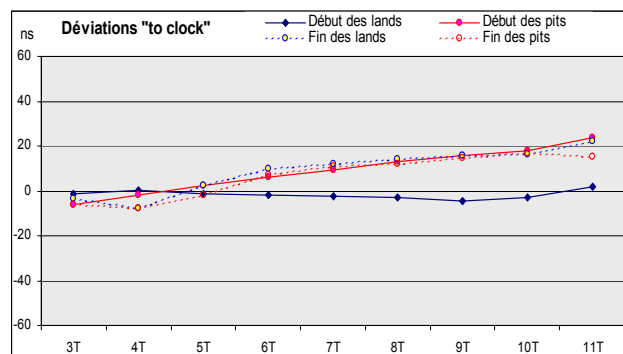
Fin du disque (60 min)



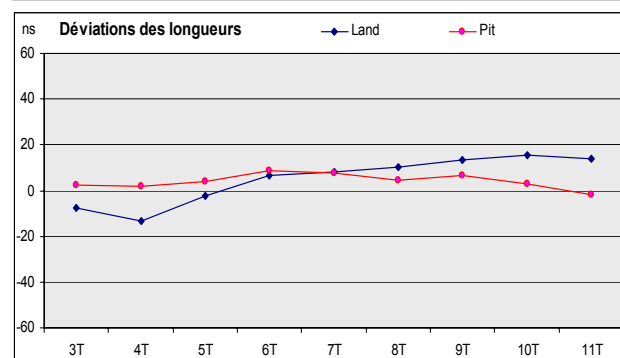
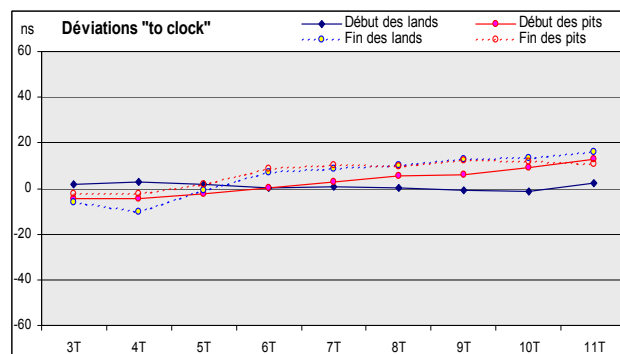
Référence N° 2-A – Disques gravés avant vieillissement

Avant vieillissement (T0)

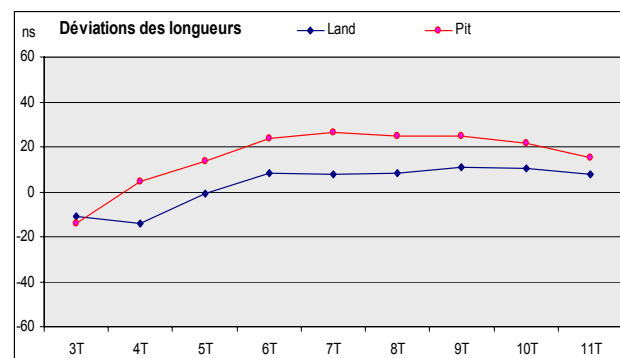
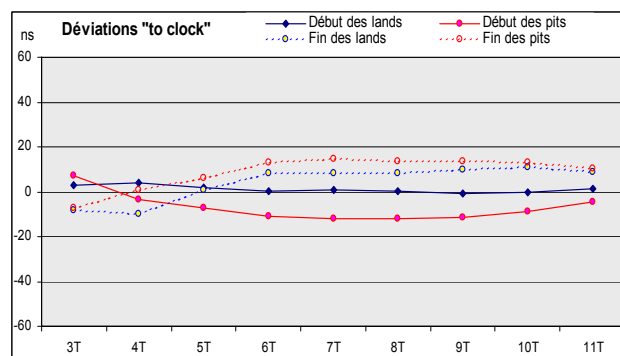
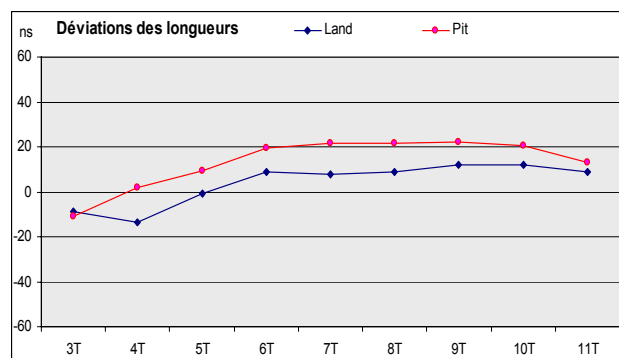
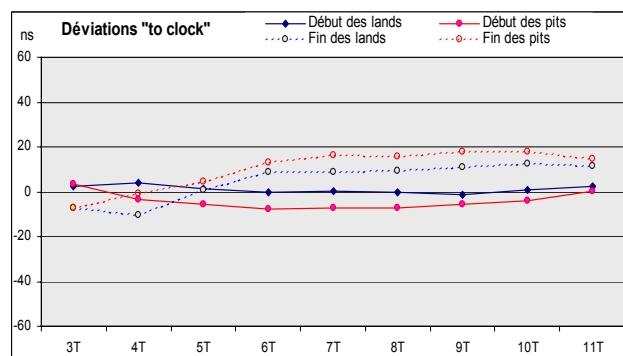
Début du disque (0 min)



Après vieillissement (T0 + 20jours)



Fin du disque (60 min)

