



HAL
open science

Evaluation des risques liés à l'exposition de phototypes historiques et uniques détenus dans les collections du musée Nicéphore Niépce : les oeuvres de Louis Ducos du Hauron

Bertrand Lavédrine, Martine Gillet, Chantal Garnier, Françoise Viénot,
Elodie Mahler

► To cite this version:

Bertrand Lavédrine, Martine Gillet, Chantal Garnier, Françoise Viénot, Elodie Mahler. Evaluation des risques liés à l'exposition de phototypes historiques et uniques détenus dans les collections du musée Nicéphore Niépce : les oeuvres de Louis Ducos du Hauron. 2020. hal-02926103

HAL Id: hal-02926103

<https://hal.science/hal-02926103v1>

Preprint submitted on 31 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Centre de recherches sur la conservation des documents graphiques

CNRS

Ministère de la Culture et de la communication

Muséum National d'Histoire Naturelle

Rapport d'étude n°2 pour le musée Nicéphore Niépce :

Évaluation des risques liés à l'exposition de phototypes historiques et uniques détenus dans les collections du musée Nicéphore Niépce : les œuvres de Louis Ducos du Hauron.

Bertrand Lavédrine, directeur du CRCDG

Martine Gillet, ingénieur CNRS

Chantal Garnier, assistante-ingénieur ministère de la Culture

Françoise Viénot, professeur MNHN

Élodie Mahler, ingénieur

Paris, 2005

Résumé

Ce travail a pour objectif d'établir les conditions d'exposition muséale les mieux adaptées aux tirages couleurs de Louis Ducos du Hauron tant du point de vue de la qualité de l'éclairage que des risques associés. Une étude précédente avait permis de constater la fragilité de fac-similés réalisés selon les indications de Louis Ducos du Hauron. Les possibilités offertes en matière d'éclairage avaient été étudiées et nous nous étions orientés vers l'utilisation de diodes électroluminescentes. La présente étude était destinée d'une part à confirmer, ou non, la fragilité à la lumière des œuvres originales et d'autre part de déterminer le type de diodes LED les mieux adaptées.

Les tests de stabilité sur les œuvres originales ont été effectués avec un dispositif spécifique qui a confirmé et quantifié la fragilité des images. La sensibilité à la lumière correspond, selon les couleurs, à celle des laines bleues normalisées BWS1, BWS2, BWS3, échantillons les plus sensibles. Ceci conduit à recommander de limiter l'exposition annuelle à environ 12000 lux.heures. Une telle exposition devrait permettre de montrer ces œuvres une centaine d'années avant de pouvoir discerner visuellement une altération. Du point de vue de l'optimisation des dispositifs d'éclairage des œuvres, nous avons le choix entre des diodes électroluminescentes blanches ou des clusters constitués de trois ou quatre diodes colorées. Du point de vue de la fidélité du rendu des couleurs nous avons montré qu'il faut proscrire l'usage des clusters à trois diodes rouge, verte et bleue, et des clusters à quatre diodes rouge, verte, bleue et ambre. Par contre, la lumière des diodes blanches à double phosphore Blanc froid, corrigées par l'ajout de diodes rouges pour atteindre la température de couleur 4000 K, donne un rendu des couleurs acceptable. Enfin, en associant un ensemble de diodes Blanc froid, rouge, verte, bleue, ambre, il est possible d'atteindre un rendu des couleurs aussi bon que celui d'un projecteur halogène tungstène à filtres dichroïques à une température de couleur de 4000 K. On peut avec les associations de diodes blanches à double phosphore, soit avec du rouge, soit avec du rouge, vert, bleu et ambre, obtenir de très bons, voire excellents rendus de couleurs pour une photographie donnée. L'intérêt des diodes électroluminescentes tient à l'absence totale d'émission dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge. La situation actuelle présente encore quelques inconvénients : une efficacité lumineuse modeste, la difficulté d'obtenir des éclairagements homogènes en couleur avec des clusters, une inhomogénéité des produits industriels, une instabilité de l'intensité lumineuse, inconvénients qui peuvent être préjudiciables à l'exposition. Mais les progrès de la technologie sont constants et les résultats en terme de rendu des couleurs sont encourageants pour le futur.

Sommaire

INTRODUCTION	4
ÉTUDE DE LA STABILITE A LA LUMIERE DE COUCHES GELATINEES COLOREES	5
ÉTUDE DES ŒUVRES ORIGINALES DE DUCOS DU HAURON	7
ÉTUDE D'UN DISPOSITIF D'ECLAIRAGE DES ŒUVRES	12
ANNEXES	29

Introduction

Le rapport présenté a pour vocation d'aider le musée Niépce à définir une politique d'exposition des œuvres originales en analysant les risques associés à une exposition permanente des photographies anciennes, en particulier des photographies de Louis Ducos du Hauron qui sont les tout premiers spécimens de tirages photographiques en couleurs jamais faits. Cette étude est réalisée en plusieurs étapes, le premier volet a permis de reconstituer des échantillons destinés à l'expérimentation au laboratoire en utilisant des recettes anciennes et d'analyser les différentes possibilités d'éclairage. D'autre part, afin de préparer la présente étude, un appareillage destiné à évaluer, in situ, de façon non destructive ou micro-destructive, et sans prélèvement, la fragilité des œuvres à la lumière a été construit. Ce dispositif, conforme à un modèle développé par nos collègues américains, consiste à vieillir prématurément à la lumière une micro-surface de l'œuvre (moins d'un millimètre carré). Pour cela on illumine à l'aide d'une fibre optique cette surface et on mesure en même temps la réaction du colorant ou des matériaux à l'aide d'un micro-spectrophotomètre. Ce prototype a été utilisé pour évaluer le comportement de photographies ou de micro-fragments d'œuvres originales. Des essais d'identification de pigments originaux ont été réalisés afin de bien vérifier l'adéquation avec les recettes trouvées dans la littérature.

Nous avons également poursuivi la recherche sur les dispositifs d'éclairage, en particulier les diodes électroluminescentes à spectre étroit afin de les optimiser en vue de leur utilisation pour l'éclairage des œuvres de Louis Ducos du Hauron. Pour cela nous avons analysé les spectres de réflectance des œuvres originales conservées au musée.

Étude de la stabilité à la lumière de couches gélatinées colorées

Nos travaux précédents sur des couches gélatinées colorées fabriquées au CRCDG ont mis en évidence la grande fragilité à la lumière de la couche bleue à base de bleu de Prusse et, dans une moindre mesure, celle de la couche carmin (les résultats ont été donnés dans le rapport d'étude n° 1). Il a également été observé que la couche bleue s'affadit plus rapidement en absence d'oxygène, ce qui a permis d'écarter la possibilité d'exposer les œuvres en anoxie, même si une régénération partielle du colorant à l'obscurité a pu être constatée.

Des essais complémentaires ont été menés afin d'étudier la cinétique de dégradation à la lumière des couches gélatinées colorées. Des échantillons de gélatines colorées bleues, rouges et jaunes, fabriqués au CRCDG suivant les procédés historiques de Louis Ducos du Hauron (1870 et 1875) ont été exposés à une source lumineuse intense de 1200 watts/cm² (200 Klux) dans une enceinte climatique régulée à 25 °C et 50 % d'humidité relative. Leur dégradation à la lumière en fonction du temps a été suivie à l'aide des mesures colorimétriques (système CIE L*a*b*). Les courbes des différences de couleurs et de luminosité, des différences chromatiques ainsi que des variations de densités en fonction du temps d'exposition à la lumière sont tracées pour chacune des couches colorées (annexe 1) et représentées sur un même graphique en fonction de la recette de fabrication utilisée (1870 ou 1875). Malgré les variations notables du comportement à la lumière des échantillons d'une même couche de gélatine colorée, il est possible de dégager des tendances nous renseignant sur la stabilité relative des colorants en fonction de leur nature et du procédé de fabrication des gélatines bleues, rouges et jaunes.

- Couches bleues

La grande fragilité à la lumière de la couche bleue à base de bleu de Prusse a été confirmée, les couches jaune de chrome et rouge carmin ou alizarine étant plus résistantes. La gélatine colorée avec le bleu de Prusse, préparée selon la recette 1870 est la plus sensible à la lumière et sa dégradation est très rapide lors des premières heures d'exposition (avant 8 heures), celle préparée selon la recette de 1875 s'altérant beaucoup moins vite.

- Couches jaunes

Les gélatines colorées avec le jaune de chrome sont légèrement moins stables quand elles ont été préparées selon la recette de 1870.

- Couches rouges

Pour les couches gélatinées avec le rouge carmin, on note peu d'écart de comportement à la lumière entre les deux recettes. Si l'on en juge d'après l'écart de couleur au cours de l'exposition à la lumière, l'utilisation de l'alizarine semble apporter une très légère amélioration de la stabilité photochimique par rapport au rouge carmin. Rappelons que Louis Ducos du Hauron a remplacé le carmin par la laque de garance dont le composé principal est l'alizarine pour des raisons de « merveilleuse endurance soit au soleil, soit à la lumière électrique »¹.

La recette utilisée pour préparer les couches de gélatine colorée a une grande influence sur la stabilité à la lumière des pigments utilisés. Il était donc nécessaire de confronter ces résultats avec ceux obtenus sur des œuvres originales afin d'obtenir une évaluation exacte de leur sensibilité à une exposition lumineuse.

¹ Louis et Alcide Ducos du Hauron, *La triplix photographique des couleurs et l'imprimerie, système de photochromographie*, Paris : Gauthiers-Villars, 1897.

Étude des œuvres originales de Ducos du Hauron

Les essais ont été effectués sur quelques monochromes originaux prêtés par le musée Nicéphore Niépce. Il s'agit des six œuvres ou essais de Louis Ducos du Hauron référencés comme suit :

1 tirage positif monochrome bleu sur gélatine (feuilles) :	inv. 2002.60.2
1 gélatine bleue :	inv. 2002.65.29
1 gélatine bleue et jaunes :	inv. 2002.65.47.12
1 gélatine rouge (portrait) :	inv. 2002.65.50
1 gélatine jaune :	inv. 2002.65.61
1 gélatine rouge :	inv. 2002.65.255

De nombreux petits fragments de monochromes bleus, jaunes et rouges accompagnaient ces documents.

Dans un premier temps nous avons tenté d'identifier les pigments utilisés par Louis Ducos du Hauron. Nous avons ensuite évalué le comportement à la lumière de ces originaux.

- **Caractérisation des pigments**

Des analyses élémentaires à l'aide d'un microscope électronique à balayage équipé d'une sonde EDX ont été effectuées d'une part sur les gélatines colorées jaunes et bleues, fabriquées par nos soins selon les recettes de 1870 et 1875, et d'autre part sur de petits fragments de monochromes originaux jaunes et bleus non référencés. Les couches rouges n'ont pas été analysées car elles contiennent un pigment organique qui ne peut pas être caractérisé par cette technique. Les résultats sont rassemblés en annexe 2.

Tableau 1 : Résultats des analyses élémentaires de couches colorées et de monochromes originaux à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB-EDX)

Échantillons	Éléments identifiés (>5%)	Nature probable du pigment
Gélatine colorée avec du chromate de plomb , recette 1870	Cr, Pb	
Gélatine colorée avec du chromate de plomb , recette 1875	Cr, Pb	
Gélatine colorée avec du bleu de Prusse , recette 1870	S , K, Cr, Fe	
Gélatine colorée avec du bleu de Prusse , recette 1875	S , Ca Cr, Fe	
Fragment original jaune 1	K, Ca, Cr, Pb	Chromate de plomb
Fragment original jaune 2	Al, Si, K, Ca, Cr, Pb	Chromate de plomb
Fragment original bleu 1	S , Ca, Cr, Fe	Bleu de Prusse
Fragment original bleu 2	S , K, Ca, Cr, Fe	Bleu de Prusse
Fragment original bleu 3	S , Ca, Cr, Fe	Bleu de Prusse
Mica	Al, Si, K	

Nous avons retenu uniquement les éléments identifiés dont la teneur est supérieure à 5 %. Les gélatines colorées faites au laboratoire ont servi de référence et on a pu y caractériser certains pigments par la présence d'éléments caractéristiques comme le plomb (Pb) pour le chromate de plomb, le fer (Fe) et le soufre (S) pour le bleu de Prusse (tableau 1). Des compositions chimiques élémentaires identiques ont été trouvées sur les fragments originaux et on peut donc raisonnablement supposer qu'ils contiennent les mêmes pigments : le chromate de plomb pour les jaunes et le bleu de Prusse pour les bleus.

Des spectres de réflectance des monochromes originaux ont été enregistrés à l'aide d'un micro-spectrophotomètre et comparés à ceux des gélatines colorées de référence (annexe 3). Nous avons constaté des écarts notables entre les courbes des échantillons entre eux et également avec les spectres de référence. Nous n'avons pas d'explication certaine mais il est possible que la préparation et le mode de vieillissement des couches aient conduit à des caractéristiques spectrales différentes pour les couches. Ceci rend difficile la caractérisation du pigment par son spectre en réflectance.

• Évaluation de la stabilité à la lumière

Les tests de stabilité sur les œuvres originales ont nécessité l'acquisition et la mise au point du dispositif de micro-vieillessement à la lumière développé au Carnegie Mellon Research Institute (États-Unis) pour évaluer la sensibilité des objets sur une petite surface (1 mm²). Le suivi des modifications des matières colorées est effectué à l'aide d'un micro-spectrophotomètre permettant d'enregistrer les modifications de couleurs en fonction du temps d'exposition. L'irradiation est arrêtée avant que l'écart de couleur ne dépasse la valeur de 5 (CIE L*a*b*), pour laquelle la durée d'illumination est notée.

La stabilité à la lumière des matériaux testés est évaluée par rapport à la gamme étalon de laine bleue dont les trois premières plages ont été soumises au même test. Ces échantillons de laine bleue sont normalisés. Les gammes de laine bleue sont constituées de 8 échantillons de laine teintée avec des colorants bleus dont la stabilité à la lumière est croissante (norme NF G 07-012-1:1988). Ces échantillons de laine bleue initialement introduite pour les besoins de l'industrie textile ont été adoptés par le milieu de la conservation, ce qui a conduit à utiliser l'échelle de sensibilité des laines pour définir la sensibilité des biens culturels.

La figure 1 est une illustration du comportement à la lumière de ces laines bleues :

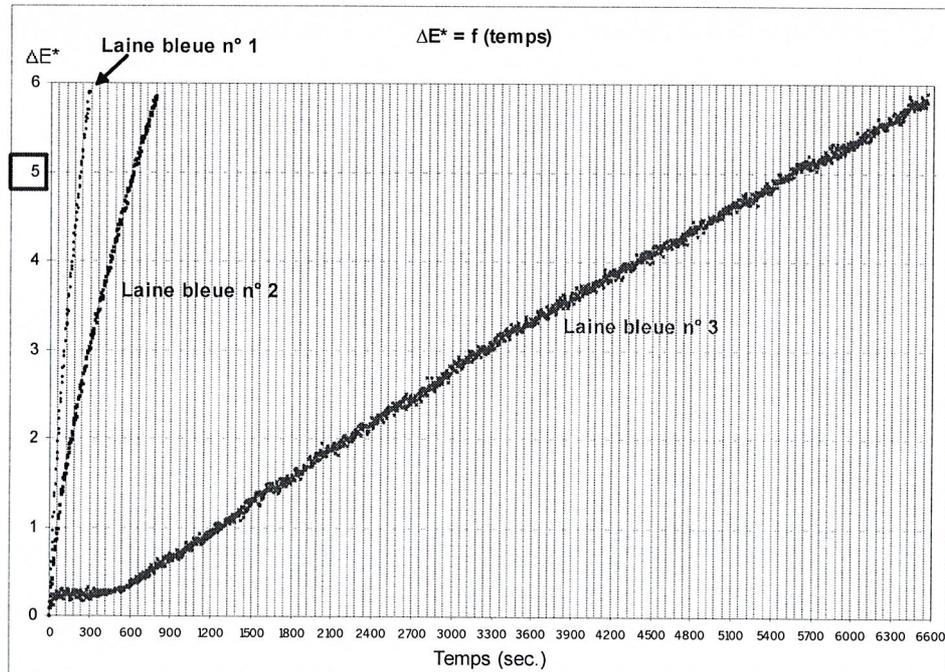


Figure 1 : Variation de l'écart de couleurs des 3 plages de laine bleue en fonction du temps d'exposition à la lumière

Les durées moyennes d'exposition à la lumière de chaque plage correspondant à un écart de couleurs de 5 sont données dans le tableau ci-après :

Laines bleues	Durée d'exposition à la lumière ($DE^* = 5$)
BWS 1	3 min 45 s
BWS 2	9 min 53 s
BWS 3	1 h 35 min

Le dispositif de micro-vieillessement à la lumière a été testé sur les gélamines colorées que nous avons fabriquées afin de valider la procédure (annexe 4).

Les paramètres suivants ont été étudiés : le procédé de fabrication, l'homogénéité et l'épaisseur des couches colorées, la concentration en pigment, la reproductibilité de la méthode. Malgré des fluctuations, il est néanmoins possible d'évaluer le comportement à la lumière des matières colorées par rapport à la gamme de laine bleue: pour cela, nous avons attribué arbitrairement à la première plage de laine bleue (BWS 1), la moins stable, un facteur de stabilité égal à 1, correspondant au temps d'exposition à la lumière provoquant un écart de couleurs (ΔE^*) de 5. Pour les autres plages, 2 (BWS 2) et 3 (BWS 3), et pour toutes les matières colorées testées, la stabilité est toujours évaluée par rapport à cette première plage. Ainsi, la plage BWS 2 est 2,6 fois plus stable et la plage BWS 3 est 25 fois plus stable que BWS 1. Une échelle de stabilité a donc été tracée, permettant d'établir la stabilité relative des gélamines colorées par rapport à cette gamme étalon de laine bleue (figure 2).

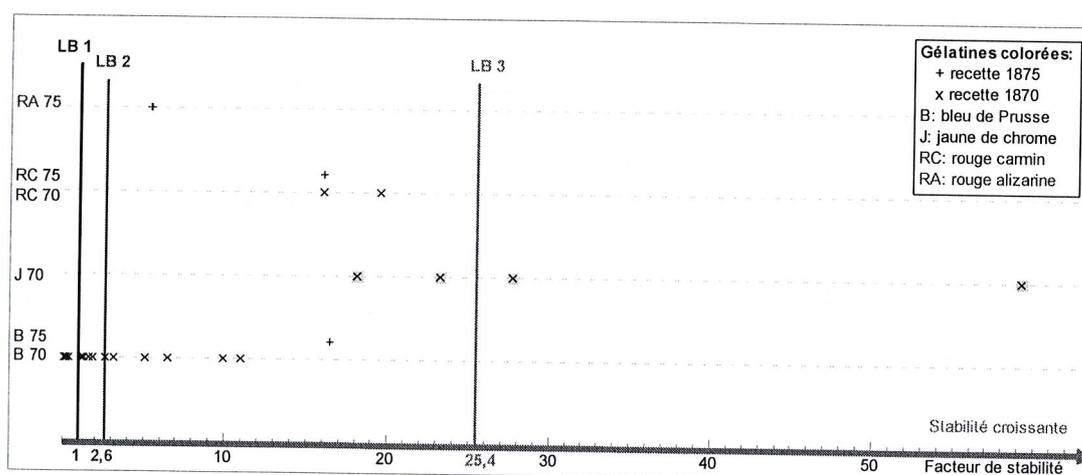


Figure 2 : Évaluation de la stabilité à la lumière des gélamines colorées par rapport à la gamme de laine bleue

Malgré la dispersion des résultats, on remarque que les gélâtines bleues sont les plus fragiles à la lumière. Certaines sont beaucoup moins résistantes que la première plage de laine bleue (BWS 1), alors que pour d'autres, la stabilité se situe entre les plages n°2 (BWS 2) et n°3 (BWS 3), comme pour les gélâtines rouges. Les gélâtines jaunes s'avèrent légèrement plus stables. Nous pouvons observer une différence notable du comportement à la lumière de la matière colorée suivant l'intensité des zones (claires ou foncées) testées.