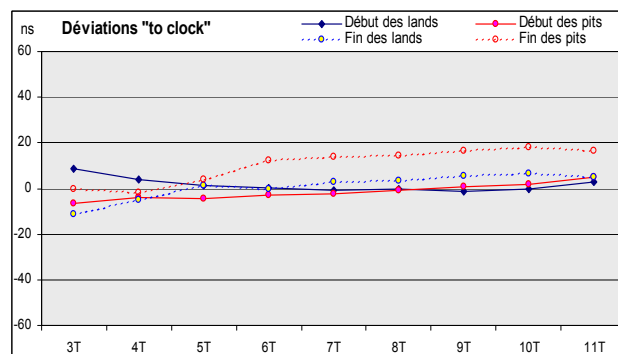
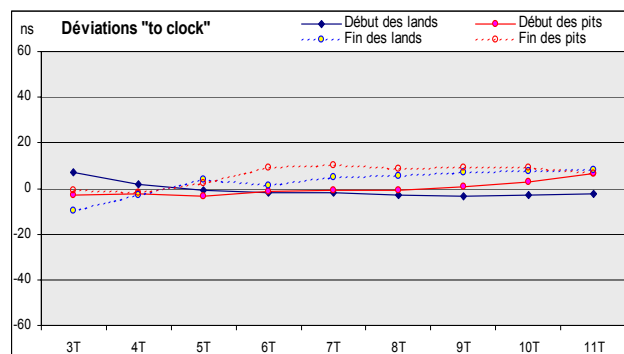


Référence N° 2-B – Disques gravés avant vieillissement

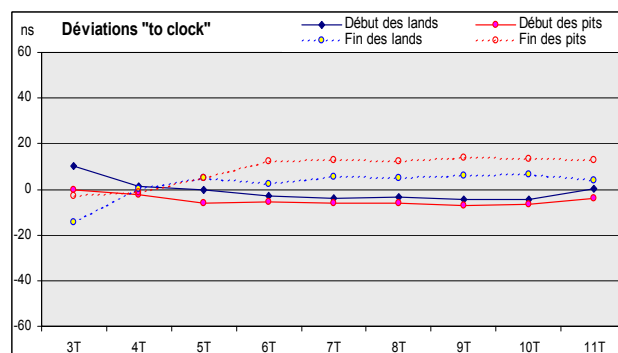
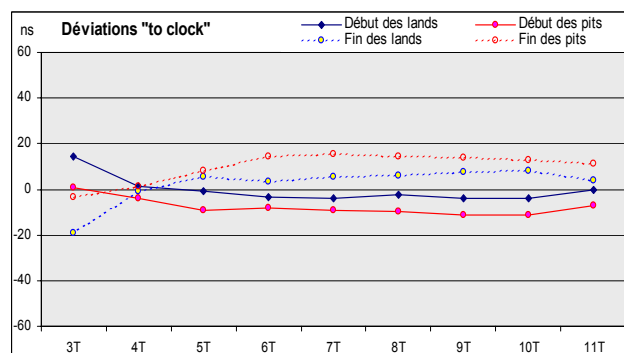
Avant vieillissement (T0)

Après vieillissement (T0 + 20jours)

Début du disque (0 min)



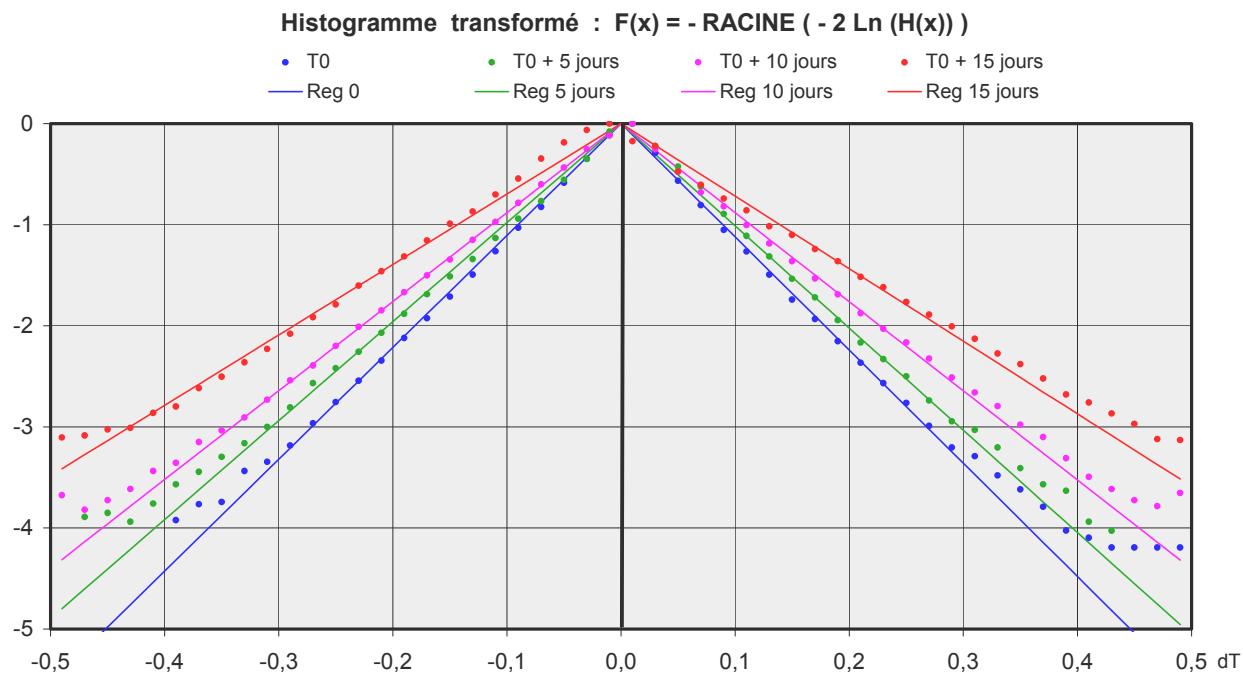
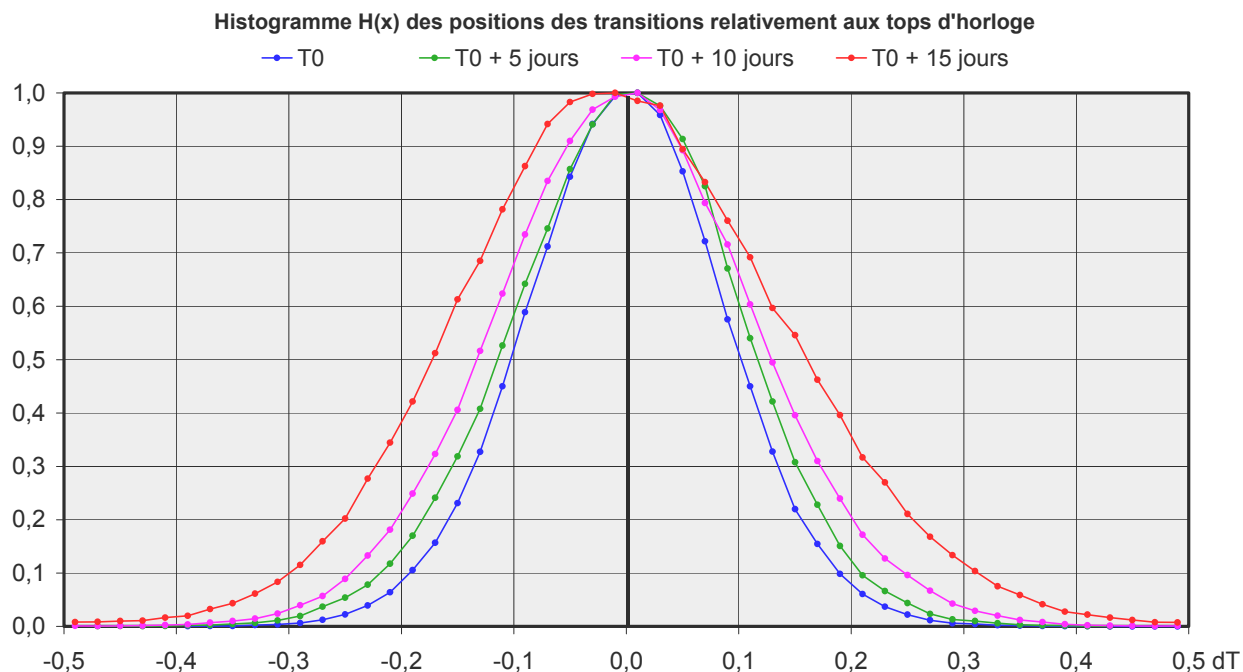
Fin du disque (60 min)