Le test de micro-vieillessement à la lumière a été appliqué aux monochromes originaux de Ducos du Hauron prêtés par le musée Nicéphore Niépce (annexe 5). L'évaluation de la stabilité des petits fragments et des gélâtines référencées est représentée par la figure 3 :

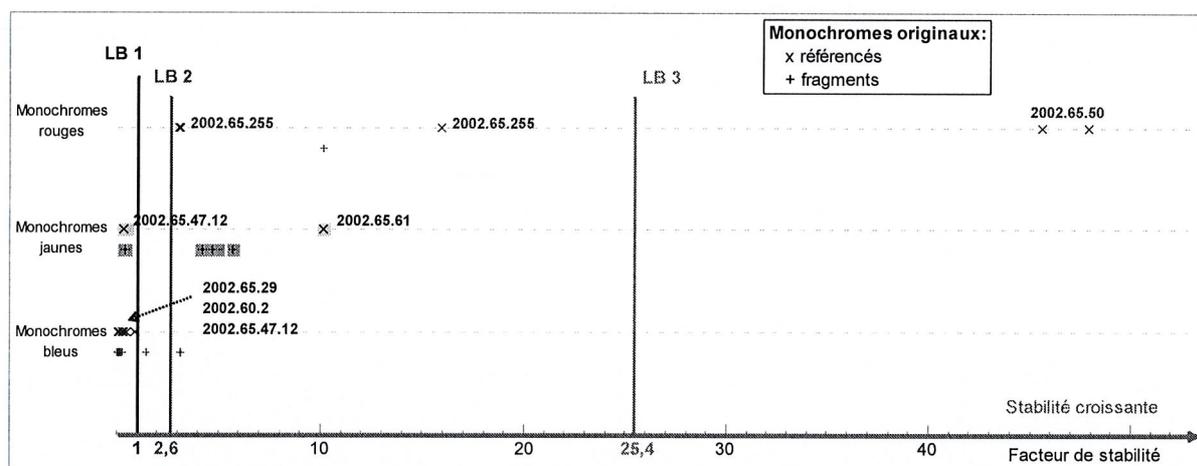


Figure 3 : Évaluation de la stabilité à la lumière des monochromes originaux de Louis Ducos du Hauron par rapport à la gamme de laine bleue

• Conclusion

Tous les monochromes originaux semblent plus sensibles à la lumière que les gélâtines colorées fabriquées au CRCDG selon les recettes de Ducos du Hauron. Leur stabilité est inférieure à celle de la plage n°3 (BWS 3) de la laine bleue étalon, sauf pour le monochrome rouge n° inv. 2002 65 50.

Ces résultats nous conduisent à préconiser la plus grande prudence pour exposer à la lumière les œuvres de Louis Ducos du Hauron. En moyenne, la stabilité est aux alentours des échantillons de laine bleue 1 et 2, ce qui conduit à recommander de rester dans une exposition annuelle de l'ordre de 12000 lux.heures. Une telle exposition devrait permettre d'exposer l'image une centaine d'années avant de pouvoir discerner visuellement une altération. Bien sûr il convient d'optimiser également les dispositifs et systèmes d'éclairage des œuvres. Ce point fera l'objet de la deuxième partie de ce rapport.

Étude d'un dispositif d'éclairage des œuvres

Un éclairagiste de musée conçoit l'éclairage pour mettre en scène les objets exposés. Le choix de la géométrie, de la couleur, de la technologie des sources et des contrôles de l'éclairage pour mettre en valeur la présentation sont de sa responsabilité.

Pour le muséographe, le choix d'un système d'éclairage devrait répondre à plusieurs exigences :

- Faible consommation d'énergie.
- Absence de rayonnement ultraviolet et de rayonnement infrarouge.
- Qualité et confort visuels.

À l'heure actuelle, les diodes électroluminescentes offrent plusieurs avantages :

- Consommation d'énergie de plus en plus modérée.
- Compacité d'une source ponctuelle.
- Intensité lumineuse ajustable.
- Absence d'émission ultraviolette ou infrarouge.

Le choix des caractéristiques de l'éclairage est à déterminer en fonction des œuvres exposées.

- **Caractérisation spectrale des tirages de Louis Ducos du Hauron**

Une mission a été organisée au musée Nicéphore Niepce à Chalon (le 5 avril 2005) afin d'étudier les caractéristiques spectrales de quelques œuvres de Louis Ducos du Hauron en vue de définir les conditions spectrales d'éclairage les mieux adaptées à leur mise en valeur. Six œuvres ont été analysées (tableau 2).

Matériel et méthode

Tableau 2. Matériel photographique analysé

Photographie	Nombre de points de mesure	Particularités
AGEN	6	
ALGER	12	Présence d'un passe-partout
FLEURS	10	
FEUILLE	10	
LOURDES	4	
Gélatines	2	Feuillets séparés

Pour chaque photo, la radiance de quelques zones circulaires de diamètre 6 mm environ, ainsi que la radiance d'une pastille de spectralon ont été mesurées à l'aide d'un spectro-radiomètre (figures 4 et 5). Les deux objets étaient éclairés par une source de lumière stabilisée et dans la même configuration géométrique 45/0 (45 degrés d'inclinaison pour la lumière tombant sur l'échantillon, 0 degré, c'est-à-dire la direction normale, pour l'appareil de mesure).

Le facteur spectral de luminance R_λ a été calculé en effectuant le rapport de la radiance spectrale de la plage test et de la radiance spectrale de la pastille de spectralon (référence blanche parfaitement diffusante).



Figure 4. Dispositif expérimental de mesure

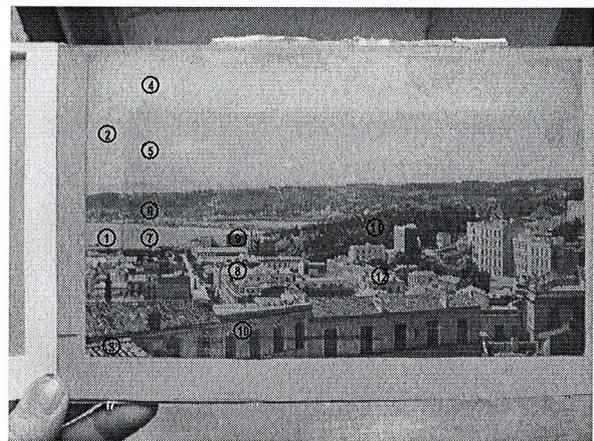


Figure 5. Localisation des plages mesurées sur la photographie ALGER de Ducos du Hauron

L'annexe 6 donne la liste du matériel employé pour les mesures.

Résultats : distribution des couleurs étudiées

Les coordonnées colorimétriques L^* a^* b^* ont été tirées des valeurs du facteur spectral de luminance R_λ (figure 6).

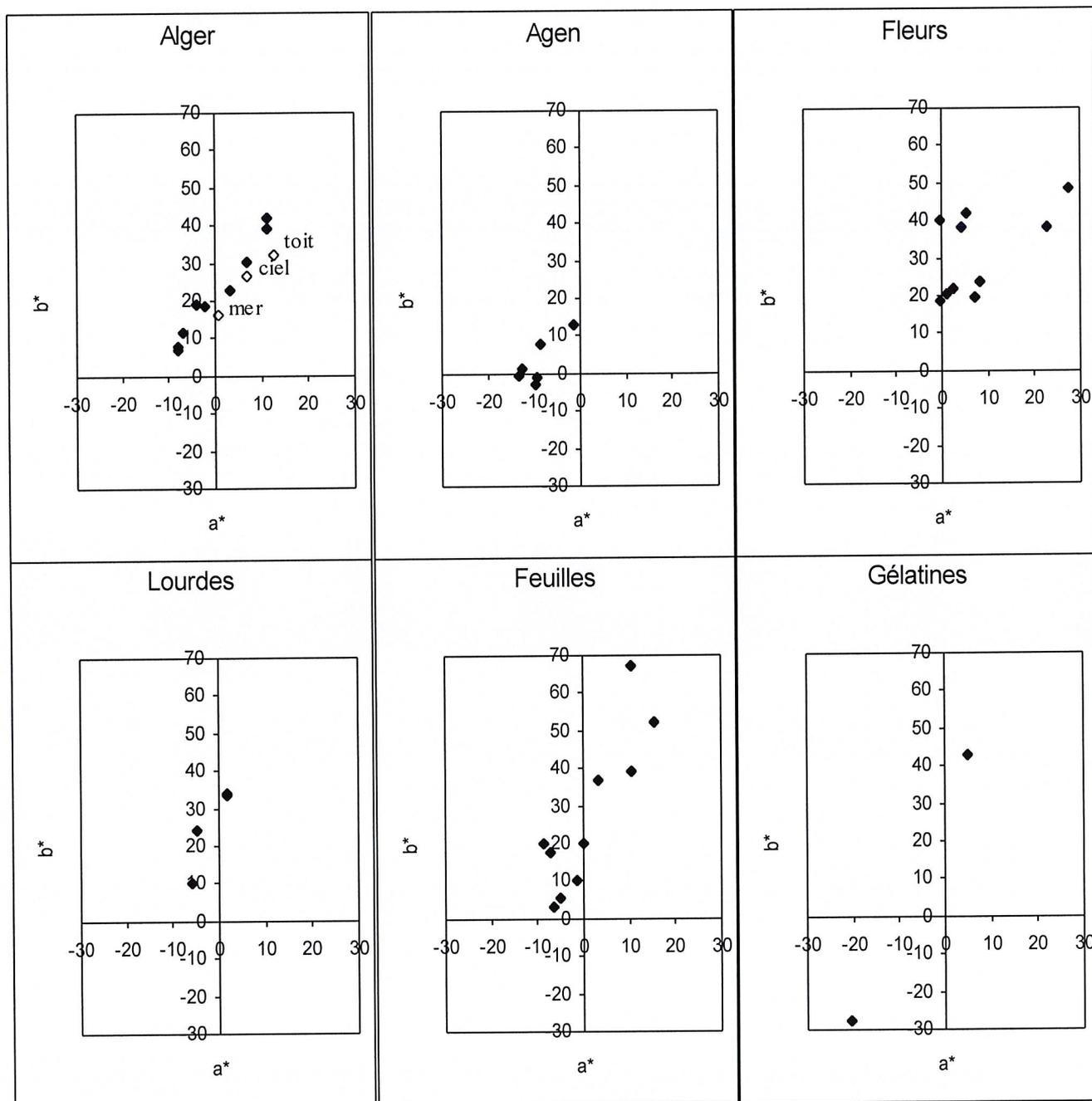


Figure 6. Coordonnées colorimétriques L^* a^* b^* des plages mesurées sur six photographies de Ducos du Hauron. Les symboles évidés représentent les surfaces cachées par le passe-partout.

La comparaison des couleurs vieilles exposées à la lumière et des couleurs vieilles à l'abri du passe-partout permet d'attribuer un écart de 6 à 8 unités CIELAB à l'effet de la lumière sur le vieillissement (figure 6).

L'annexe 7 positionne les couleurs étudiées dans l'espace CIELAB, la couleur du blanc de référence étant situé à l'origine des axes de coordonnées a^* et b^* .

Facteur spectral de luminance des photographies

La connaissance du facteur spectral de luminance des photographies nous permet l'étude optique des colorants photographiques utilisés par Ducos du Hauron. Le relevé du facteur spectral de luminance d'une couche opaque constituée de plusieurs colorants permet d'identifier les constituants par leur maximum d'absorption spectrale. Étant donné un facteur spectral de luminance R_λ , on trouve le rapport $(K/S)_\lambda$ du coefficient spectral d'absorption et du coefficient spectral de diffusion par la relation de Kubelka-Munk.

On constate que toutes les couleurs sont placées du côté des valeurs b^* positives, ce qui indique un fort jaunissement, y compris les parties de la photographie « Alger » cachées par le passe-partout. La variété apparente des couleurs, marquée pour les photographies « Alger », « Feuilles » et « Fleurs » est due à un effet de contraste simultané d'origine visuelle.

$$\left(\frac{K}{S}\right)_\lambda = \frac{(1-R_\lambda)^2}{2R_\lambda} \quad (\text{eq. 1})$$

En présence de plusieurs colorants inclus dans un milieu fortement diffusant, les rapports relatifs à chaque constituant i s'additionnent selon leurs concentrations c_i .

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda, c1+c2} = \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda, c1} + \left(\frac{K}{S}\right)_{\lambda, c2} \quad (\text{eq. 2})$$

En appliquant la formule de Kubelka-Munk, nous obtenons les courbes du rapport K/S , que nous traçons en échelle logarithmique pour faire ressortir les maximums d'absorption.

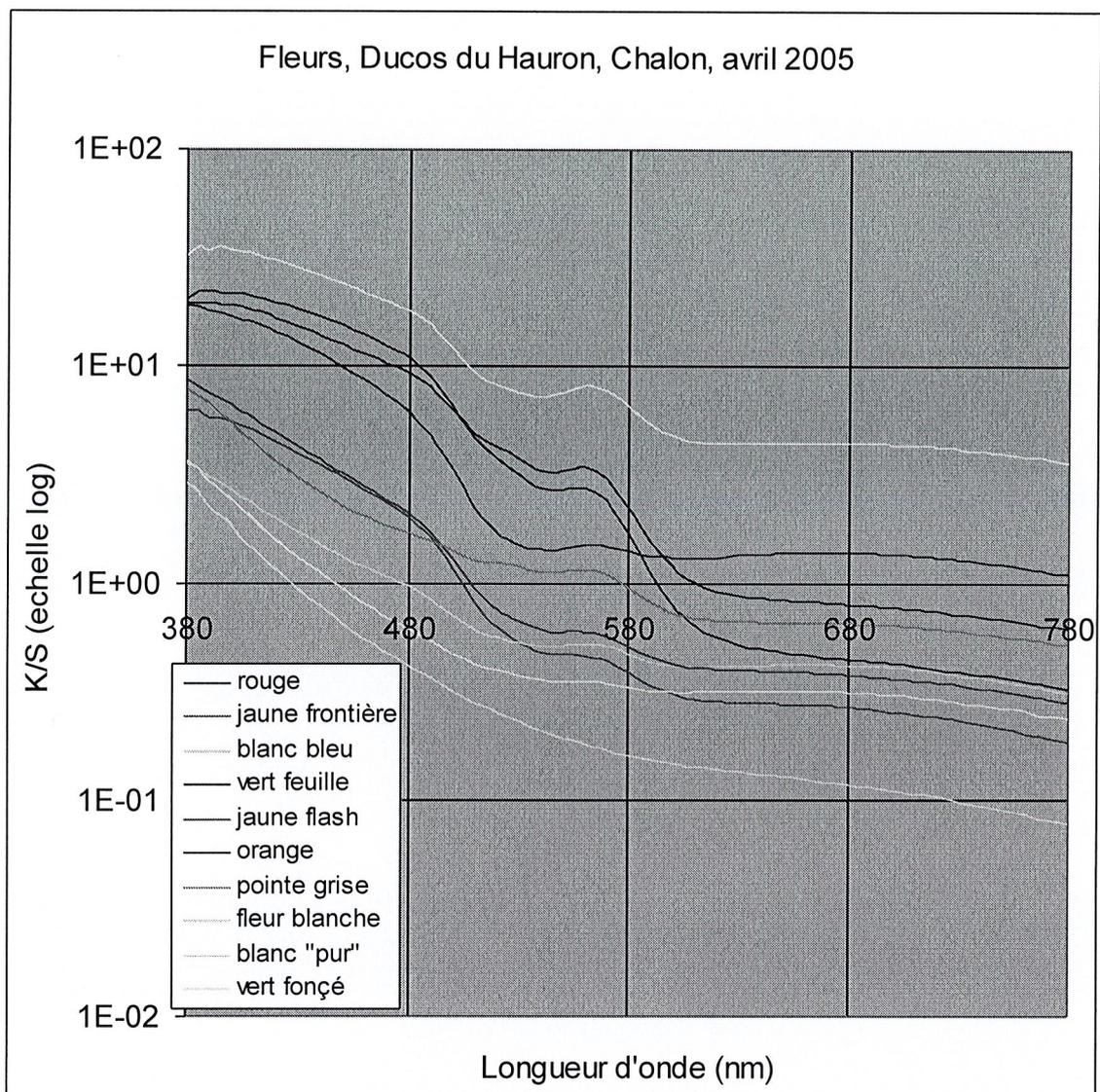


Figure 7. Facteur spectral de luminance des plages de la photographie FLEURS

L'annexe 8 montre le facteur spectral de luminance des plages de toutes les photographies.

Analyse des rapports absorption sur diffusion

Les photographies sont commentées dans l'ordre de complexité croissante (tableau 3).

Tableau 3. Analyse du rapport K/S dans les 6 photographies

Photographie	Caractéristiques du tracé des courbes	Observations et analyse
FLEURS	Point d'inflexion d'un pigment jaune à 500 nm. Maximum d'absorption marqué d'un pigment magenta à 560 nm. Maximum d'absorption d'un pigment cyan vers 680 nm.	Les matières colorantes semblent bien conservées. Les maximums sont bien marqués, signe de couverture du papier par les colorants.
FEUILLE	Remontée des courbes d'absorption aux faibles longueurs d'onde. Point d'inflexion marqué d'un pigment jaune tirant vers l'orangé à 510 nm. Maximum d'absorption d'un pigment magenta vers 570 nm, différent du magenta des fleurs ? Maximum d'absorption d'un pigment cyan vers 680 nm.	Les maximums sont peu prononcés, signe que le fond blanc envahit les vides entre les points. Le papier a jauni.
Gélatines	Maximum d'absorption simple du pigment cyan à 680 nm Le pigment jaune absorbe nettement les courtes longueurs d'onde. Dans le reste du spectre, des ondulations régulières avec maximums secondaires à 480, 510, 555, 590, 655 700 nm environ.	L'origine de ces multiples pics d'absorption reste à déterminer.
AGEN	Remontée des courbes d'absorption aux faibles longueurs d'onde, le pigment jaune tire peut-être un peu vers le vert. Maximums secondaires multiples à 520 et 560 nm issus du jaune ou d'un magenta à deux constituants ? Maximum d'absorption du cyan à 680 nm	Les aplats sont pleins. Le papier a peu jauni. L'origine de ces multiples pics d'absorption reste à déterminer.
LOURDES	Remontée des courbes d'absorption aux faibles longueurs d'onde, le pigment jaune tire peut-être un peu vers le vert. Un léger maximum secondaire vers 510 nm. Absence de maximum caractéristique du magenta. Maximum du pigment déplacé vers 640 nm. Cyan.	Le papier a jauni. Deux pigments seulement ? Le maximum secondaire viendrait du jaune. Le cyan est-il un peu plus bleu qu'habituellement ?
ALGER	Point d'inflexion du jaune ou maximum secondaire du jaune vers 520 nm Maximum du magenta vers 540 nm Maximum du cyan vers 680 nm	Le croisement des courbes du même élément, soit caché par le passe-partout, soit exposé à la lumière, traduit bien le vieillissement des matières colorantes à la lumière.

- L'indice de Rendu des Couleurs des diodes électroluminescentes

Introduction sur l'Indice de Rendu des Couleurs

L'objectif était ici d'étudier la qualité d'un éclairage par diodes électroluminescentes sous l'angle du rendu des couleurs. La lumière produite par fluorescence a une distribution spectrale particulière, discontinue, qu'il n'est pas possible de caractériser directement par une température de couleur. On utilise alors la notion de température de couleur corrélée ou équivalente : c'est celle à laquelle il faudrait chauffer le corps noir pour qu'il produise la même qualité de lumière. Toutefois cet élargissement du concept peut être source d'erreurs : il arrive que deux tubes fluorescents de même température de couleur corrélée aient, sur des objets colorés, des effets totalement différents. On a recours alors à la notion d'indice de rendu des couleurs. La Commission Internationale de l'Éclairage définit le rendu des couleurs ainsi : « Effet d'un illuminant sur l'aspect chromatique des objets qu'il éclaire, cet aspect étant comparé consciemment ou non à celui des mêmes objets éclairés par un illuminant de référence. » (*Vocabulaire international de l'éclairage*, CIE, Publ. No. 17.4, définition 845-02-59). Cette définition met les objets éclairés au cœur du problème. Elle suppose l'existence d'une situation de référence, mais laisse une marge d'interprétation en évoquant une comparaison consciente ou inconsciente.