ANNEXE 7 – HISTOGRAMMES DES POSITIONS DES TRANSITIONS

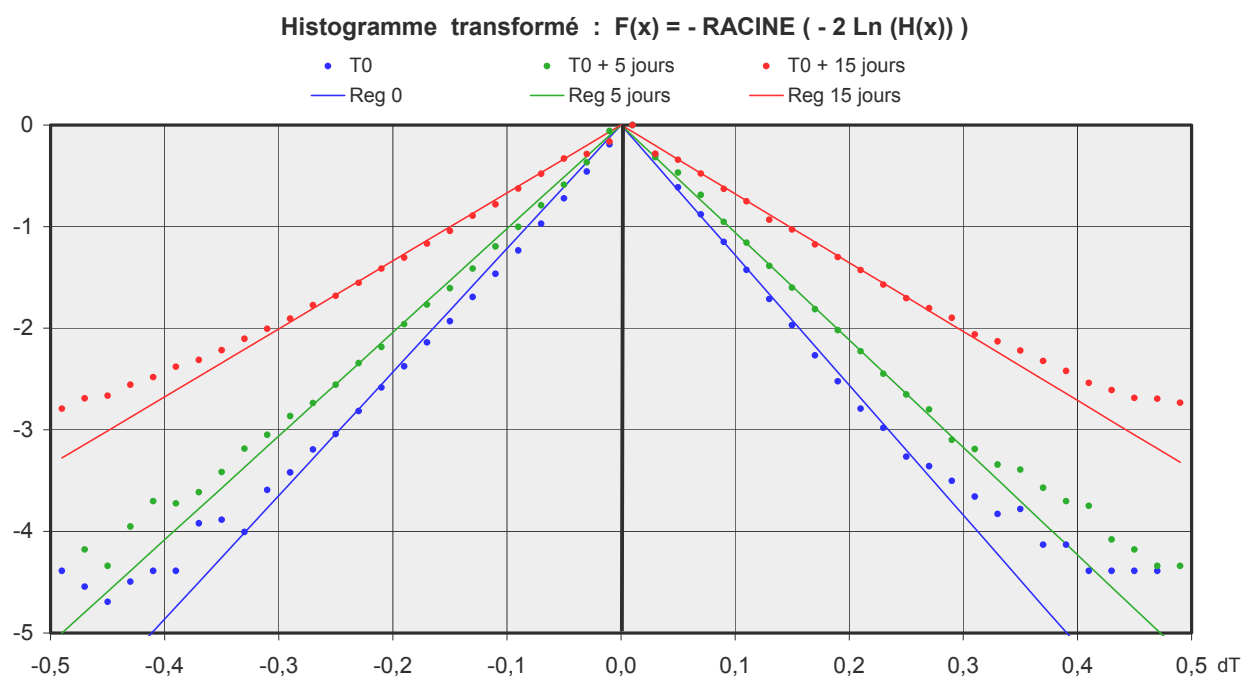
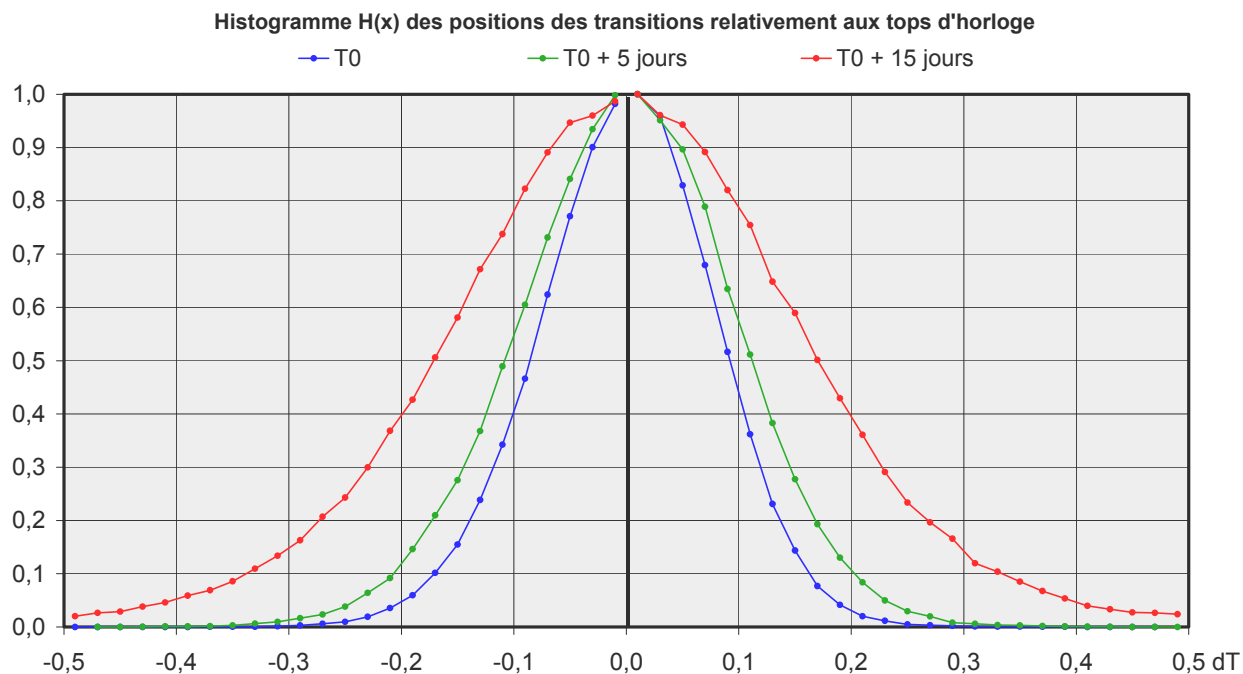
Référence N° 1 – Disques gravés avant vieillissement

Mesures en début de disque



Référence N° 1 – Disques gravés avant vieillissement

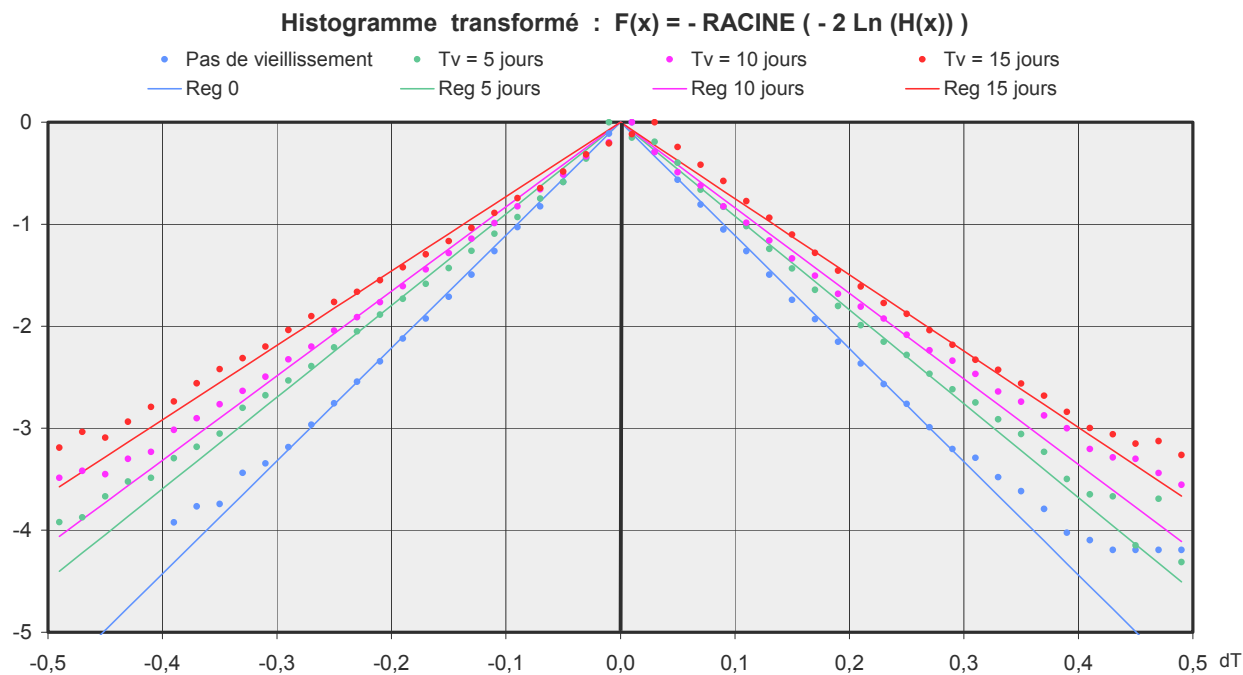
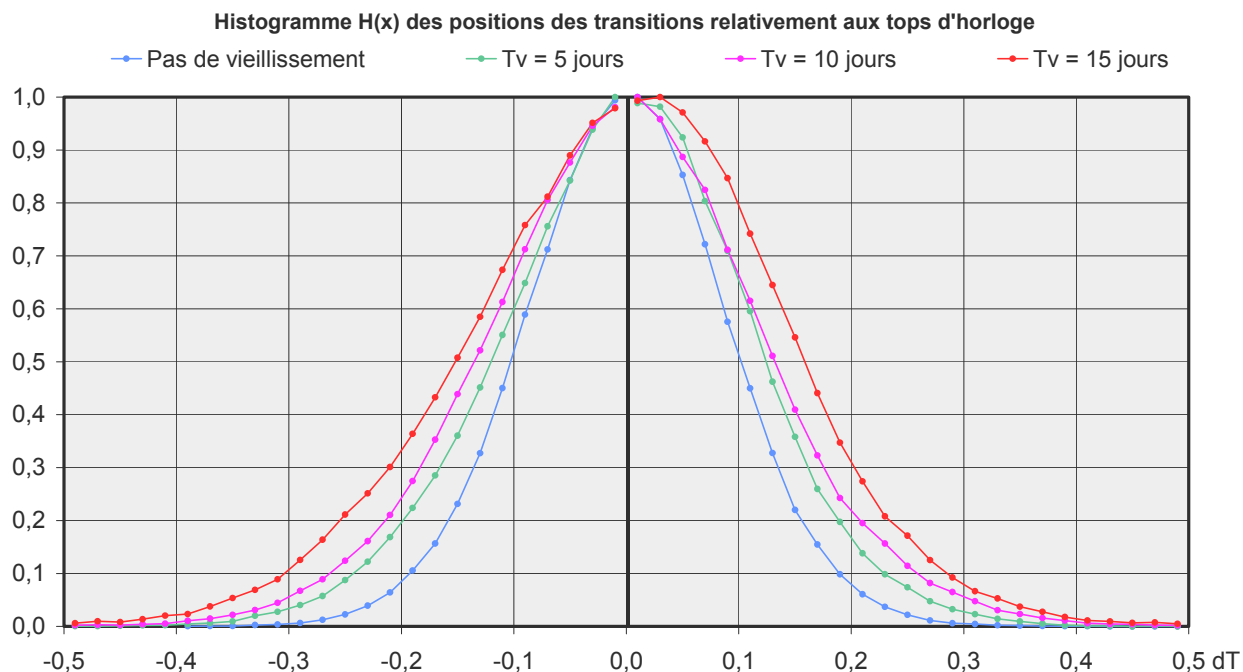
Mesures en fin de disque (60 min)