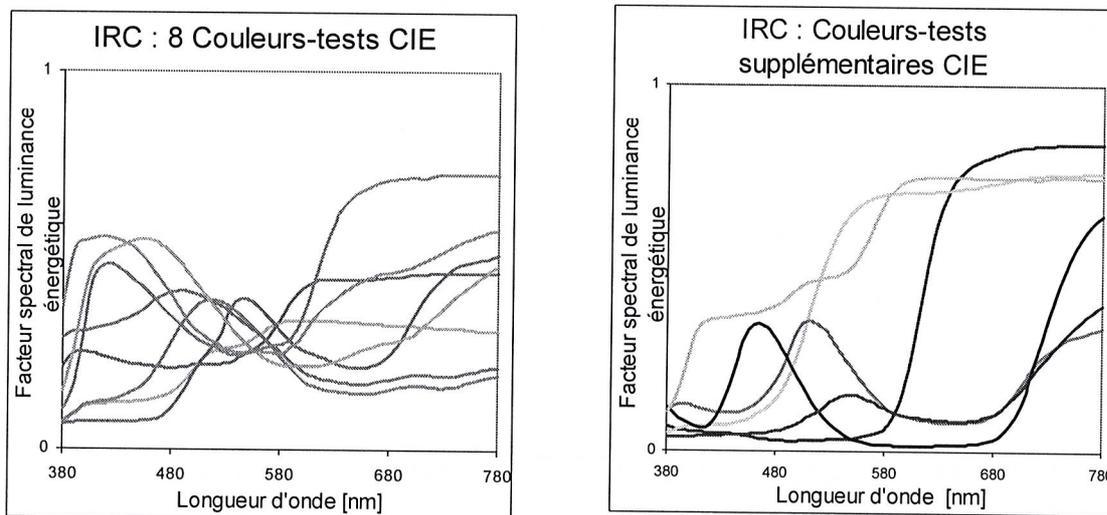


Figure 8. Couleur et facteur de luminance des échantillons types de la CIE

Dans ses recommandations, la CIE propose de calculer un Indice de Rendu des Couleurs (IRC) qui traduit l'absence de distorsion de couleur sur quelques échantillons types, par rapport à la couleur générée sous un illuminant de référence de même température de couleur.

Huit échantillons sont spécifiés par leur facteur spectral de luminance, ou réflectance spectrale ; ils entrent dans la composition d'un IRC moyen. Six échantillons supplémentaires sont prévus pour définir des IRC particuliers (figure 8).

L'illuminant de référence doit avoir la température de couleur proximale de la source réelle testée. Il s'agit soit du radiateur de Planck, pour $T_{cp} < 5000$ K, soit de l'illuminant « Lumière du Jour », pour $T_{cp} > 5000$ K. Il est spécifié par sa répartition spectrale d'énergie.

Il est prévu de corriger les distorsions de couleur de l'effet de l'adaptation chromatique, au cas où la chromaticité de la source réelle testée ne serait pas exactement celle de l'illuminant de référence.

La distorsion de couleur se traduit par un écart colorimétrique ΔE_{uv} dans un espace de représentation uniforme des couleurs, l'espace CIELUV, où les distances sont censées représenter régulièrement des différences de couleur perçues.

Étant donné un écart colorimétrique $\Delta E_{uv,i}$ particulier à un échantillon i ($i = 1, \dots, 14$), l'IRC particulier R_i est donné par :

$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_{uv,i} \quad (\text{eq. 3})$$

L'indice général R_{a8} est donné par la moyenne des 8 premiers indices particuliers :

$$R_{a8} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (\text{eq. 4})$$

Un indice général R_{a14} peut aussi être calculé à l'aide des 14 indices particuliers :

$$R_{a14} = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} R_i \quad (\text{eq. 5})$$

La procédure de calcul de l'IRC est détaillée dans l'annexe 9.

Tableau 4. Classement en groupes des IRC des sources de lumière (d'après Lavédrine et al., 2000, page 173, tableau 65)

Groupe	IRC correspondant	Recommandation
1a	$90 < \text{IRC} \leq 100$	bon
1b	$80 \leq \text{IRC} \leq 90$	satisfaisant
2	$60 \leq \text{IRC} \leq 80$	moyen
3	$40 \leq \text{IRC} \leq 60$	médiocre
4	$20 < \text{IRC} \leq 40$	faible

Indice de Rendu des Couleurs des LED pour l'éclairage des photographies de Ducos du Hauron.

Pratiquement, pour l'exposition, la qualité visuelle de l'éclairage sera jugée sur sa capacité à restituer fidèlement les couleurs, à permettre une discrimination fine des couleurs ou à donner aux objets une apparence naturelle. Il nous a semblé que dans le cas des photographies de Ducos du Hauron, l'éclairage devait restituer fidèlement les couleurs, ou du moins, aussi fidèlement qu'un éclairage fréquemment employé dans l'exposition, une source halogène tungstène blanc chaud, à environ 4000 K.

Choix des systèmes de diodes électroluminescentes

En l'état du développement des diodes électroluminescentes au début de l'année 2005, il est réaliste de proposer de produire de la lumière blanche, soit en associant des diodes de couleur en « cluster », soit en utilisant des diodes à phosphores. Nous avons donc envisagé plusieurs combinaisons réalistes :

- « RGB » c'est-à-dire l'adjonction de diodes rouges, vertes et bleues, la solution la plus élémentaire.
- « RGBA » c'est-à-dire l'adjonction de diodes rouges, vertes, bleues et ambre, la lumière ambre supplée le manque de rayonnement dans le spectre de « RGB ».
- « WR » c'est-à-dire des diodes blanc froid à double phosphore et des diodes rouges, où la lumière blanche est déjà bien travaillée par le fabricant pour renfermer presque tout le spectre visible et où la lumière rouge apporte un complément dans les grandes longueurs d'onde du spectre et permet de moduler la température de couleur de l'ensemble.
- « WWARGB » c'est-à-dire l'ensemble de toutes les diodes disponibles : blanc froid à double phosphore, blanc chaud à double phosphore, ambre, rouges, vertes et bleues, où le spectre de la lumière est le plus modulable possible.

Toutes ces combinaisons permettent d'obtenir une lumière de température de couleur proximale égale à 4000 K.

En outre, dès que le cluster comprend plus de trois composants, il est possible d'ajuster les intensités de chaque type de diodes pour optimiser l'Indice de Rendu des Couleurs, ce à quoi nous nous sommes systématiquement appliqué. Dans ce cas, les deux limites à l'optimisation sont la limitation du nombre de luminaires à LED, et la réduction à moins de deux unités d'écart de couleur entre la lumière testée et la lumière de référence.

Lumière de référence

La lumière de référence est celle d'une source à incandescence halogène-tungstène corrigée par des verres dichroïques « Solux » pour que son spectre épouse au mieux l'émission du radiateur de Planck à 4000 K (figure 9).

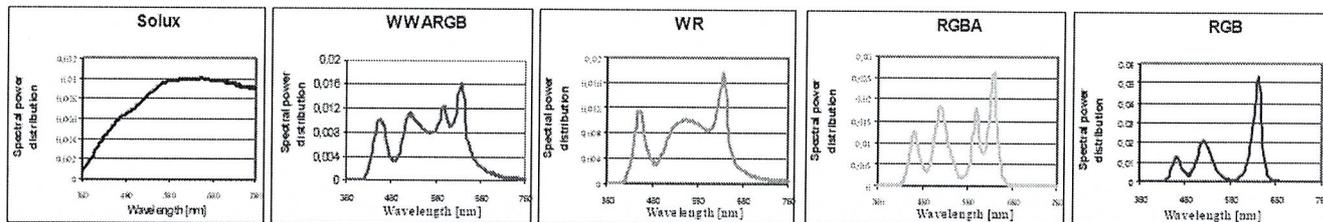


Figure 9. Répartition spectrale d'énergie de la lumière de référence et des clusters de diodes ajustés et optimisés à 4000 K

Calculs des Indices de Rendu des Couleurs CIE selon les recommandations de la CIE

Le tableau suivant donne les valeurs de l'Indice de Rendu des Couleurs CIE pour la lumière de référence et pour les quatre clusters de LED étudiés. Les IRC sont soit l'indice particulier R_i calculé pour les échantillons types de la CIE, soit l'indice moyen R_{a8} ou R_{a14} calculé sur 8 ou 14 échantillons (tableau 5).

Tableau 5. Indice de Rendu des Couleurs CIE pour la lumière de référence et pour quatre clusters de LED ajustés à 4000 K

IRC CIE		Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB
Ra 8		96,78	96,63	91,35	67,36	21,71
Ra 14		95,50	93,98	88,77	60,34	6,32
Rouge grisé clair	Ri 1	96,06	96,01	96,18	55,15	4,92
Jaune grisé sombre	Ri 2	97,24	98,58	92,32	78,40	63,77
Jaune vert soutenu	Ri 3	98,65	91,25	82,72	88,37	62,22
Vert jaunâtre moyen	Ri 4	96,05	93,40	92,79	50,05	1,21
Vert bleuâtre clair	Ri 5	95,81	98,04	93,30	58,64	17,00
Bleu clair	Ri 6	96,17	97,10	86,26	63,34	51,00
Violet clair	Ri 7	98,85	99,43	92,95	83,35	34,15
Pourpre rougeâtre clair	Ri 8	95,39	99,21	94,30	61,54	-60,58
rouge saturé	Ri 9	86,99	96,75	96,21	15,45	-226,45
Jaune saturé	Ri 10	93,63	94,01	76,70	49,17	18,79
Vert saturé	Ri 11	95,22	86,99	90,76	27,16	-19,25
bleu saturé	Ri 12	91,52	74,59	64,90	66,65	49,52
Rose jaunâtre clair (peau humaine)	Ri 13	96,11	96,59	94,54	56,79	17,84
Vert olive moyen (vert feuille)	Ri 14	99,27	93,73	88,88	90,68	74,34
		Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB
Coordonnée trichromatique x		0,385	0,382	0,379	0,385	0,381
Coordonnée trichromatique y		0,386	0,381	0,369	0,387	0,385
Température de couleur T (k)		3960	4000	3990	4030	4030
Différence chromatique ΔCuv entre la source à tester et l'illuminant de référence		0,0033	0,0017	0,0033	0,0042	0,0034
Eclairage (lux)		653	669	657	657	666

Lorsque cela s'y prête, notre algorithme a ajusté les intensités relatives de chaque famille de LED pour obtenir l'IRC CIE le plus élevé possible pour le cluster étudié. Le tableau indique aussi la température de couleur proximale obtenue, l'écart entre la couleur de la lumière produite par les LED et la couleur du radiateur de Planck, et l'éclairement atteignable avec un nombre limité de LED.

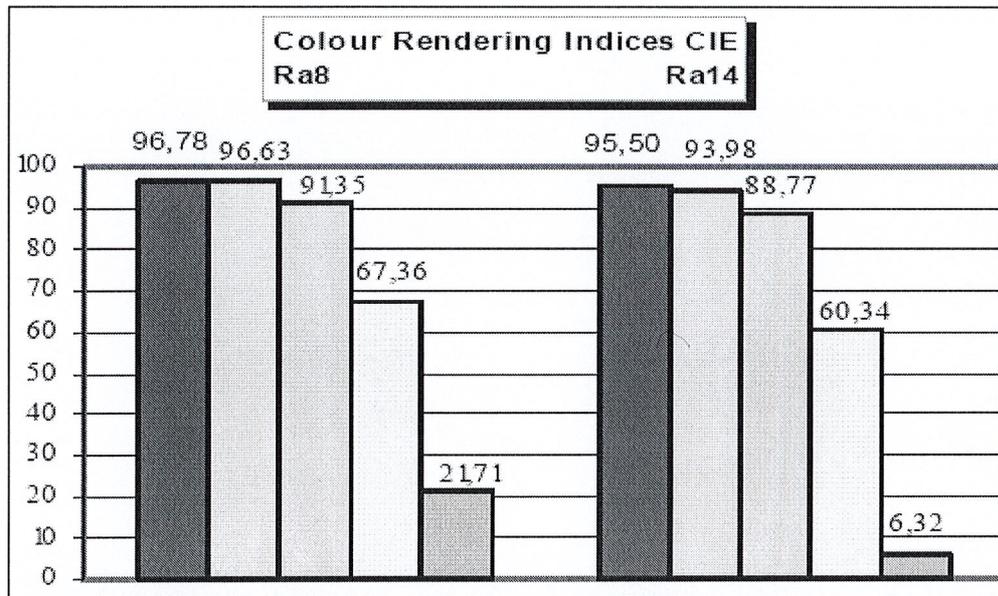


Figure 10. Histogramme représentant les Indices de Rendu des Couleurs CIE pour la lumière de référence et pour quatre clusters de LED ajustés à 4000 K

Sur l'histogramme qui reprend les indices R_{a8} et R_{a14} on constate que le cluster « RGBA » donne un indice très médiocre, et le cluster « RGB » donne un indice catastrophique. Ils ne conviennent pas à l'exposition d'un ensemble majeur d'objets colorés (figure 10).

La source de référence « Solux » et le cluster « WWARGB » donnent des IRC CIE très élevés, suivis par le cluster « WR » avec un indice proche ou supérieur à 90. Ces deux clusters seraient des choix acceptables. Toutefois, en examinant le détail des IRC particuliers donnés par le tableau 6, on constate que l'IRC moyen du cluster « WWARGB » cache une valeur inférieure à 80, juste satisfaisante, pour l'échantillon bleu saturé, et que celui du cluster « WR » cache deux valeurs inférieures à 80, pour les échantillons jaune saturé et bleu saturé, ce qui explique d'ailleurs la chute de valeur entre l'indice R_{a8} et l'indice R_{a14} . De ce fait, en l'état actuel de la technologie des diodes électroluminescentes blanches, même le cluster « WWARGB » présente encore une faiblesse par rapport à l'objectif de fidélité des couleurs.

Influence du choix de la température de couleur sur l'Indice de Rendu des Couleurs

Dans le paragraphe précédent, l'intensité des LED de chaque cluster a été ajustée pour produire une lumière blanche de température de couleur proximale égale à 4000 K. Or, à 4000 K, les teintes bleues manquent de coloration. Il est possible de produire une lumière blanche avec une température de couleur supérieure à 4000 K en ajustant différemment l'intensité des LED. Nous avons étudié les modifications de l'IRC CIE optimisé pour des clusters de LED de température de couleur comprise entre 4000 K et 6500 K (optimisés pour les échantillons-tests de la CIE). Les seules contraintes imposées sont d'approcher la température de couleur de moins de deux unités d'écart de couleur CIELUV et d'obtenir le rendu des couleurs maximum. Le niveau lumineux n'est plus strictement imposé ; nous avons seulement veillé à ce qu'il reste dans des limites réalisables avec un montage matériel raisonnable.

Le tableau des IRC CIE des lumières émises par les LED optimisées pour les échantillons-tests CIE montre qu'il y a peu de changement de l'IRC pour les clusters « WWARGB », « RGBA » et « RGB » qui restent respectivement bon, satisfaisant et faible, mais que la combinaison « WR » ne peut plus être utilisée au-delà de 5000 K parce que le blanc désiré ne peut pas être reproduit et que le rendu des couleurs de la diode blanche seule pénalise l'IRC (tableau 6).

Tableau 6. Indices de Rendu des Couleurs CIE pour des clusters de LED optimisés pour les couleurs-tests CIE, à différentes températures de couleur

Cluster	Température de couleur	IRC Ra 8	IRC Ra 14 1	Delta uv
WWARGB	4000	96,63	93,98	0,0017
	4540	97,04	94,62	0,0011
	4950	97	94,37	0,001
	5520	97	94,1	0,0025
	6040	96,86	93,98	0,0027
	6520	96,58	93,93	0,0039
	Température de couleur	IRC Ra 8	IRC Ra 14	Duv
WR	3990	91,35	88,77	0,0033
	4450	85,5	80,16	0,0024
	5000 & +	impossible		
	Température de couleur	IRC Ra 8	IRC Ra 14 1	Duv
RGBA	4000	79,56	75,53	0,0041
	4490	79,06	75,45	0,0025
	5010	80,43	76,02	0,0028
	5500	80,33	77,34	0,0028
	6020	81,12	77,46	0,0047
	6500	80,81	76,99	0,0044
	Température de couleur	IRC Ra 8	IRC Ra 14 1	Duv
RGB	4030	21,71	6,32	0,0033
	4510	23,25	6,89	0,0025
	5000	27,27	11,07	0,0024
	5510	30,02	13,37	0,003
	6010	32,5	15,49	0,0037
	6490	34,81	17,56	0,0046

Indices de Rendu des Couleurs propres aux photographies de Ducos du Hauron, pour des sources ajustées selon l'IRC de la CIE

Les recommandations de la CIE proposent de calculer des IRC particuliers lorsque l'application concerne un ensemble de surfaces colorées données. Alors, étant donné le facteur spectral de luminance d'une surface, on peut calculer un indice particulier relatif à cette surface. Nous avons appliqué cette méthode à chaque échantillon mesuré sur la photographie et nous avons moyenné les indices particuliers pour dériver un IRC moyen propre à la photographie.

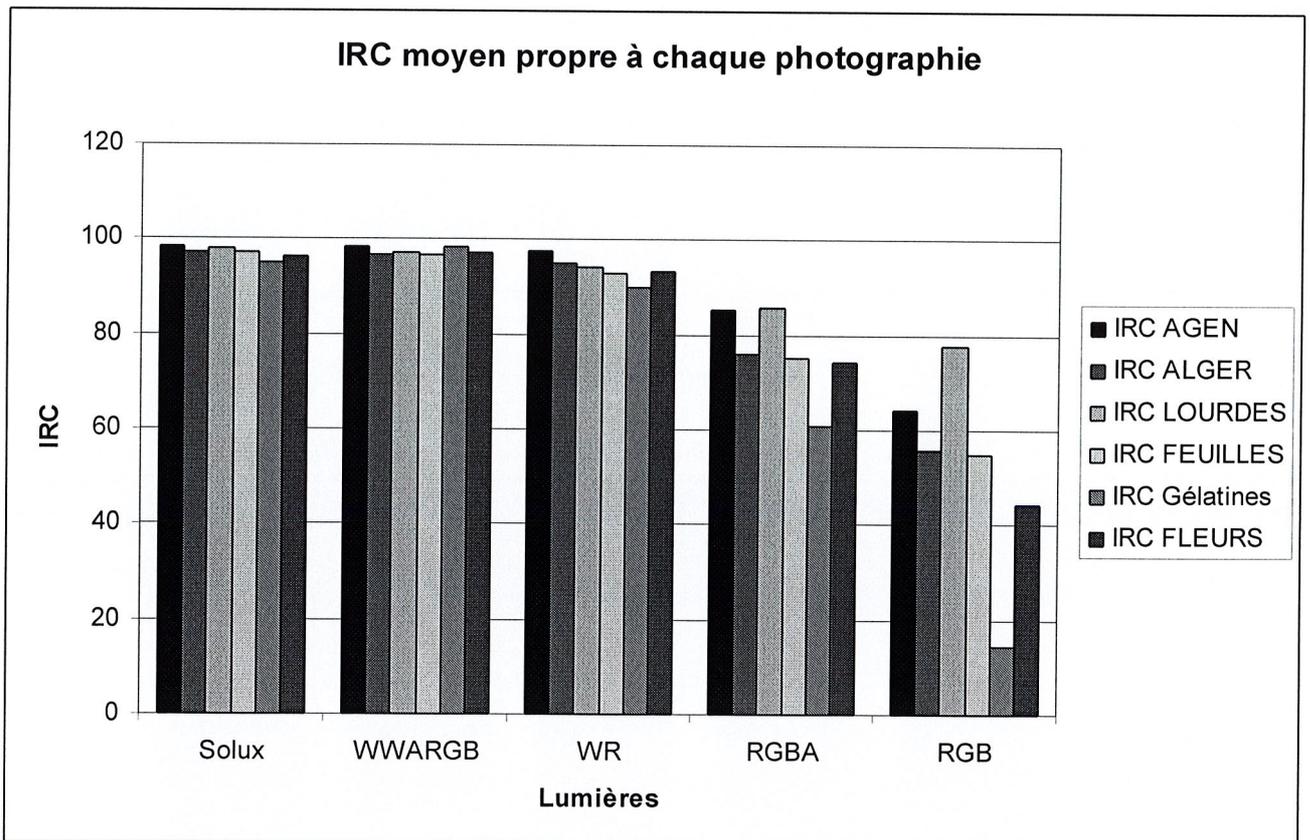


Figure 11. Histogrammes représentant les Indices de Rendu des Couleurs des clusters de LED optimisés pour s'adapter à chaque photographie

Les histogrammes des IRC moyens propres à chaque photographie montrent que les clusters « WWARGB » et « WR » conviennent à toutes les photographies. Comme attendu, les clusters « RGBA » et « RGB » dégradent l'apparence de ces couleurs, d'ailleurs inégalement, mais il faut se souvenir qu'un IRC moyen passable ou médiocre cache souvent des IRC particuliers inadmissibles (figure 11).