Référence N° 1 – Disques vieilliss sur une durée Tv avant gravure

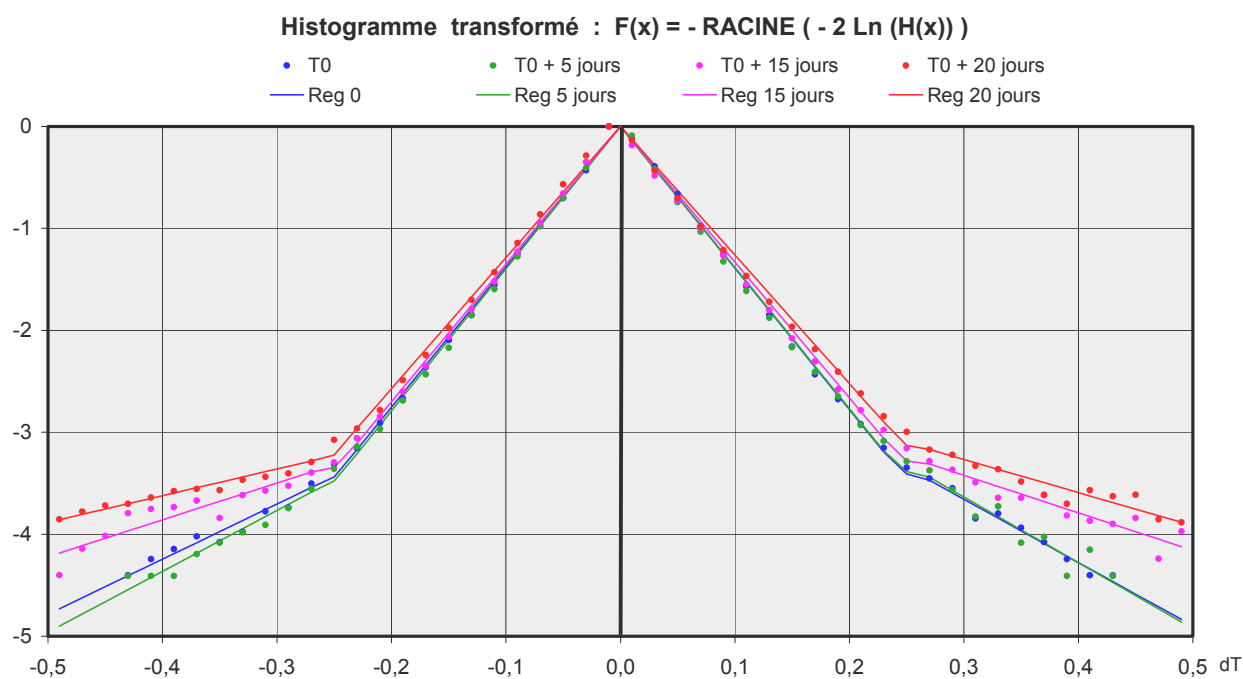
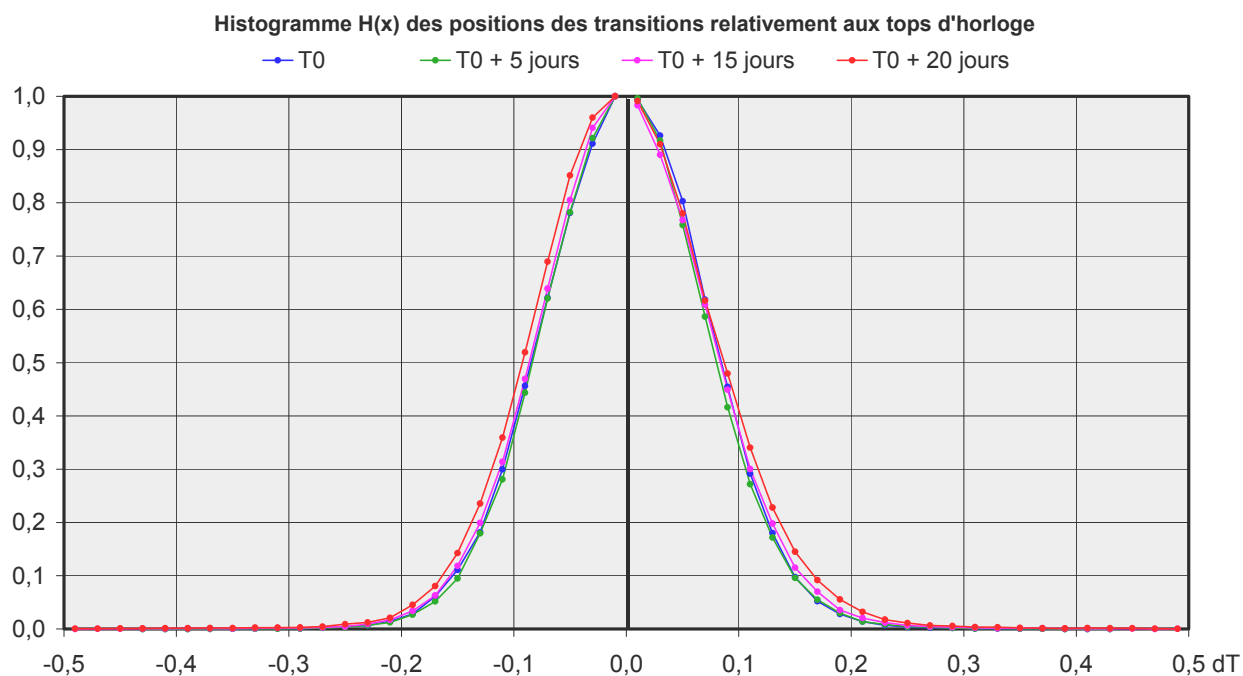
Pas de vieillissement après gravure