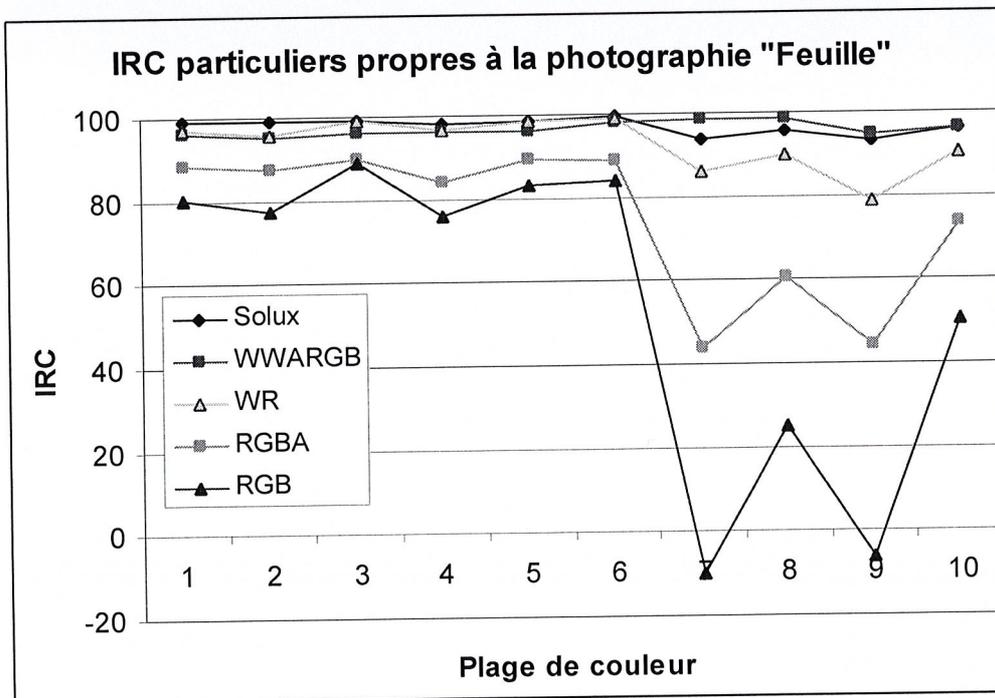


Figure 12. Localisation des plages mesurées sur la photographie FEUILLE. Graphique des Indices de Rendu des Couleurs des clusters de LED optimisés, particuliers à chaque plage mesurée

Le graphique des IRC particuliers propres à la photographie « Feuille » illustre la capacité des différents clusters de LED à restituer fidèlement telle ou telle zone de la photographie (figure 12). On constate que la source « Solux » et la cluster « WWARGB » éclairent convenablement toutes les couleurs, que la source « WR » restitue passablement les jaunes orangés.

L'annexe 10 présente les IRC particuliers et les IRC moyens à chaque photographie.

• Conclusion sur les dispositifs d'éclairage

Nous nous sommes attaché à évaluer la qualité de l'éclairage par diodes électroluminescentes du point de vue de la fidélité du rendu des couleurs. L'indice de Rendu des Couleurs recommandé par la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) fournit une valeur qui permet de classer les éclairages d'après leur capacité à restituer correctement les couleurs de quelques surfaces colorées standard. Son application est générale. Si l'on fixe la température de couleur à 4000 K, et si l'on ajuste les intensités relatives de chaque LED d'un cluster pour optimiser l'Indice de Rendu des Couleurs de la CIE, on doit proscrire l'usage des clusters à trois diodes rouge, verte et bleue, et des clusters à quatre diodes rouge, verte, bleue et ambre. Par contre, la lumière des diodes blanches à double phosphore blanc froid, corrigées par l'ajout de diodes rouges pour atteindre la température de couleur 4000 K, donne un rendu des couleurs acceptable. Enfin, en associant un ensemble de diodes Blanc froid, rouge, verte, bleue, ambre, il est possible d'atteindre un rendu des couleurs aussi bon que celui d'un projecteur halogène tungstène à filtres dichroïques à 4000 K.

Tout en s'attachant à la fidélité du rendu des couleurs, on peut chercher à adapter l'éclairage à une œuvre donnée. À partir de quelques zones critiques de la photographie, on calcule alors un Indice de Rendu des Couleurs propre à chaque photographie. Les clusters de LED rouge, verte et bleue, et de LED rouge, verte, bleue et ambre restent déconseillés. On peut avec les associations de diodes blanches à double phosphore, soit avec du rouge, soit avec du rouge, vert, bleu et ambre, obtenir de très bons, voire excellents rendus de couleurs pour une photographie donnée.

Rappelons que l'intérêt des diodes électroluminescentes tient à l'absence totale d'émission dans l'ultraviolet et dans l'infrarouge. La situation actuelle présente encore quelques inconvénients : une efficacité lumineuse modeste, la difficulté d'obtenir des éclairages homogènes en couleur avec des clusters, une inhomogénéité des produits industriels, une

instabilité de l'intensité lumineuse, inconvénients qui peuvent être préjudiciables à l'exposition. Mais les progrès de la technologie sont constants et les résultats en terme de rendu des couleurs sont encourageants pour le futur.

Enfin, l'association de diodes différentes offre une telle plasticité qu'il est aussi possible d'envisager de construire des distributions spectrales pour donner au rendu des couleurs des qualités différentes de la fidélité, par exemple, un rajeunissement de l'œuvre.

Bibliographie

Association Française de l'Éclairage, *Guide pour l'éclairage des musées et des collections particulières et des galeries d'art*. Paris : Société d'édition Lux, 1991.

Commission Internationale de l'Éclairage, *Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources*, Publication CIE 13.3, 1995.

Commission Internationale de l'Éclairage, *Control of damage to museum objects by optical radiation*, Publication CIE 157:2004.

Ezrati, J.J., *Théorie, technique et technologie de l'éclairage muséographique*, Paris : Éditions AS – Collection "Scéno +", 2002.

Lavédrine B., *Les Collections photographiques : guide de conservation préventive*, Paris : Arsag, 2000.

Annexes

Annexe 1 : Cinétiques de dégradation à la lumière des couches de gélatine colorées.

Annexe 2 : Analyse des gélatines colorées et des monochromes originaux à l'aide du microscope électronique à balayage.

Annexe 3 : Spectres de réflectance des gélatines colorées et des originaux de Ducos du Hauron.

Annexe 4 : Courbes de variations de l'écart de couleurs en fonction du temps pour les gélatines colorées soumises au test de micro-vieillessement à la lumière.

Annexe 5 : Courbes de variations de l'écart de couleurs en fonction du temps pour les monochromes originaux soumis au test de micro-vieillessement à la lumière.

Annexe 6 : Matériel utilisé pour les mesures au musée Nicéphore Niepce.

Annexe 7 : Tableaux des valeurs $L^*a^*b^*$ calculées à partir des répartitions spectrales d'énergie mesurées au spectroradiomètre à Chalon.

Annexe 8 : Graphiques du facteur spectral de luminance des 6 photographies de Ducos du Hauron analysées.

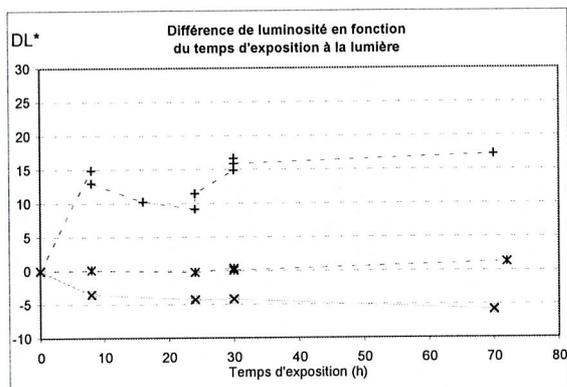
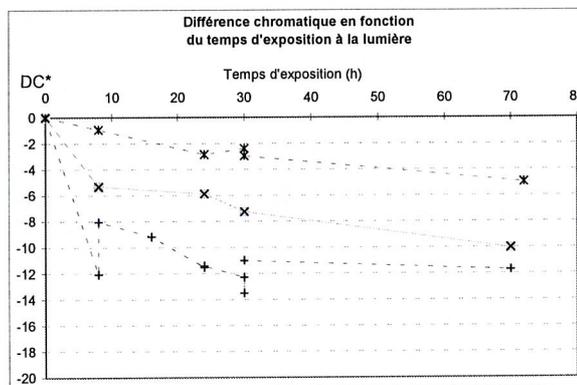
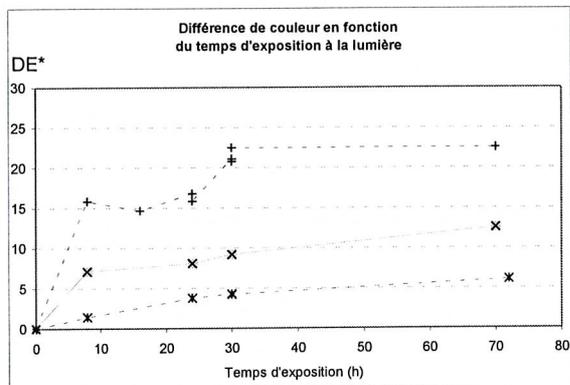
Annexe 9 : Organigramme de calcul de l'Indice de Rendu des Couleurs de la CIE.

Annexe 10 : Tableaux des Indices de Rendu des Couleurs particuliers, propres à chaque photographie.

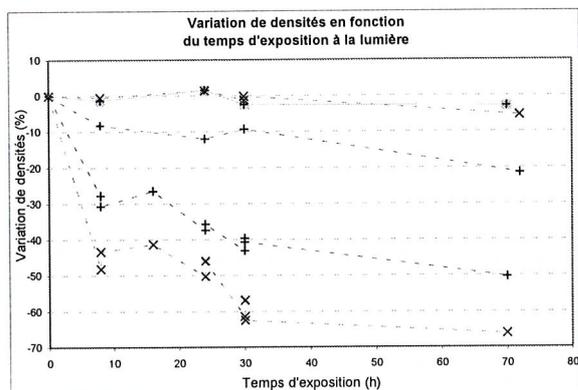
Annexe 1. Cinétiques de dégradation à la lumière des couches de gélatine colorées : variation des données colorimétriques en fonction du temps

Gélatines colorées - recette 1870

Conditions d'exposition: 50%HR, 25°C, 200 000 Lux



* Carmin
+ Bleu de Prusse
x Jaune de chrome

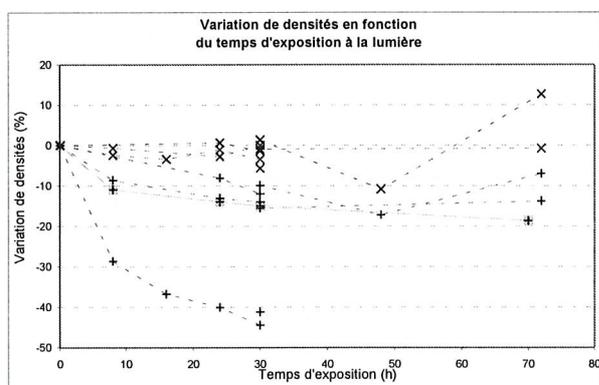
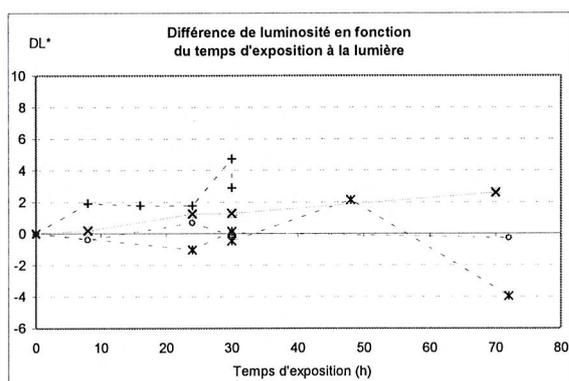
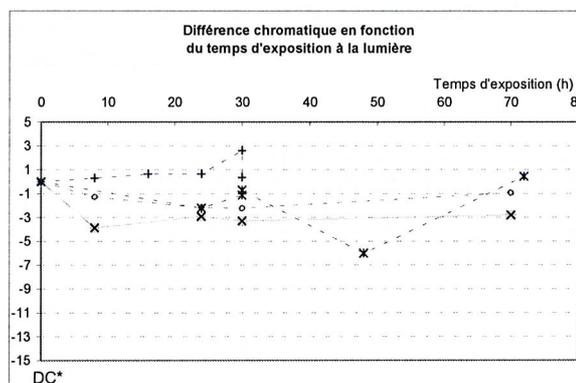
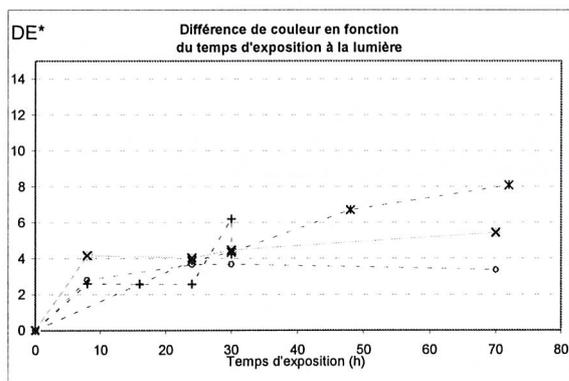


+ Bleu de Prusse 400 nm
x Bleu de Prusse 680 nm
+ Jaune de chrome 400 nm
+ Carmin 400 nm
x Carmin 530 nm

Annexe 1. Cinétiques de dégradation à la lumière des couches de gélatine colorées : variation des données colorimétriques en fonction du temps

Gélatines colorées - recette 1875

Conditions d'exposition: 50 %HR, 25 °C, 200 000 Lux



* Carmin

o Alizarine

+ Bleu de Prusse

x Jaune de chrome

+ Bleu de Prusse 400 nm

x Bleu de Prusse 680 nm

+ Jaune de chrome 400 nm

+ Carmin 400 nm

x carmin 540 nm

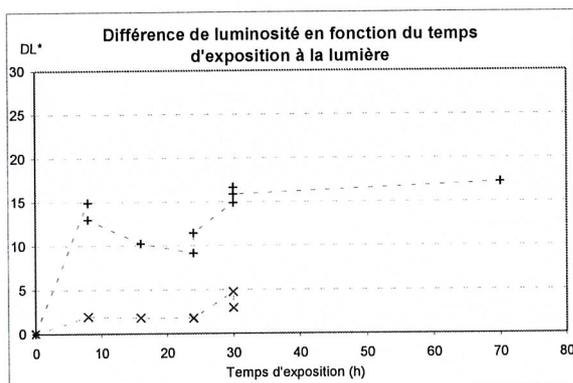
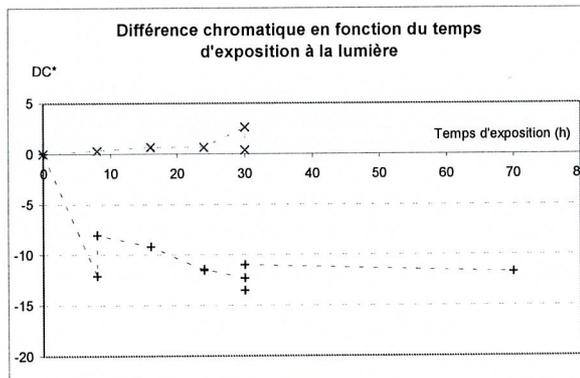
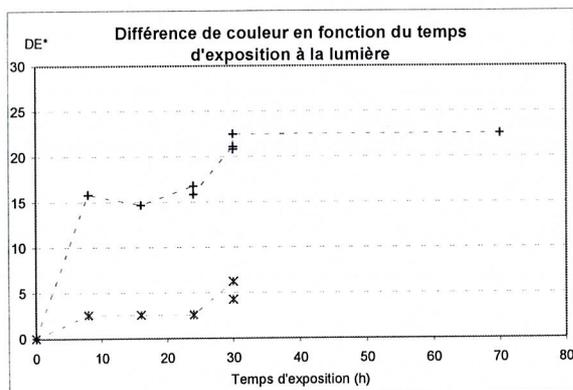
+ Alizarine 400 nm

x Alizarine 530 nm

Annexe 1. Cinétiques de dégradation à la lumière des couches de gélatine colorées : influence des procédés de fabrication

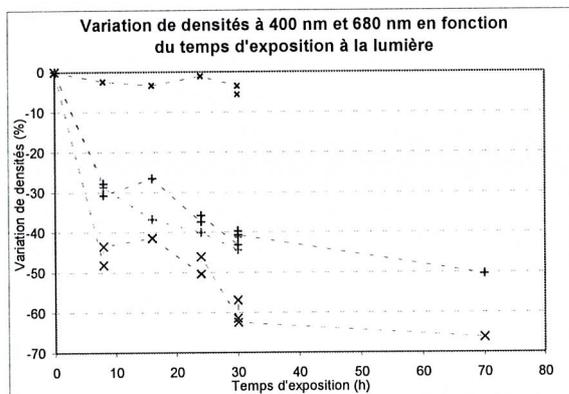
Gélatine colorée avec du Bleu de Prusse - recettes 1870 et 1875

Conditions d'exposition: 50 %HR, 25 °C, 200 000 Lux



+ Recette 1870

x Recette 1875



+ 400 nm, recette 1870

x 680 nm, recette 1870

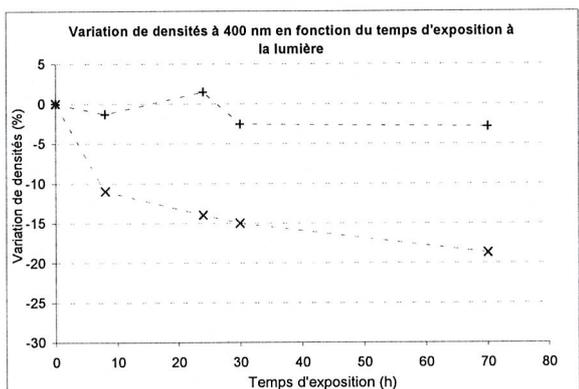
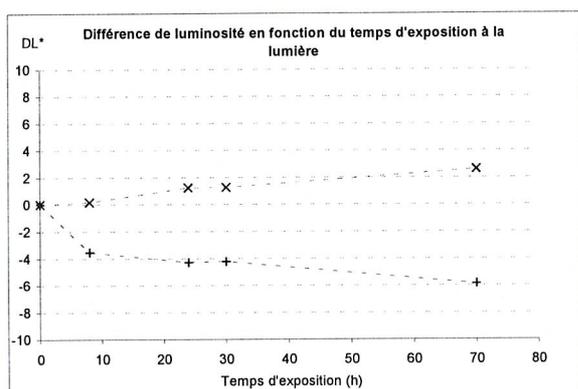
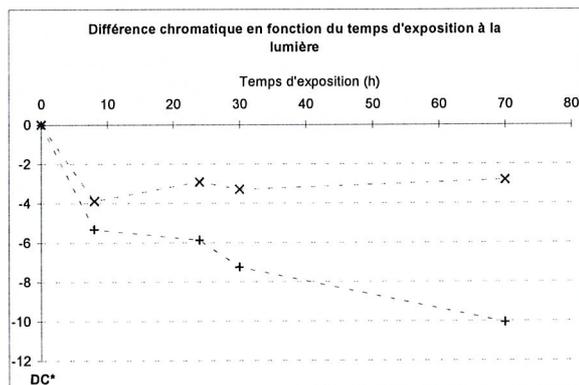
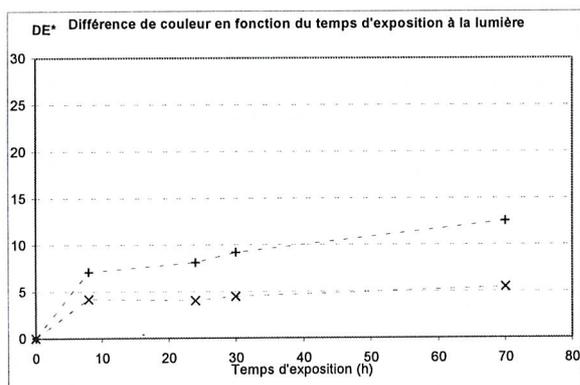
+ 400 nm, recette 1875

x 680 nm, recette 1875

Annexe 1. Cinétiques de dégradation à la lumière des couches de gélatine colorées : influence des procédés de fabrication