Mesures en début de disque



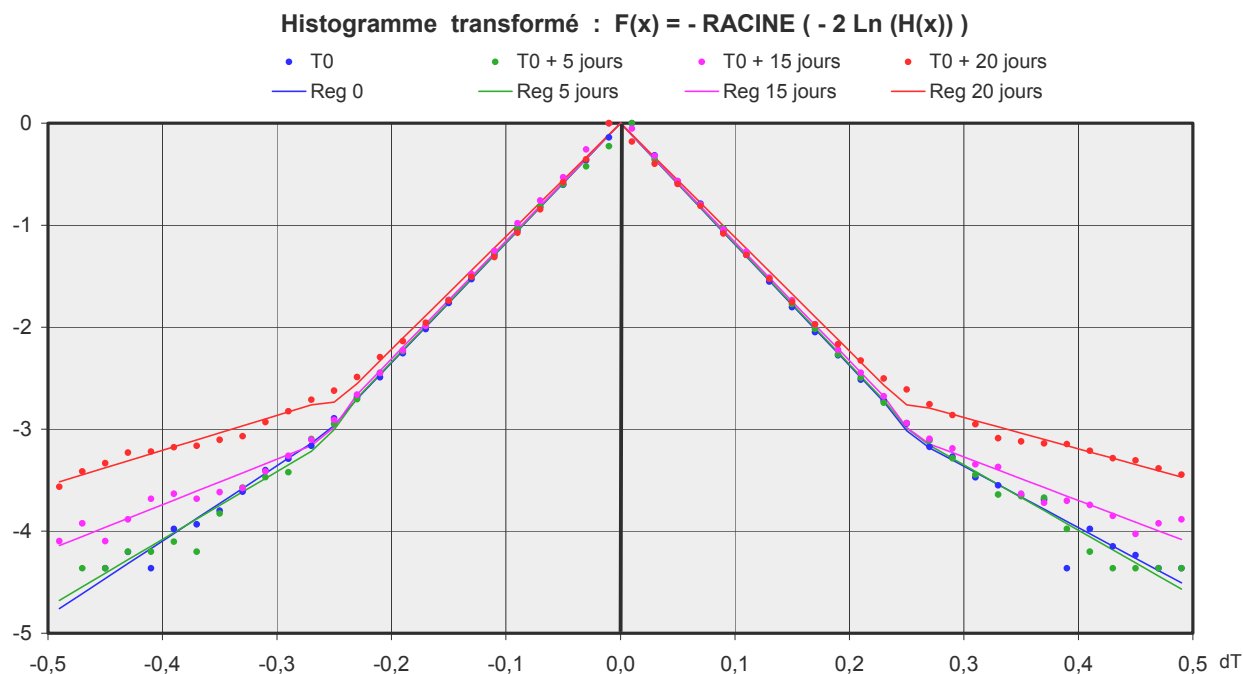
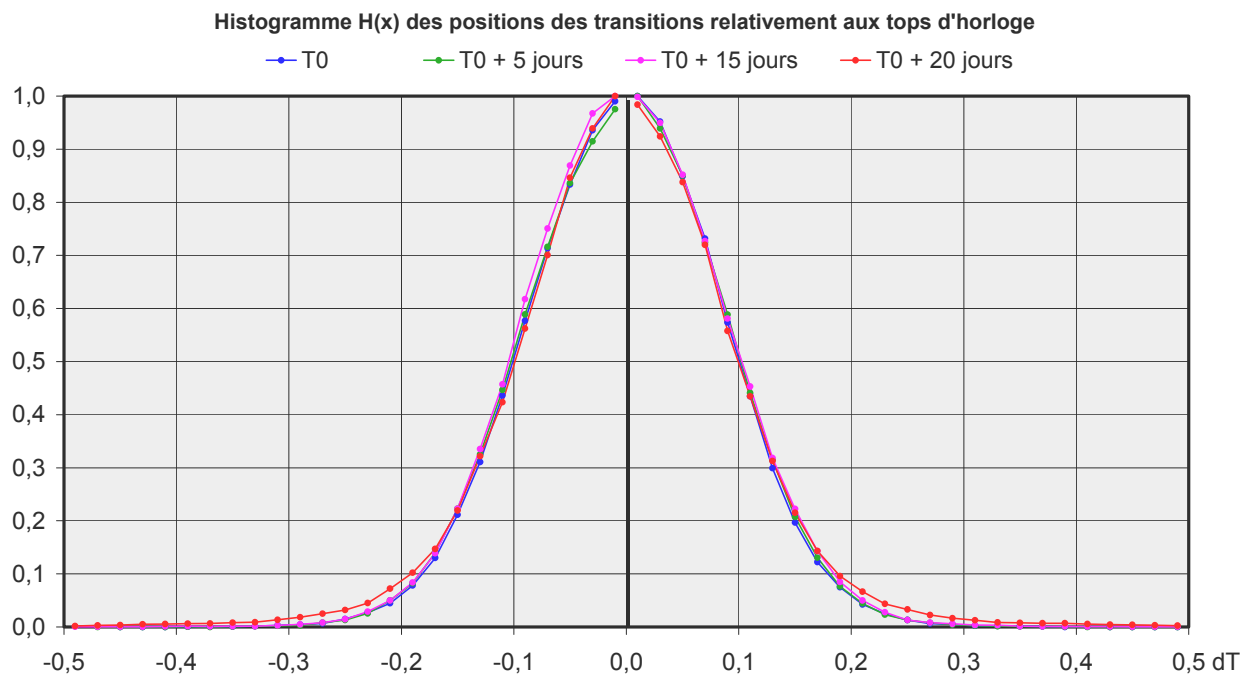
Référence N° 2-A – Disques gravés avant vieillissement