Gélatine colorée avec du jaune de chrome - recettes 1870 et 1875

Conditions d'exposition: 50 %HR, 25 °C, 200 000 Lux



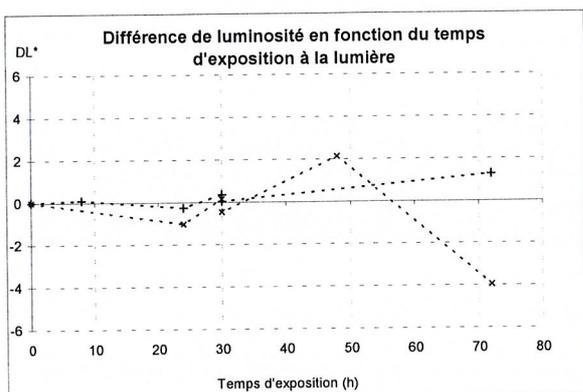
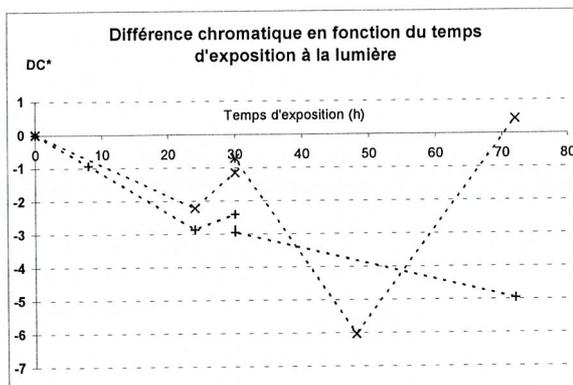
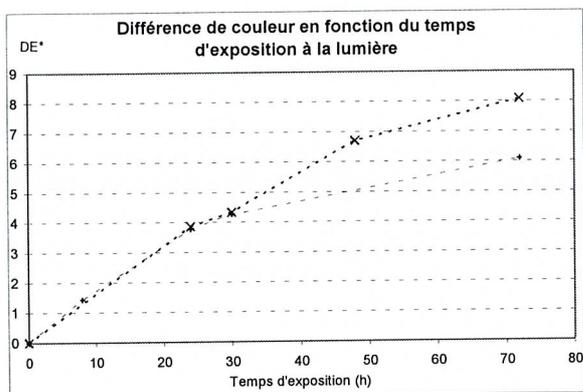
+ Recette 1870

x Recette 1875

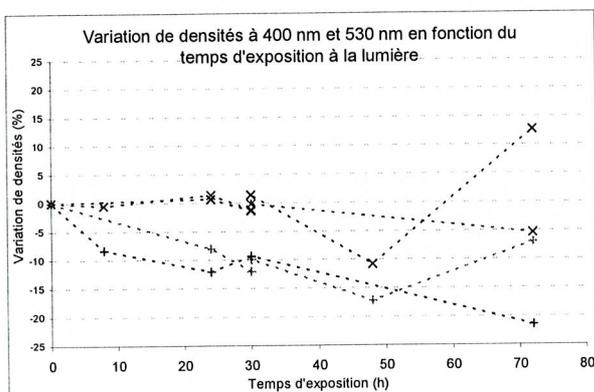
Annexe 1. Cinétiques de dégradation à la lumière des couches de gélatine colorées : influence des procédés de fabrication

Gélatine colorée avec du carmin - recettes 1870 et 1875

Conditions d'exposition: 50 %HR, 25 °C, 200 000 Lux



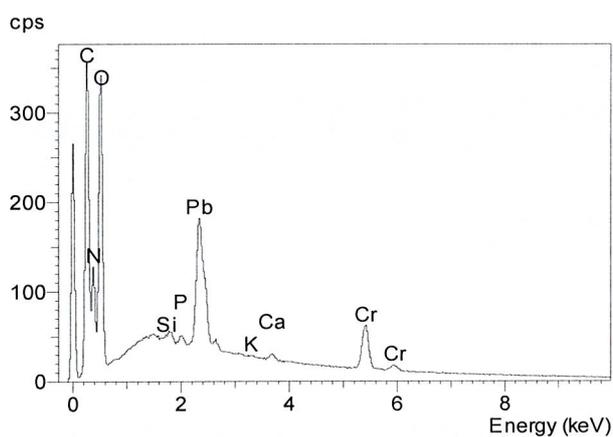
+ Recette 1870
x Recette 1875



+ 400 nm, recette 1870
x 530 nm, recette 1870
+ 400 nm, recette 1875
x 540 nm, recette 1875

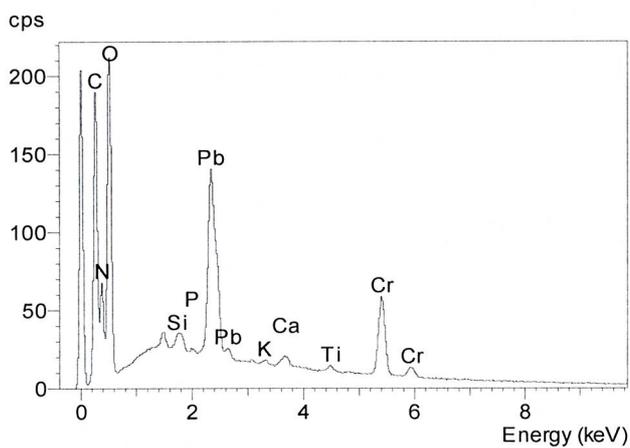
Annexe 2. Analyse des gélatines colorées et des monochromes originaux à l'aide du microscope électronique à balayage couplé à un analyseur élémentaire en dispersion d'énergie

Spectre de la gélatine colorée avec du chromate de plomb, recette 1870



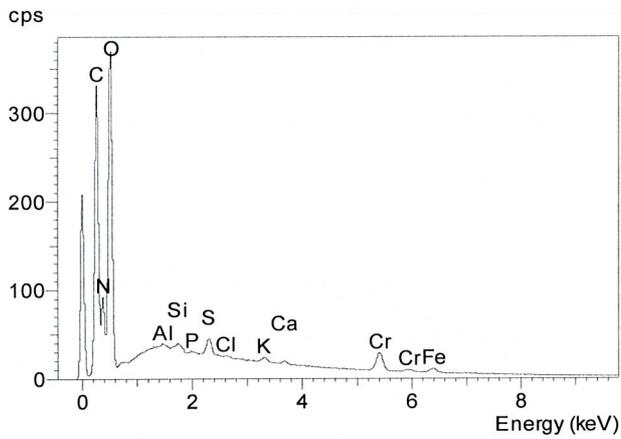
Elément	%
Na	0,73
Al	0,59
Si	1,1
P	2,92
K	0,61
Ca	2,08
Cr	22,04
Pb	69,93
Total	100

Spectre de la gélatine colorée avec du chromate, recette 1875



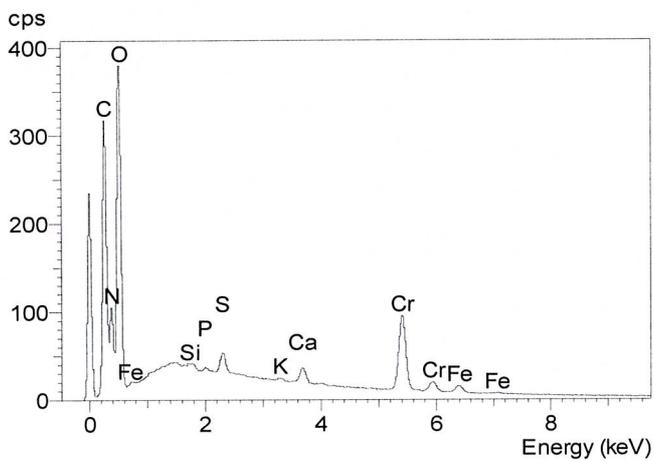
Elément	%
Al	2,12
Si	1,86
P	1,04
K	1,33
Ca	1,76
Ti	1,33
Cr	24,86
Pb	65,7
Total	100

Spectre de la gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1870



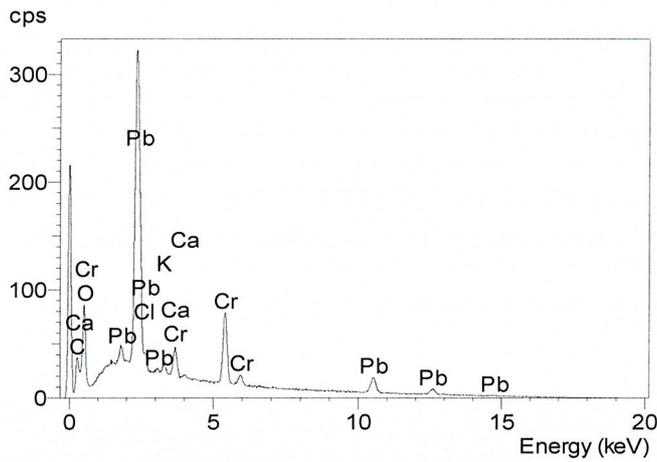
Elément	%
Na	1,20
Al	3,11
Si	6,78
P	1,85
S	18,73
Cl	2,47
K	5,65
Ca	4,04
Cr	41,67
Fe	14,49
Total	100

Spectre de la gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1875



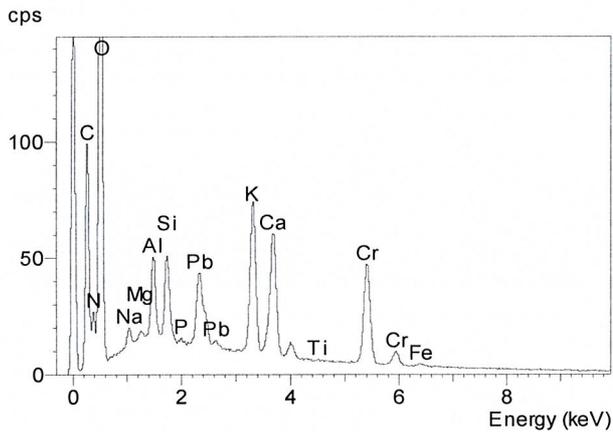
Elément	%
Al	1,09
Si	2,16
P	1,55
S	9,09
K	1,27
Ca	7,18
Cr	67,82
Fe	9,84
Total	100

Spectre du fragment original jaune 1



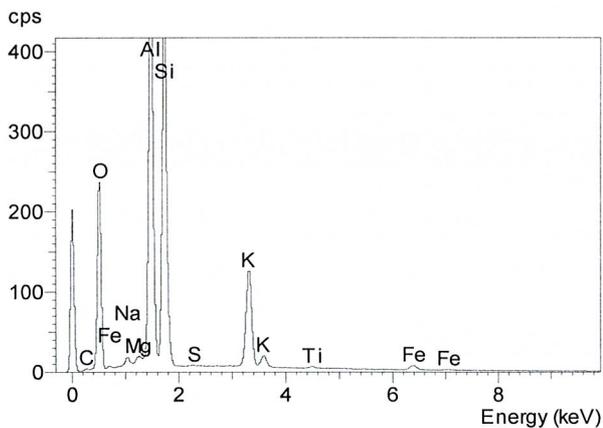
Elément	%
K	1,71
Ca	4,78
Cr	15,97
Pb	77,54
Total	100

Spectre du fragment original jaune 2



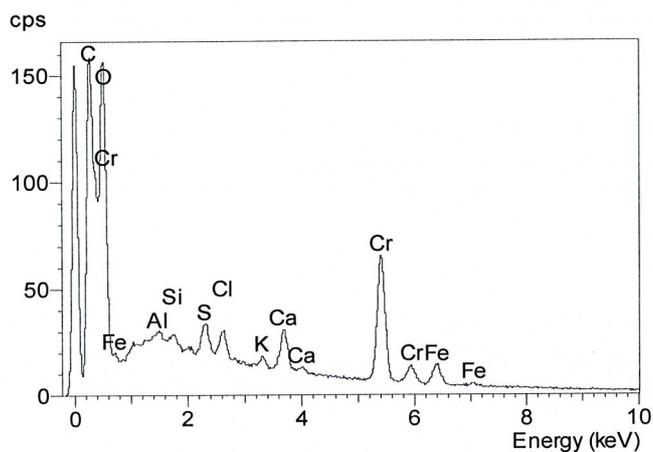
Elément	%
Na	3,07
Mg	0,79
Al	7,76
Si	8,05
P	0,76
K	19,03
Ca	17,98
Cr	24,26
Fe	0,8
Pb	17,49
Total	100

Spectre du fragment original de mica



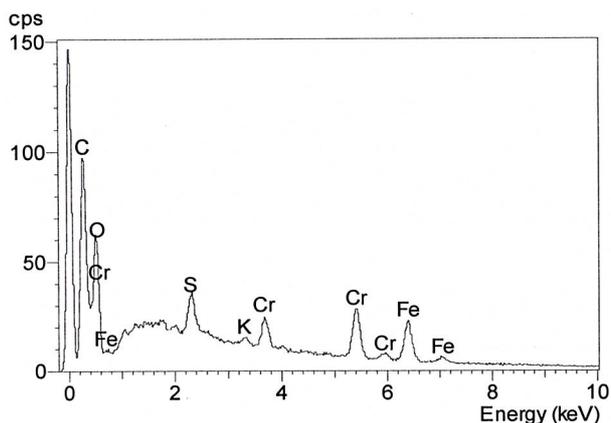
Elément	%
Na	1,22
Mg	0,43
Al	31,79
Si	47,1
S	0,12
K	17,19
Ti	0,37
Fe	1,79
Total	100

Spectre du fragment original bleu 1



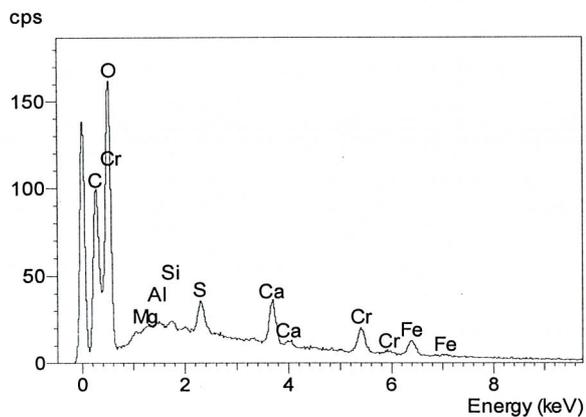
Elément	%
Al	3,13
Si	4,63
P	1,83
S	10,14
Cl	4,59
K	2,55
Ca	10,21
Cr	51,19
Fe	11,73
Total	100

Spectre du fragment original bleu 2



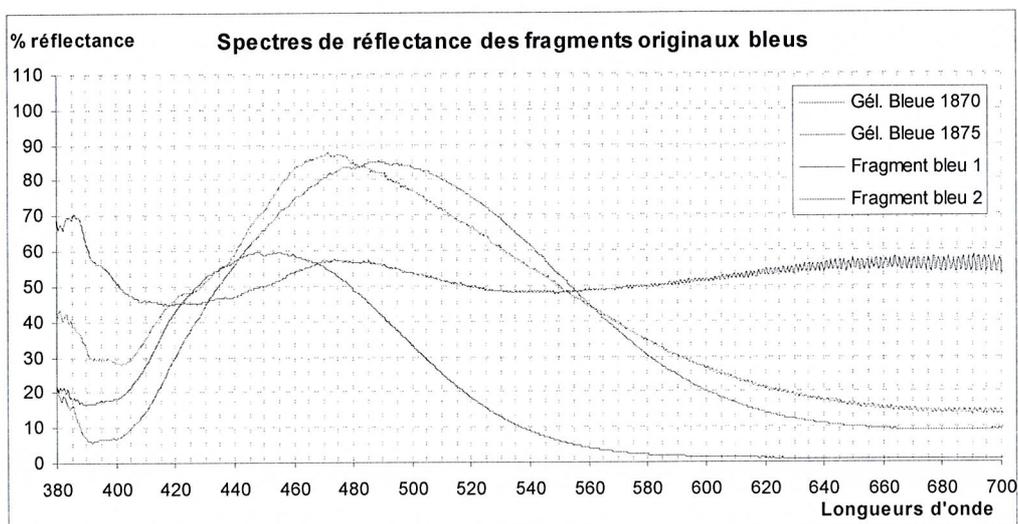
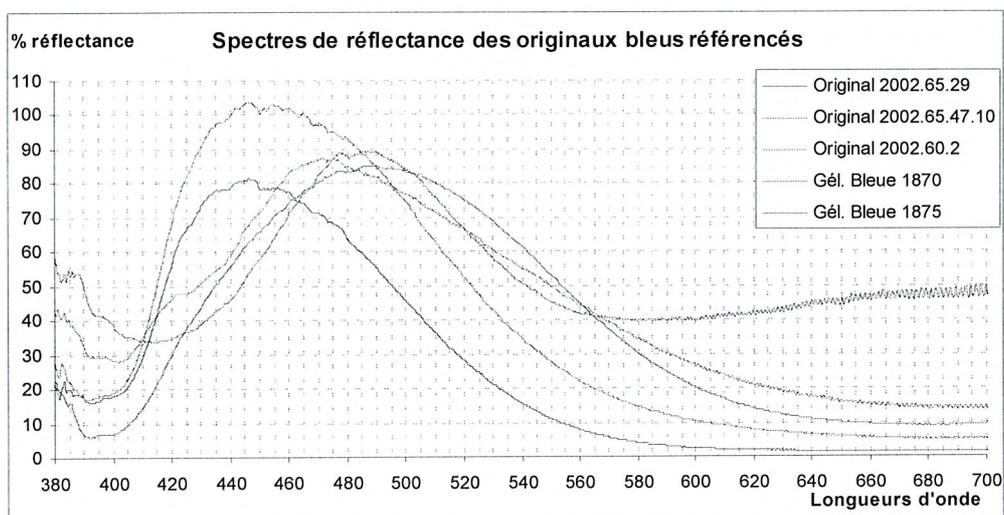
Elément	%
S	14,54
K	2,46
Ca	11,88
Cr	32,52
Fe	38,6
Total	100

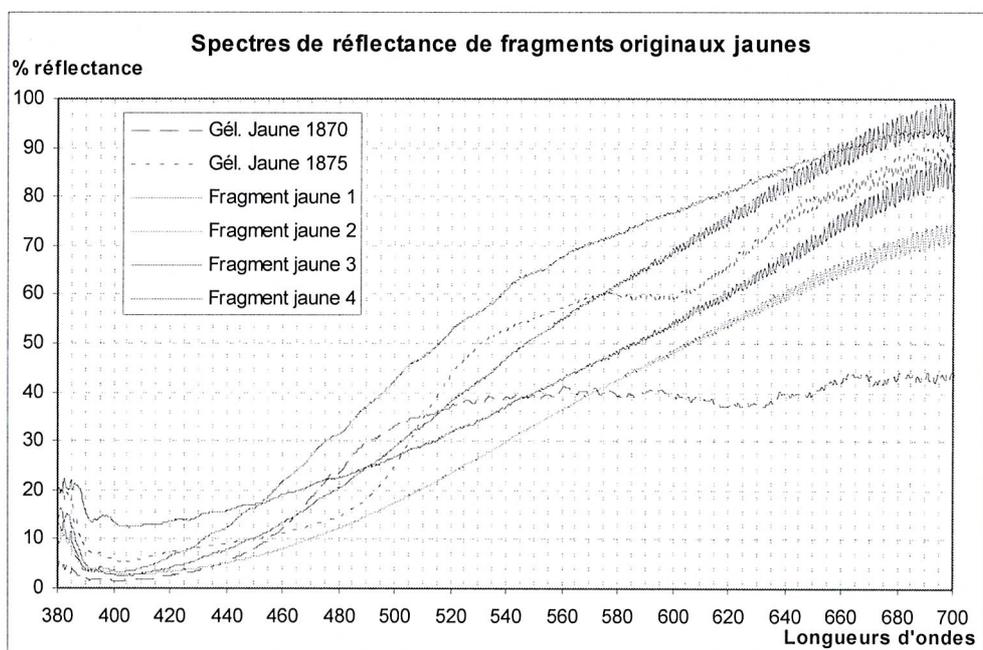
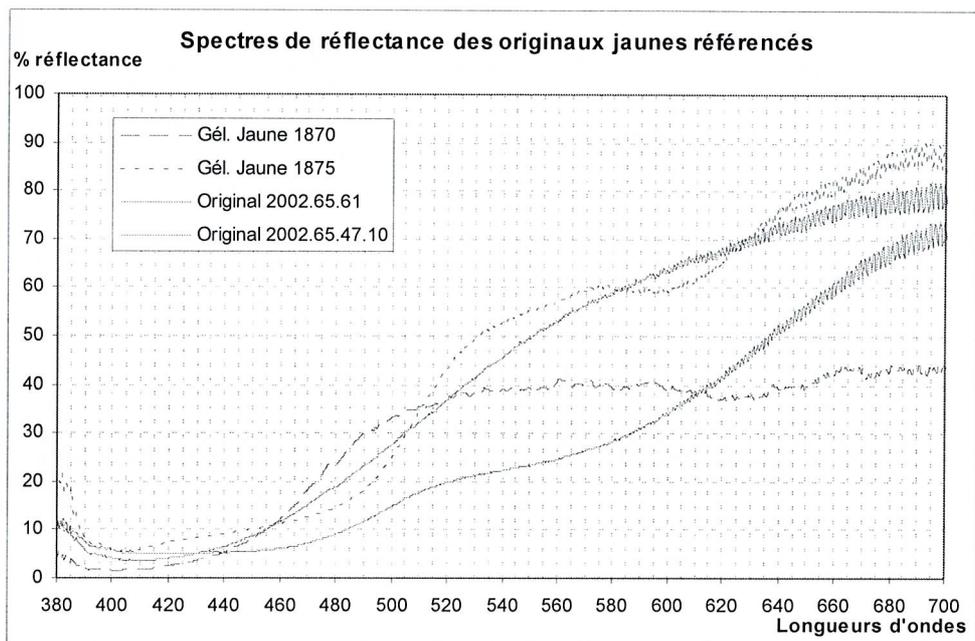
Spectre du fragment original bleu 3

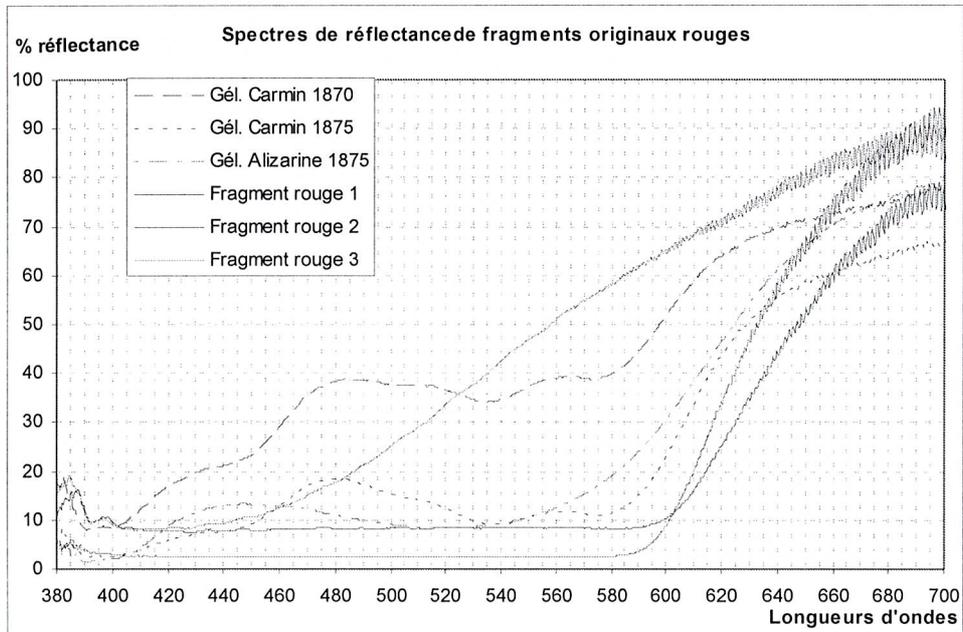
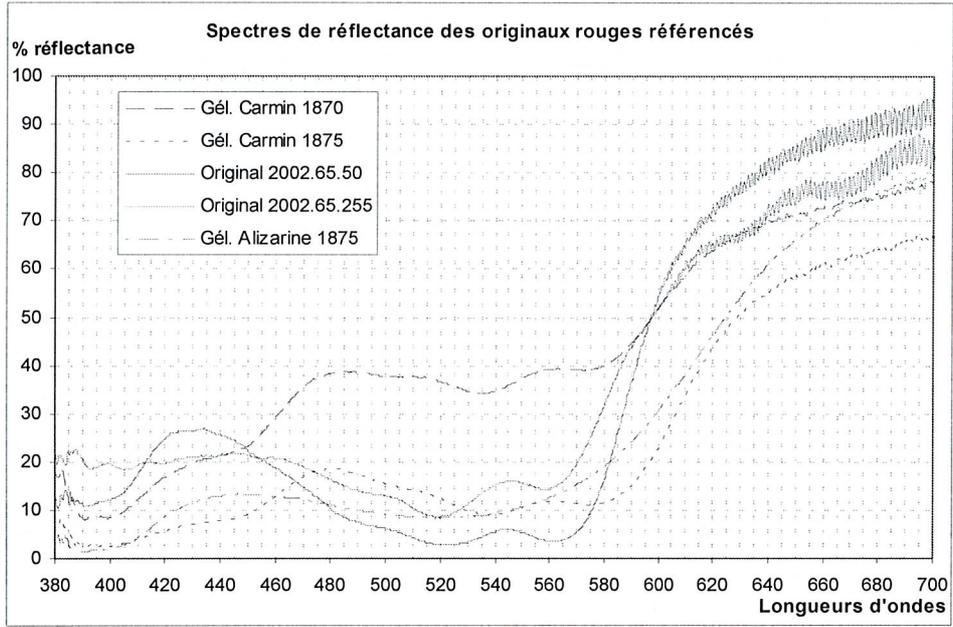


Elément	%
Na	8,38
Mg	3,31
Al	2,45
Si	3,72
P	2,01
Si	14,38
K	1,18
Ca	23,58
Cr	22,18
Fe	18,81
Total	100

Annexe 3. Spectres de réflectance des gélatines colorées et des originaux de Ducos du Hauron

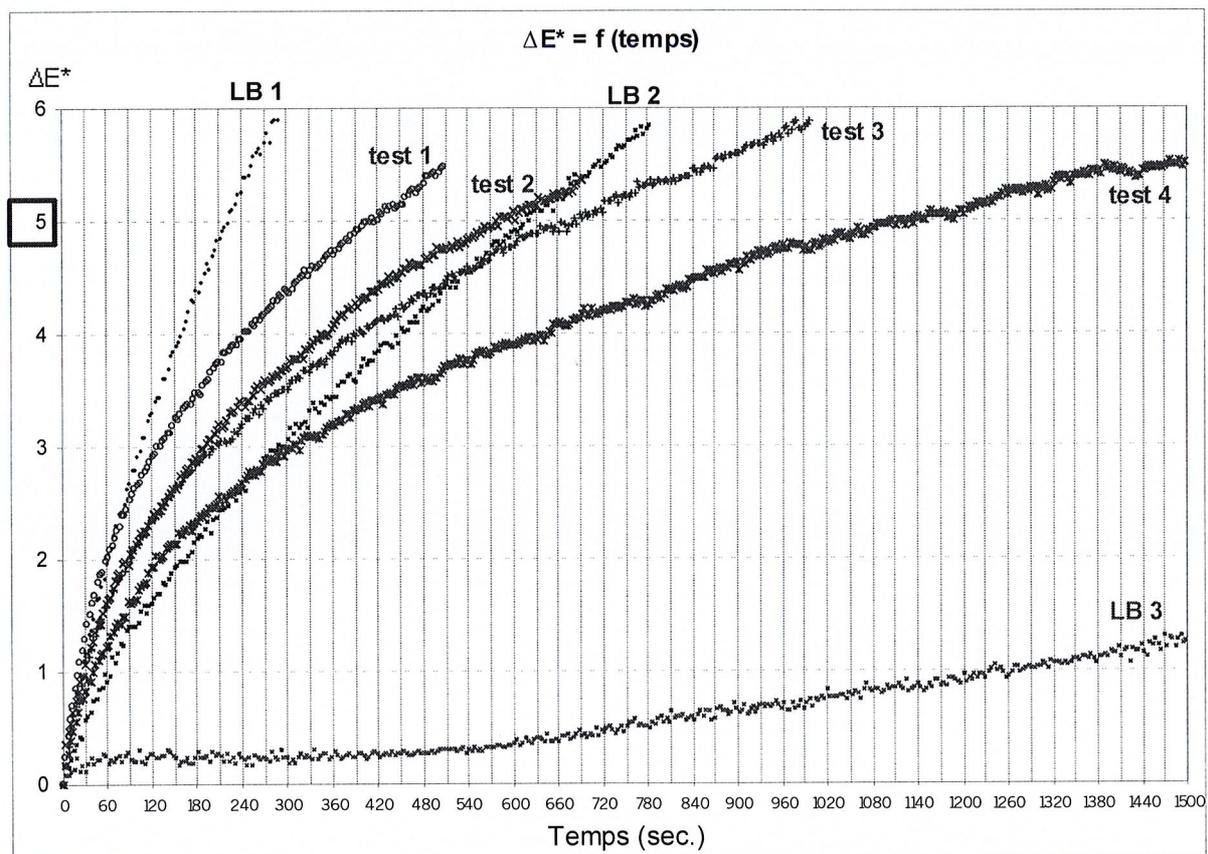






Annexe 4. Courbes de variations de l'écart de couleurs en fonction du temps pour les gélatines colorées soumises au test de micro-vieillessement à la lumière

Gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1870 : monochrome a

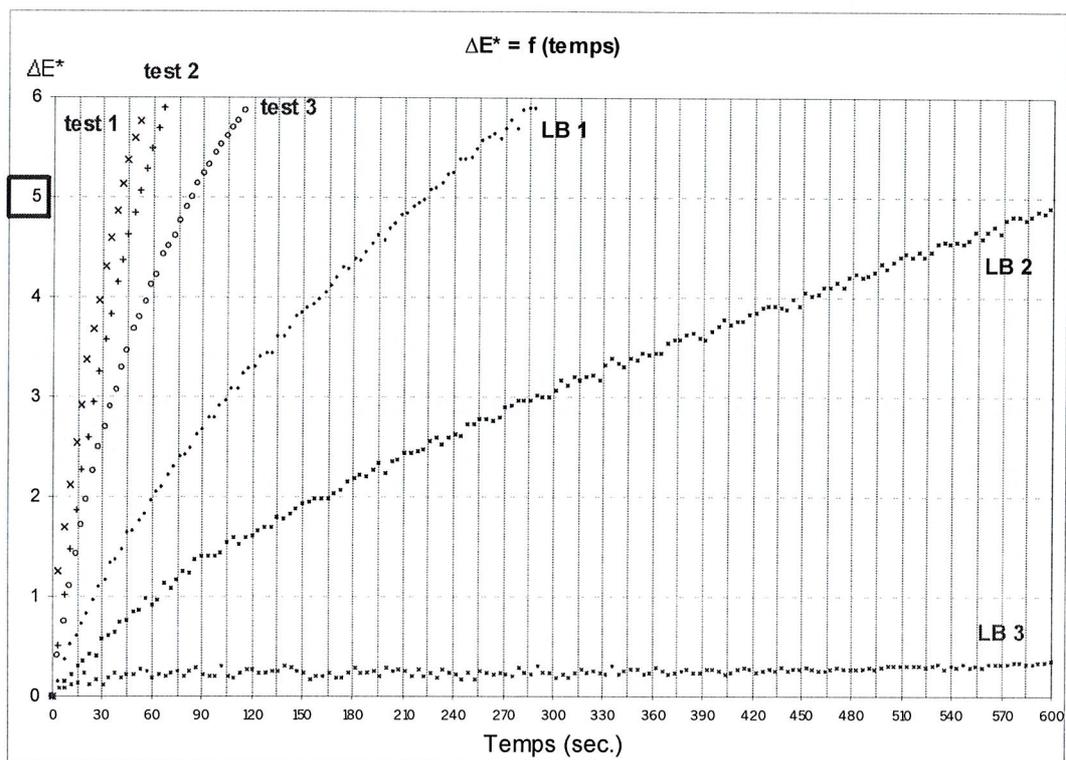


BWS1/LB 1 : première plage de la gamme étalon de laine bleue

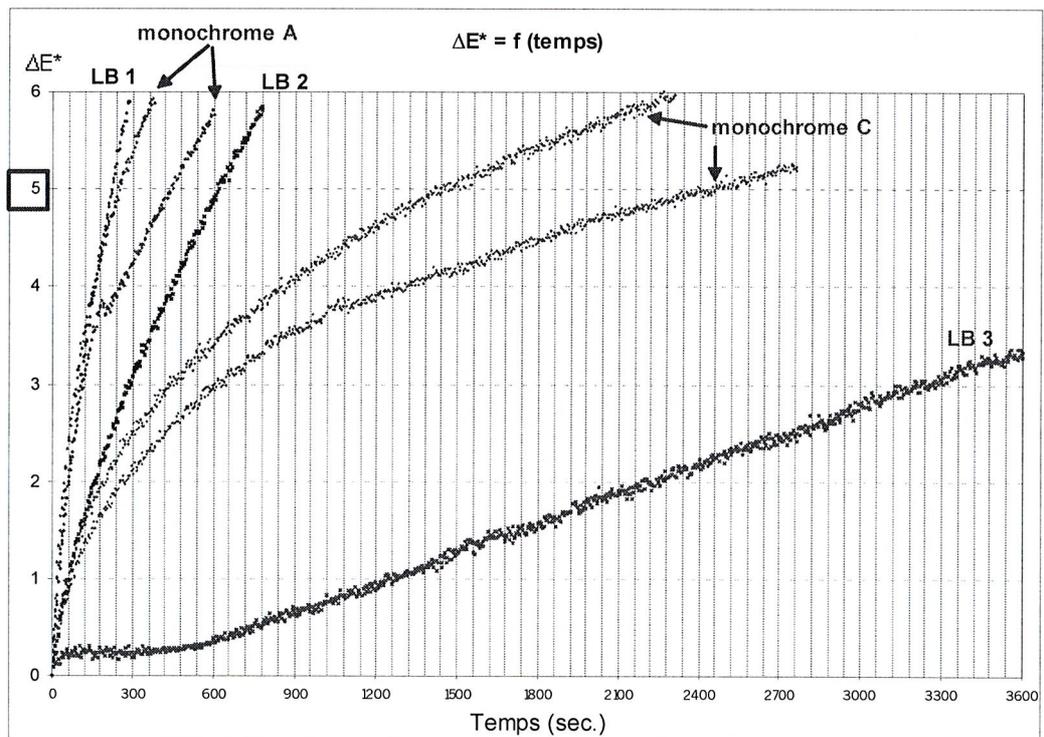
BWS1/LB 2 : deuxième plage de la gamme étalon de laine bleue

BWS1/LB 3 : troisième plage de la gamme étalon de laine bleue

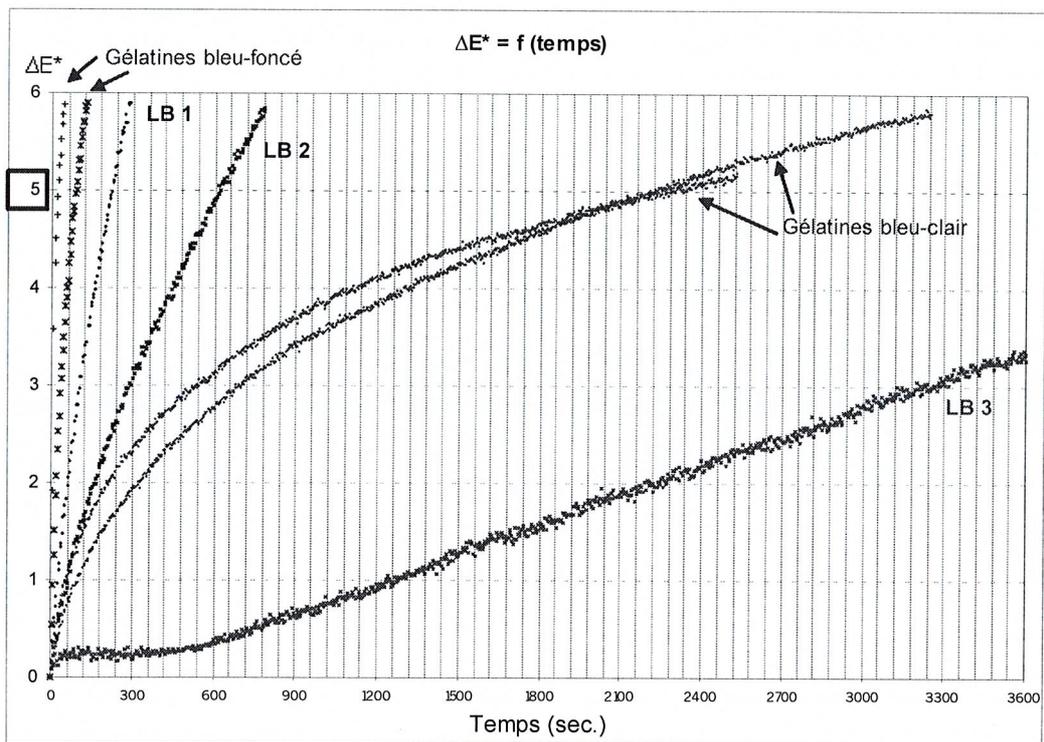
Gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1870 : monochrome b



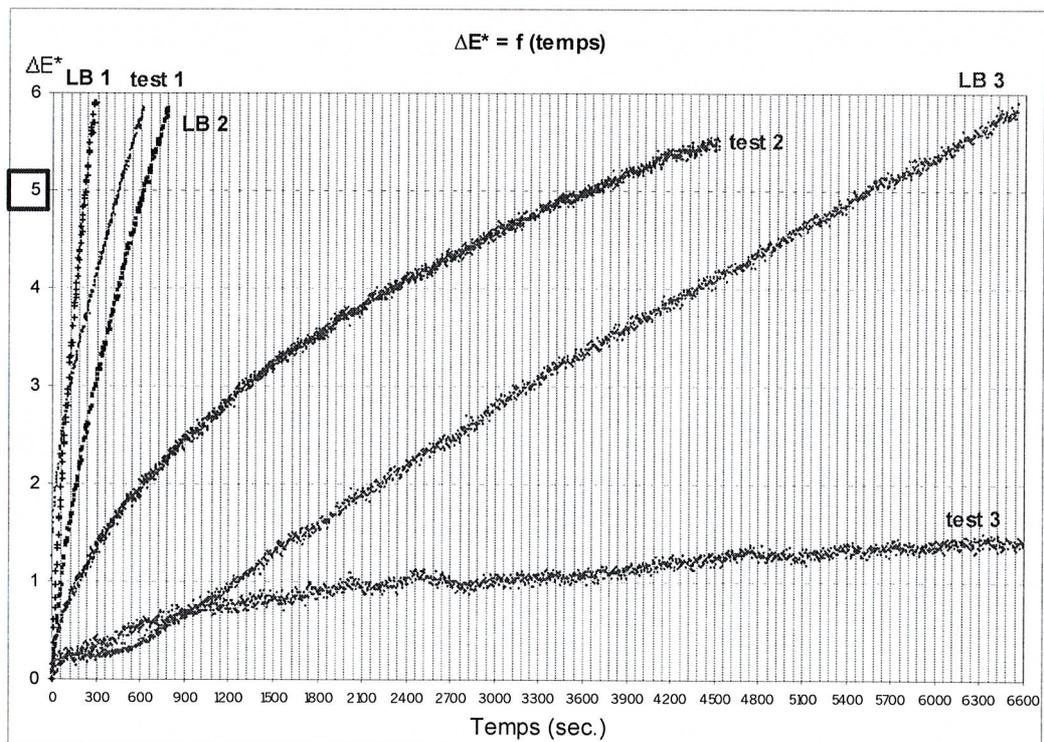
Gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1870 : monochromes a et c