Mesures en début de disque



Référence N° 2-A – Disques gravés avant vieillissement

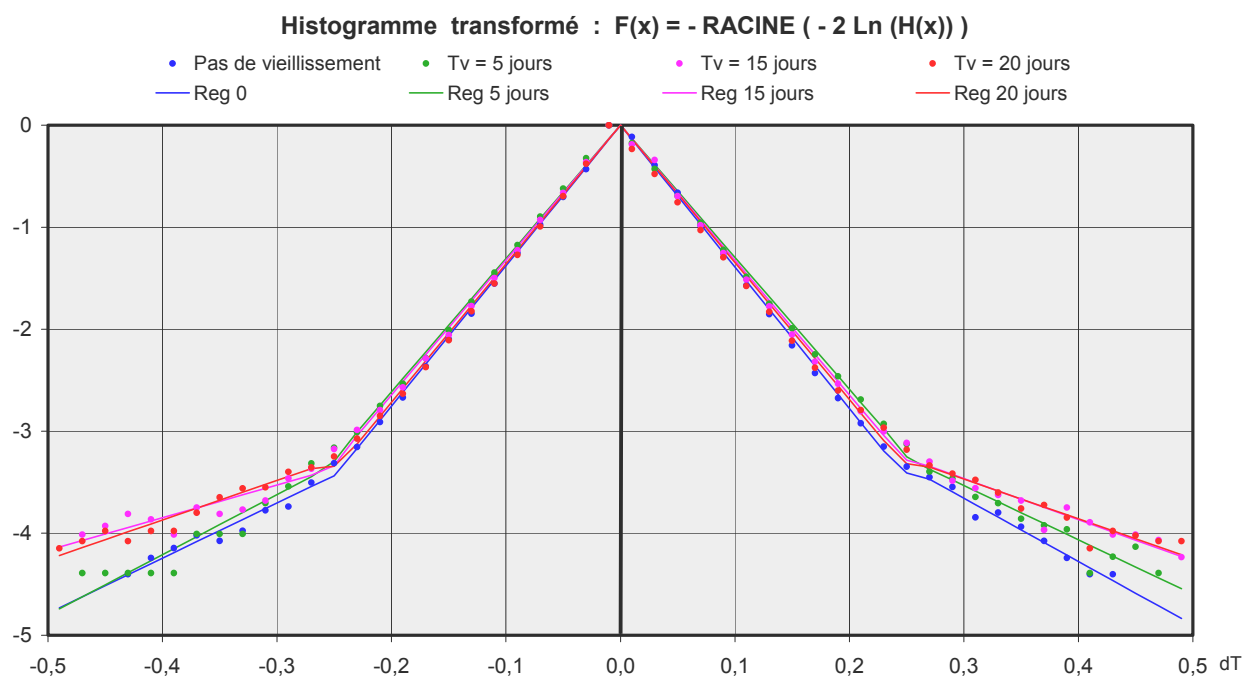
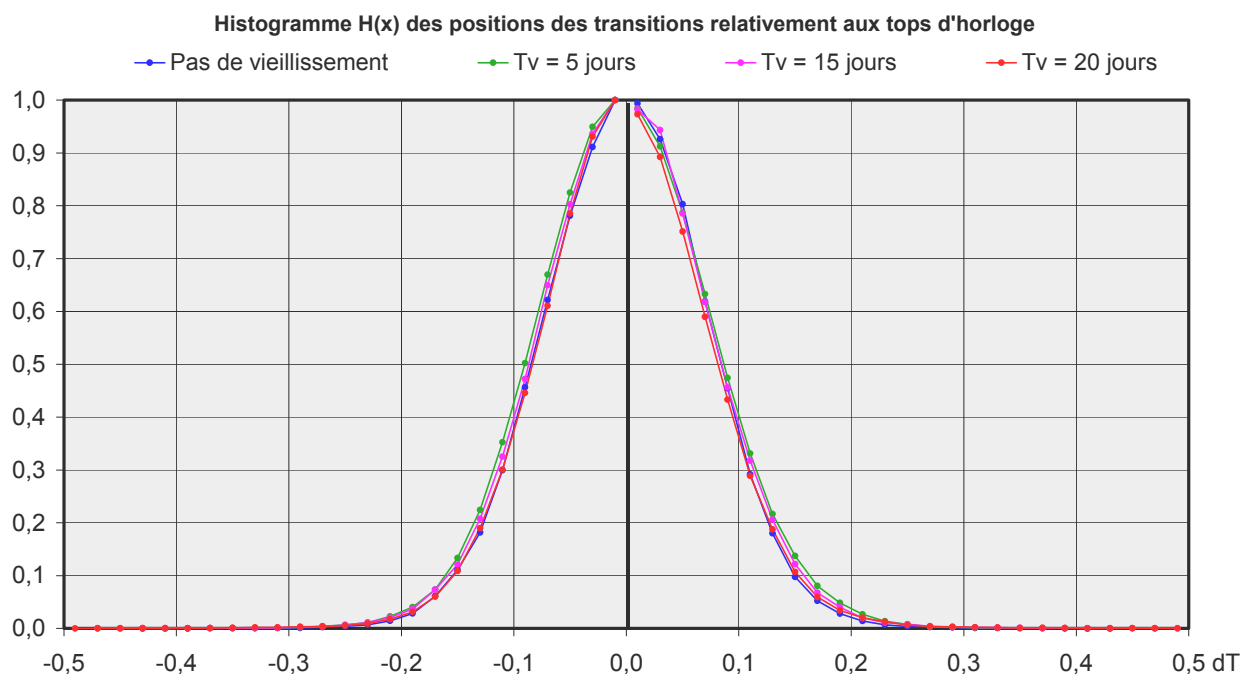
Mesures en fin de disque (70 min)