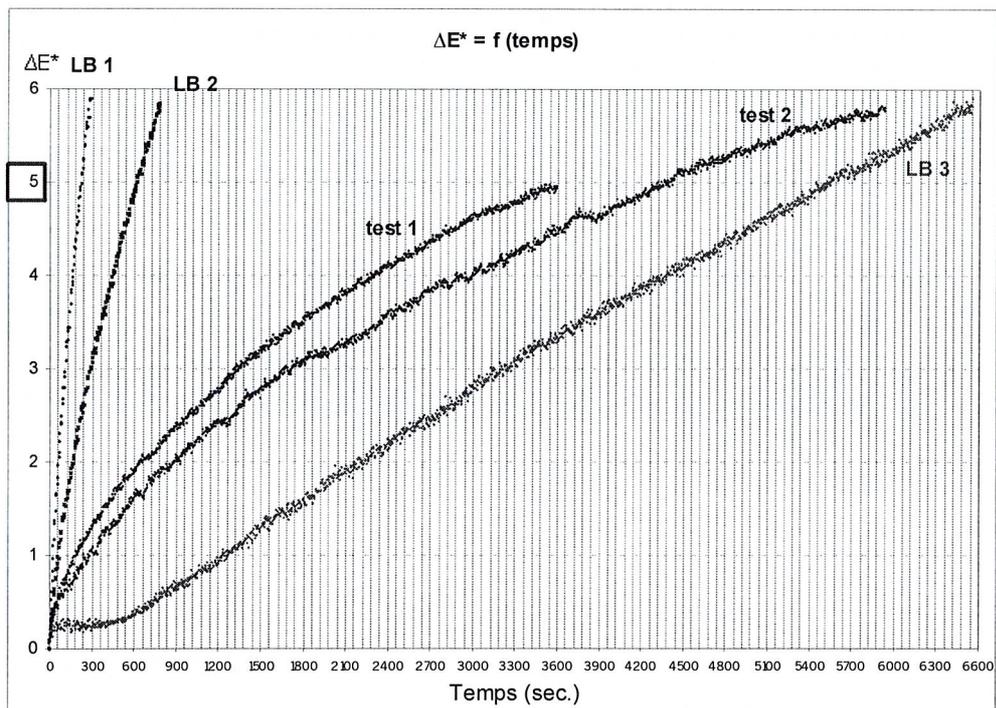
Gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1870 : monochrome c



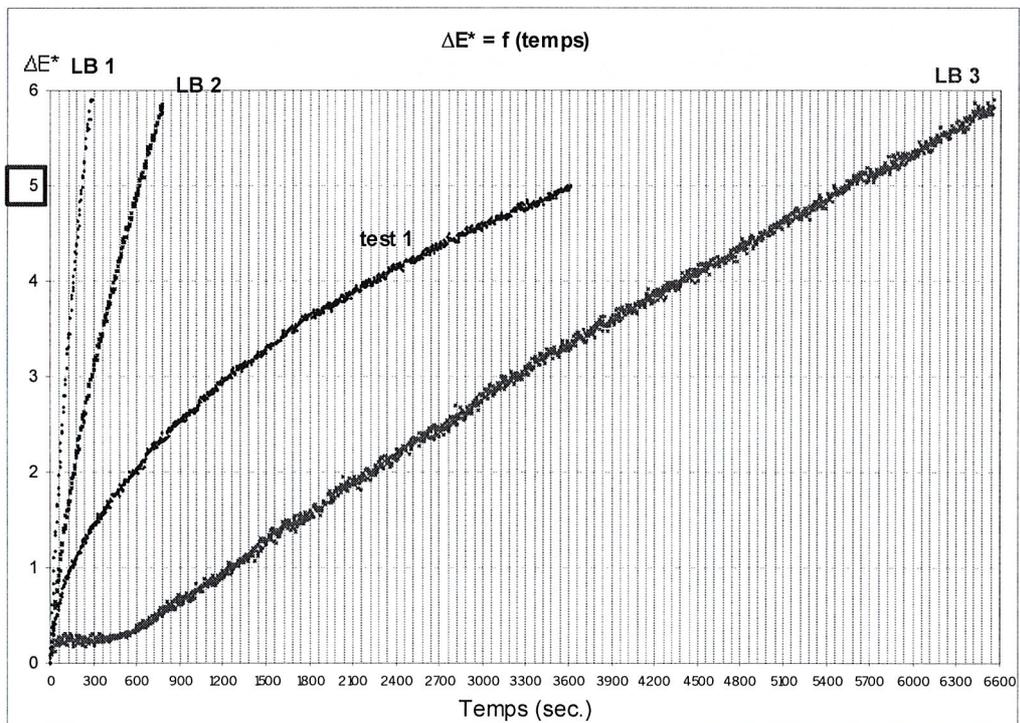
Gélatine colorée avec du bleu de Prusse, recette 1875



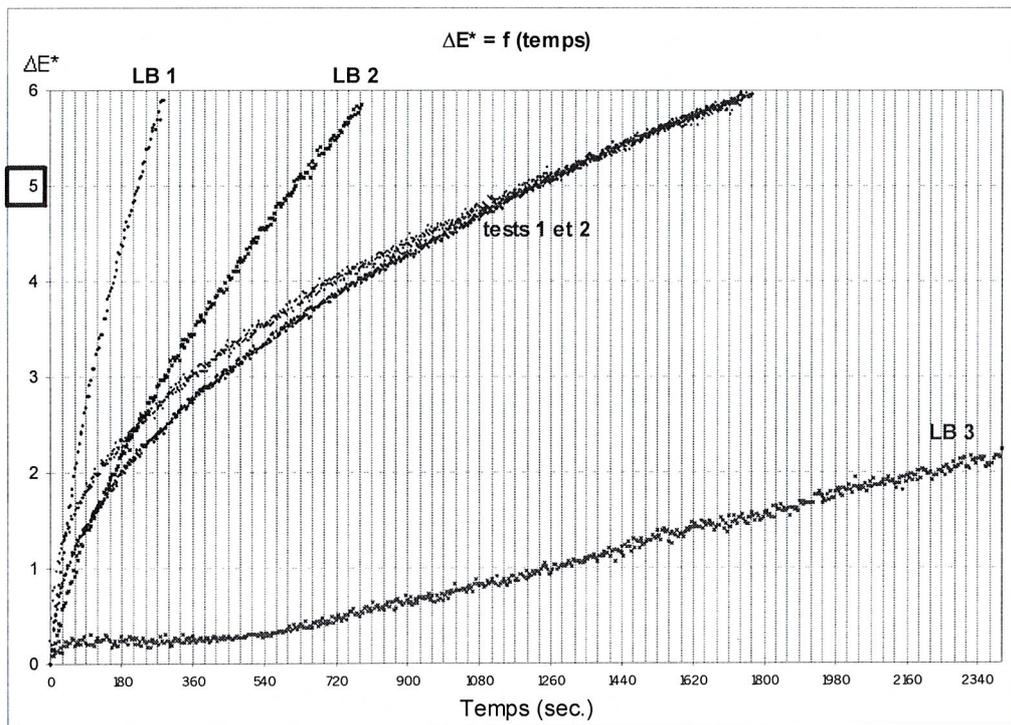
Gélatine colorée avec du rouge carmin, recette 1870



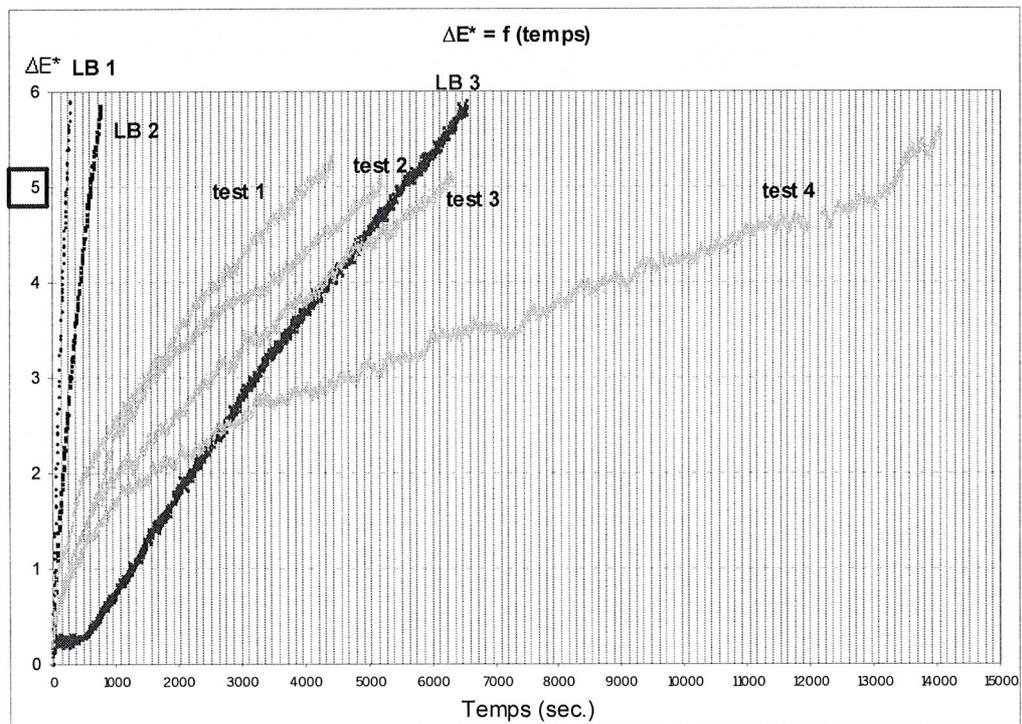
Gélatine colorée avec du rouge carmin, recette 1875



Gélatine colorée avec du rouge alizarine, recette 1875

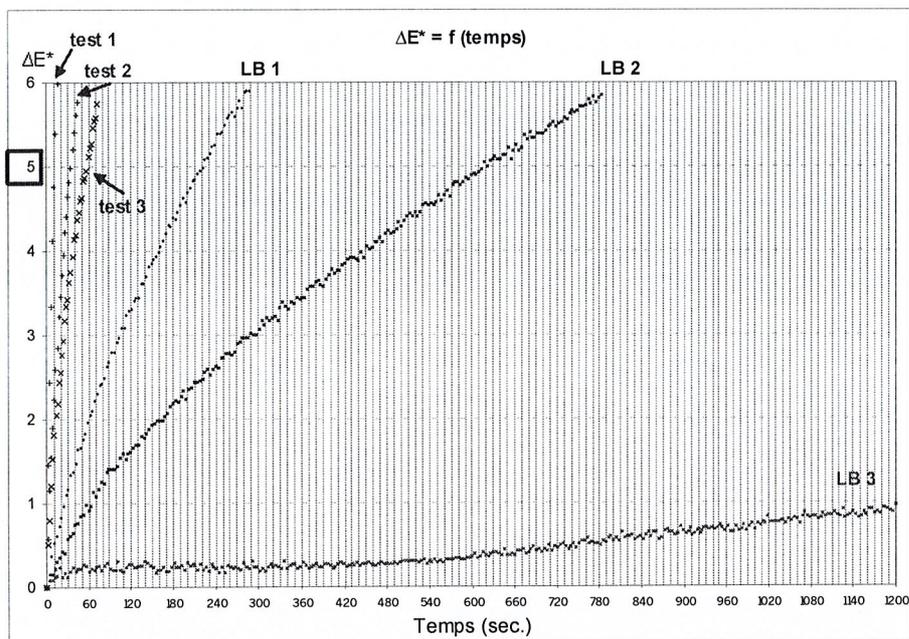


Gélatine colorée avec du jaune de chrome, recette 1870

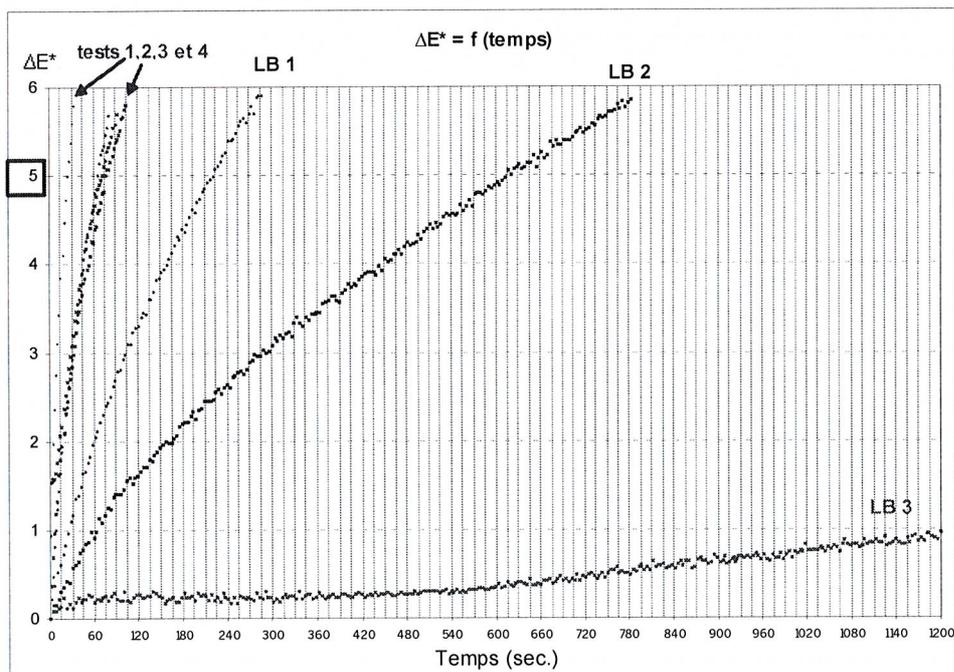


Annexe 5. Courbes de variations de l'écart de couleurs en fonction du temps pour les monochromes originaux soumis au test de micro- vieillessement à la lumière

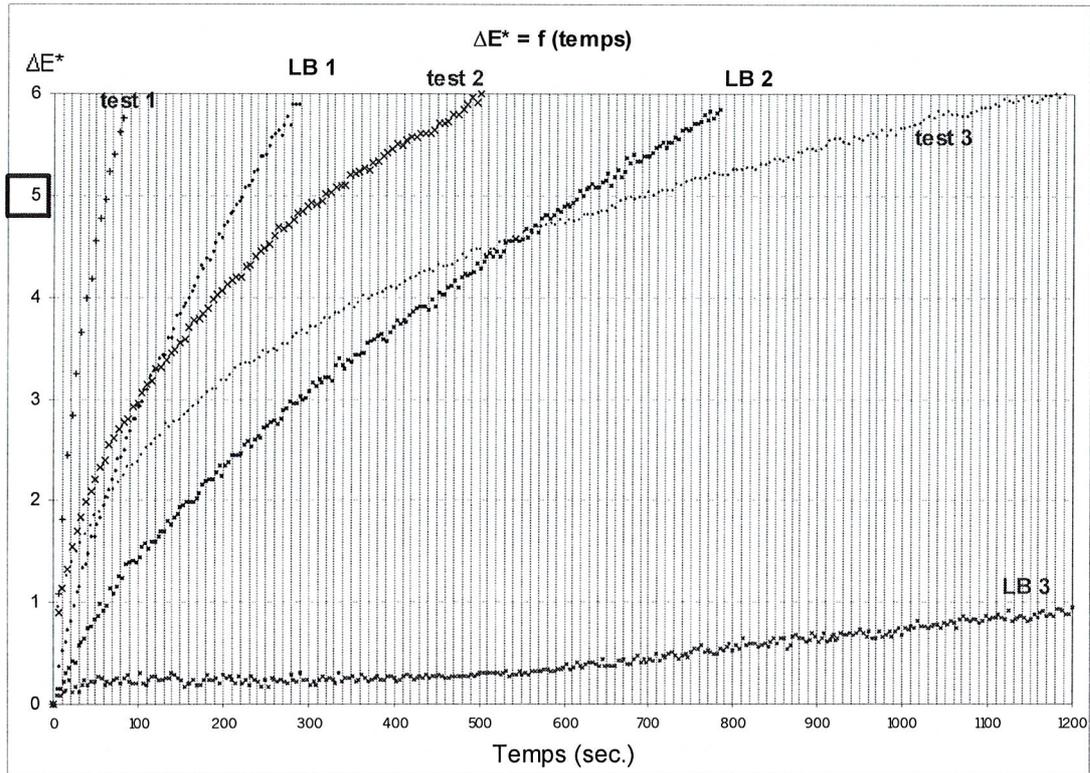
Monochrome bleu original n° 2002.65.29



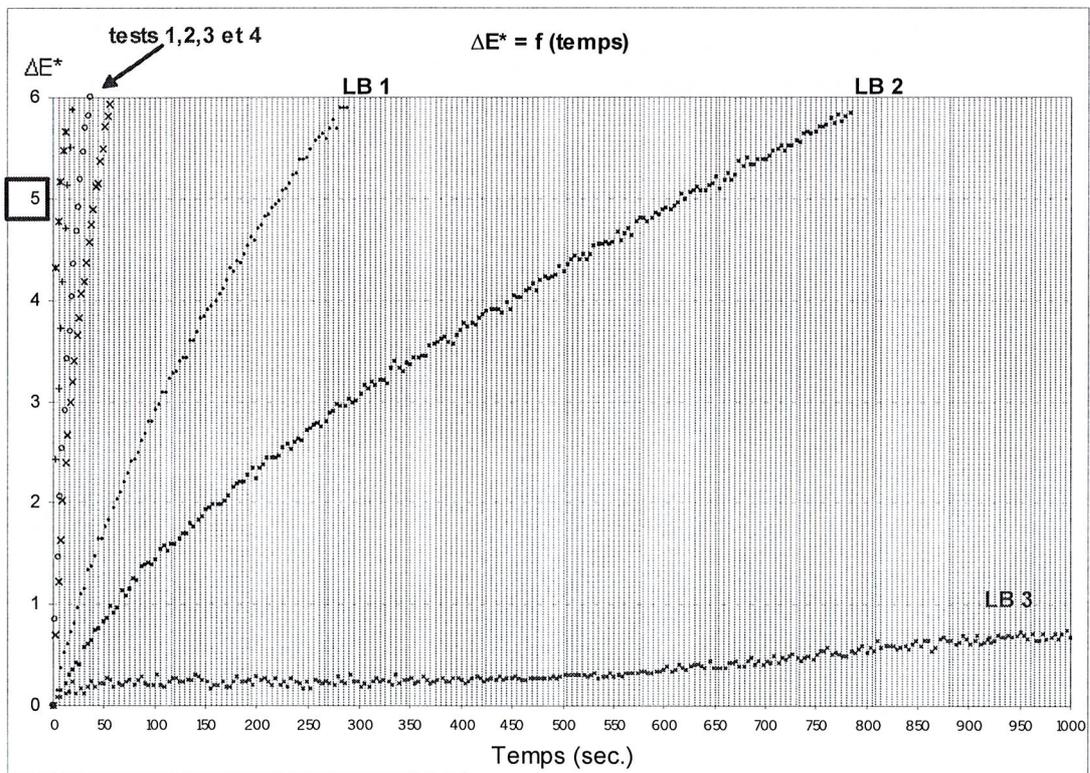
Monochrome bleu original n° 2002.60.2



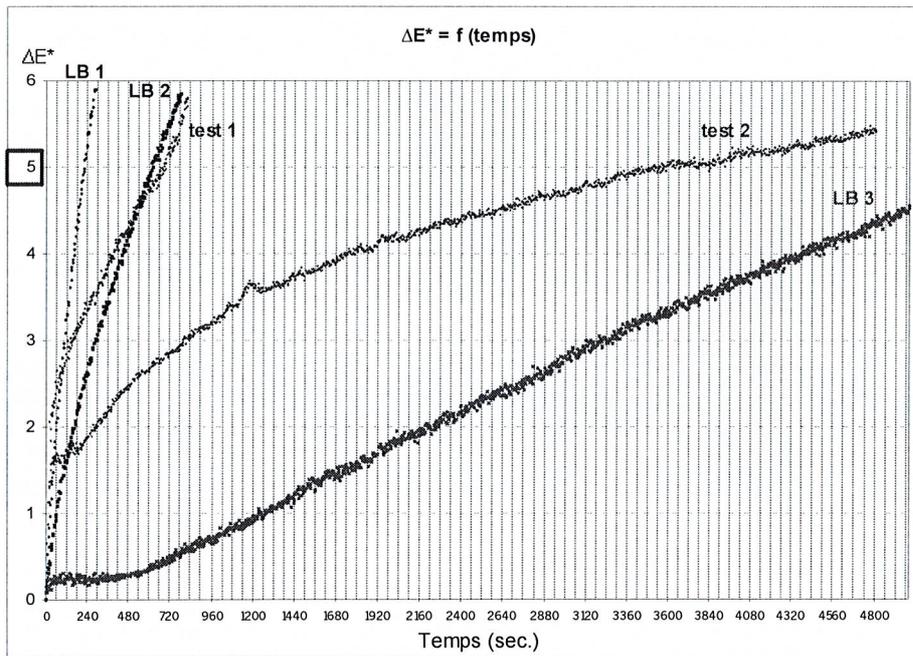
Monochrome bleu original, fragment 1 (sans référence)