Référence N° 2-A – Disques vieillis sur une durée Tv avant gravure

Pas de vieillissement après gravure

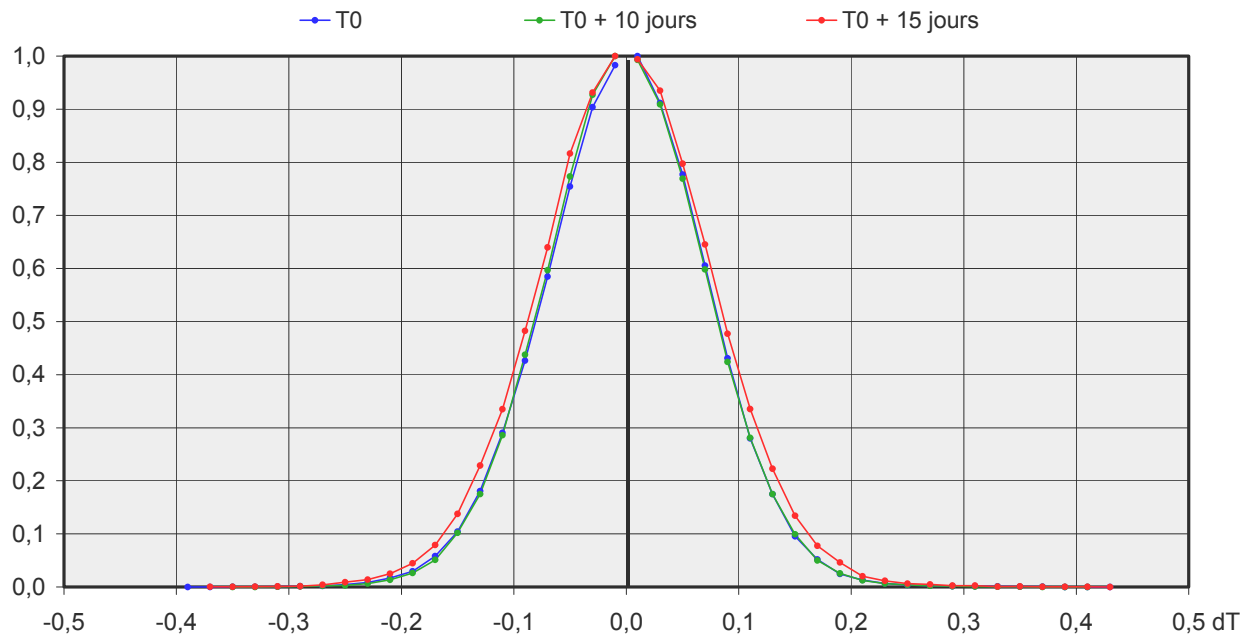
Mesures en début de disque



Référence N° 2-B (a) – Disques gravés avant vieillissement

Mesures en début de disque

Histogramme H(x) des positions des transitions relativement aux tops d'horloge



Histogramme transformé : $F(x) = -\text{RACINE}(-2 \ln(H(x)))$