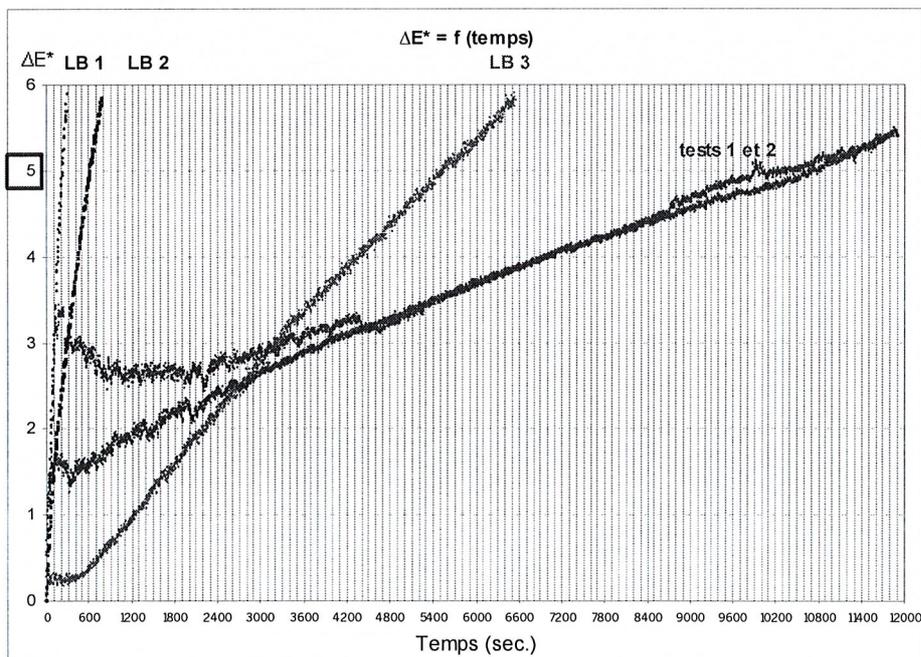
Monochrome bleu original, fragment 2 (sans référence)



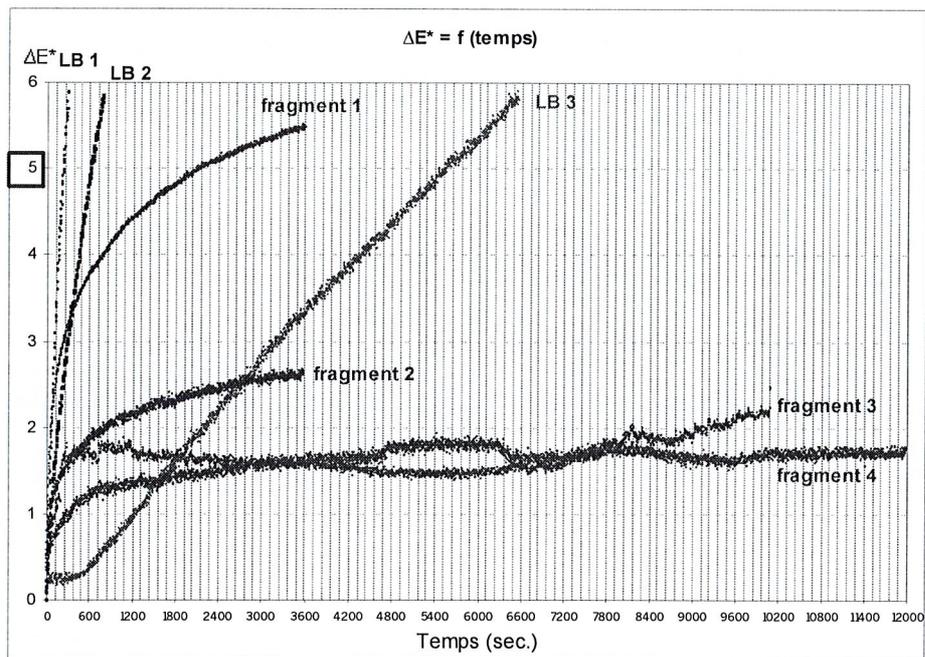
Monochrome rouge original n° 2002.65.255



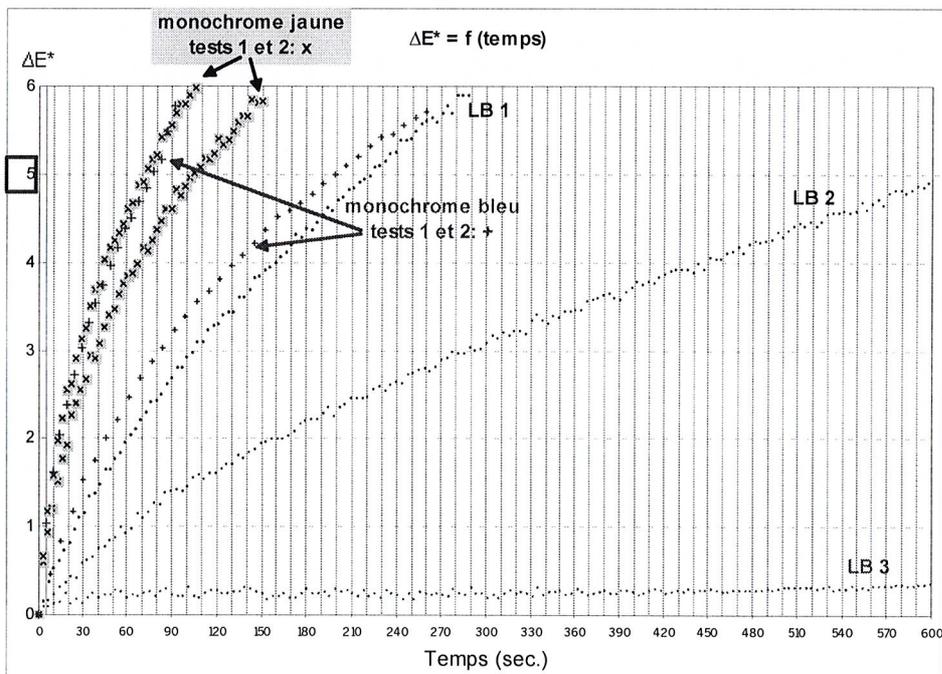
Monochrome rouge original n° 2002.65.50



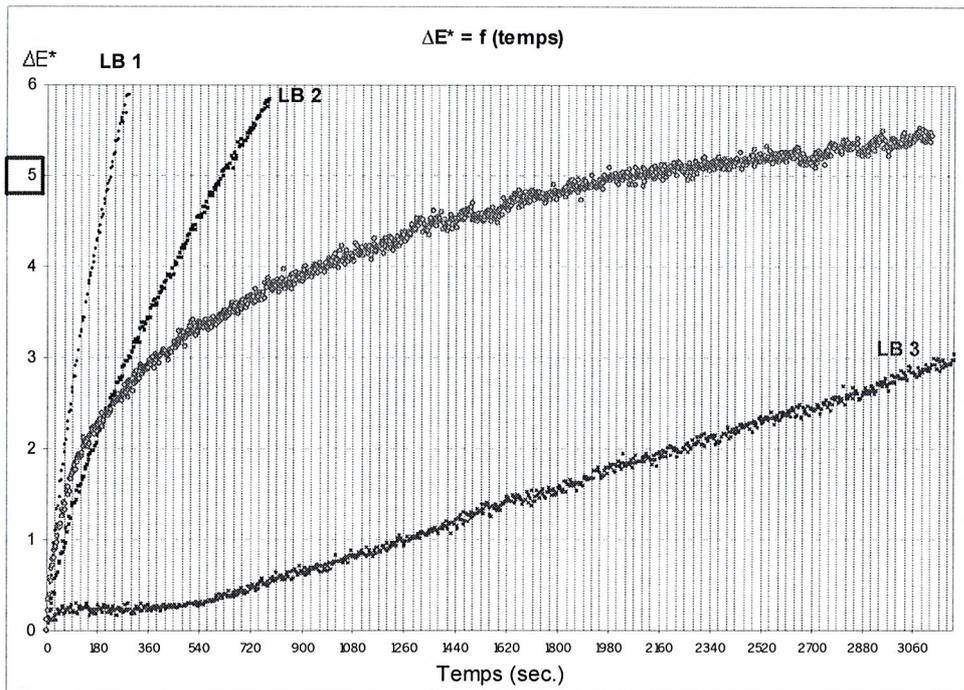
Monochromes rouges originaux, fragments 1,2,3 et 4



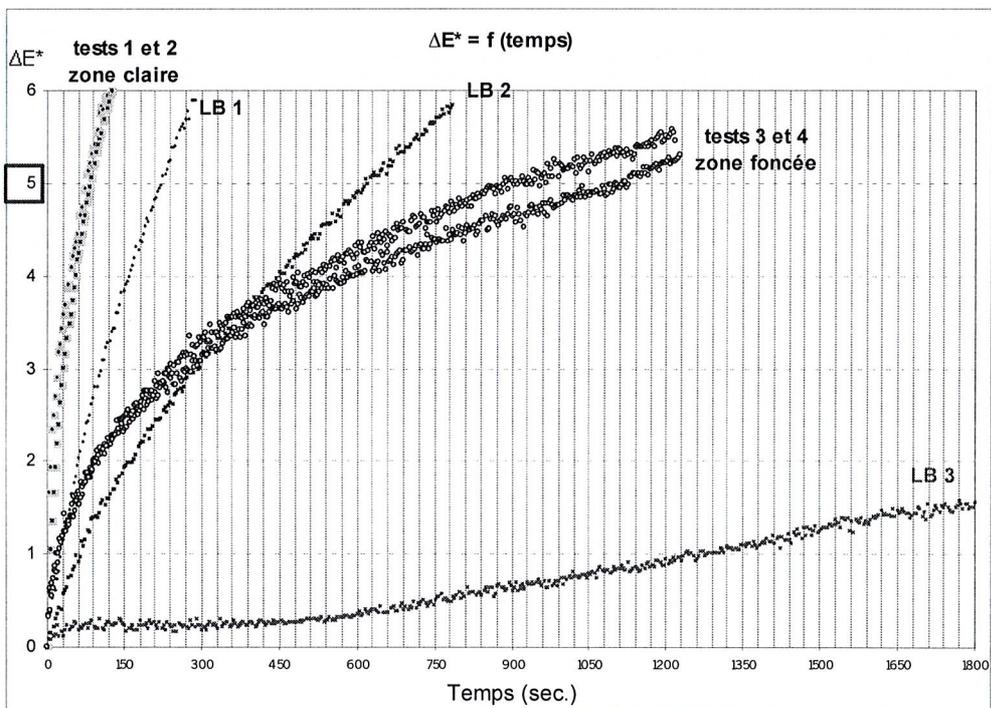
Monochromes jaune et bleu originaux n° 2002.65.47.12



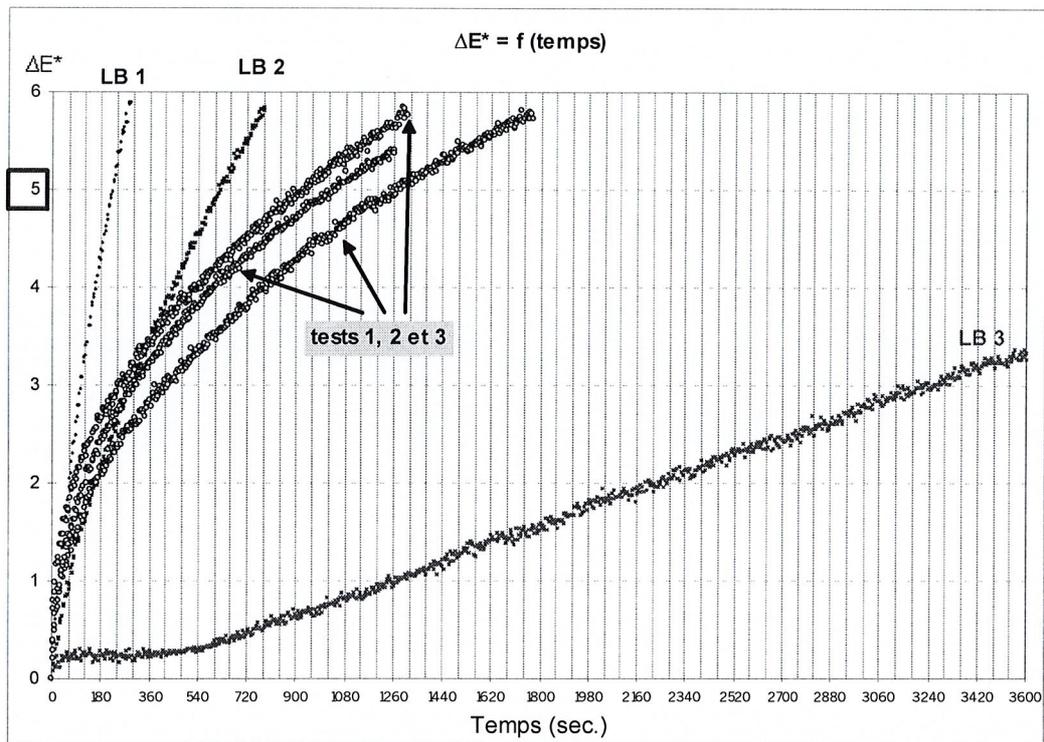
Monochrome jaune original n° 200.65.61



Monochrome jaune original, fragment 1 (sans référence)



Monochrome jaune original, fragment 2 (sans référence)



Annexe 6. Matériel utilisé pour les mesures au musée Nicéphore Niépce

Spectroradiomètre Minolta CS1000 dans sa valise contenant :

Pastille de halon blanc

Objectif macro

Câble RS232

Connecteur

Rallonge RS232

Rallonge USB

Pied photo du spectroradiomètre

Lampe sur pied

avec lampe de rechange

Alimentation stabilisée

avec câble pour la lampe

et câble secteur

Ordinateur Twinhead

avec disquette

Ordinateur ASUS

Matériel prêté par le musée Nicéphore Niepce à Chalon

Pupitre porte document

avec cales d'épaisseur

Annexe 7. Tableaux des valeurs L*a*b* calculées à partir des répartitions spectrales d'énergie mesurées au spectroradiomètre à Chalon

Alger	L*	a*	b*	
	55.40	0.84	16.46	DUC1mer caché
	67.36	6.84	26.33	DUC1ciel caché
	51.28	12.54	32.22	DUC1toit caché
	76.68	3.32	22.67	ciel caché2
	73.38	6.69	30.23	ciel
	46.25	-8.07	7.95	forêt
	62.65	-2.19	18.81	mer
	71.20	11.23	41.88	toit
	33.67	-7.83	6.95	immeuble sombre
	46.62	-4.15	19.16	façade immeuble
	45.82	-6.93	11.52	forêt proche
	65.58	11.04	39.36	toit antenne TV

Agen	L*	a*	b*	
	31.18	-9.87	-2.79	fourche tronc
	33.36	-9.32	-1.20	sac poubelle
	47.87	-12.58	1.27	ciel
	41.40	-13.33	-0.48	volet bleu
	40.10	-8.54	7.70	forêt1
	41.96	-1.52	13.00	herbes folles

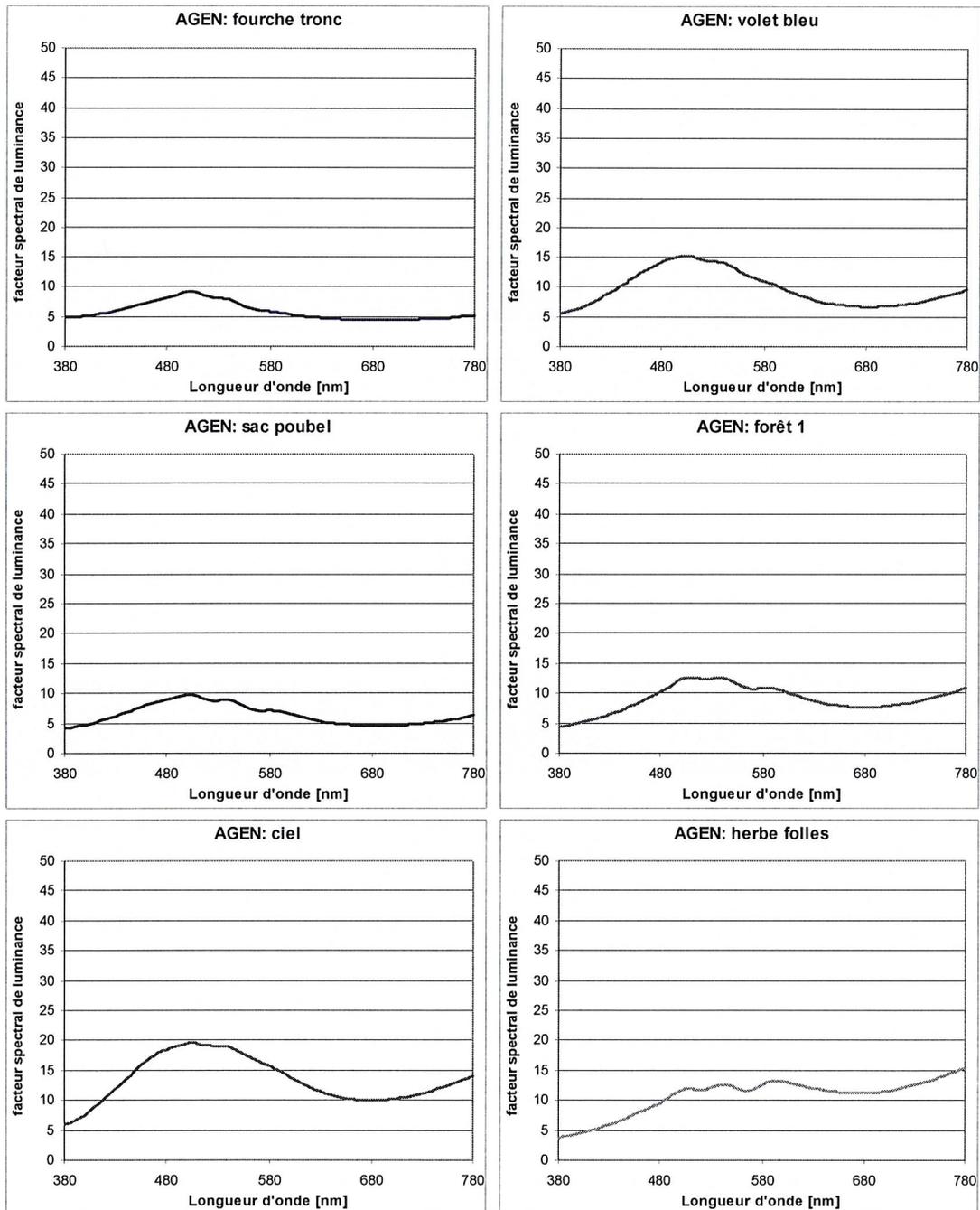
Fleurs	L*	a*	b*	
	51.29	27.60	48.41	rouge
	70.09	5.53	41.99	jaune frontière
	68.71	1.26	20.52	blanc bleu
	53.08	-0.29	40.30	vert feuille
	66.90	4.46	38.10	jaune flash
	47.05	22.94	38.06	orange
	59.43	7.24	19.32	pointe grise
	72.86	-0.51	18.74	fleur blanche
	79.54	2.37	21.76	blanc "pur"
	31.23	8.16	23.65	vert foncé

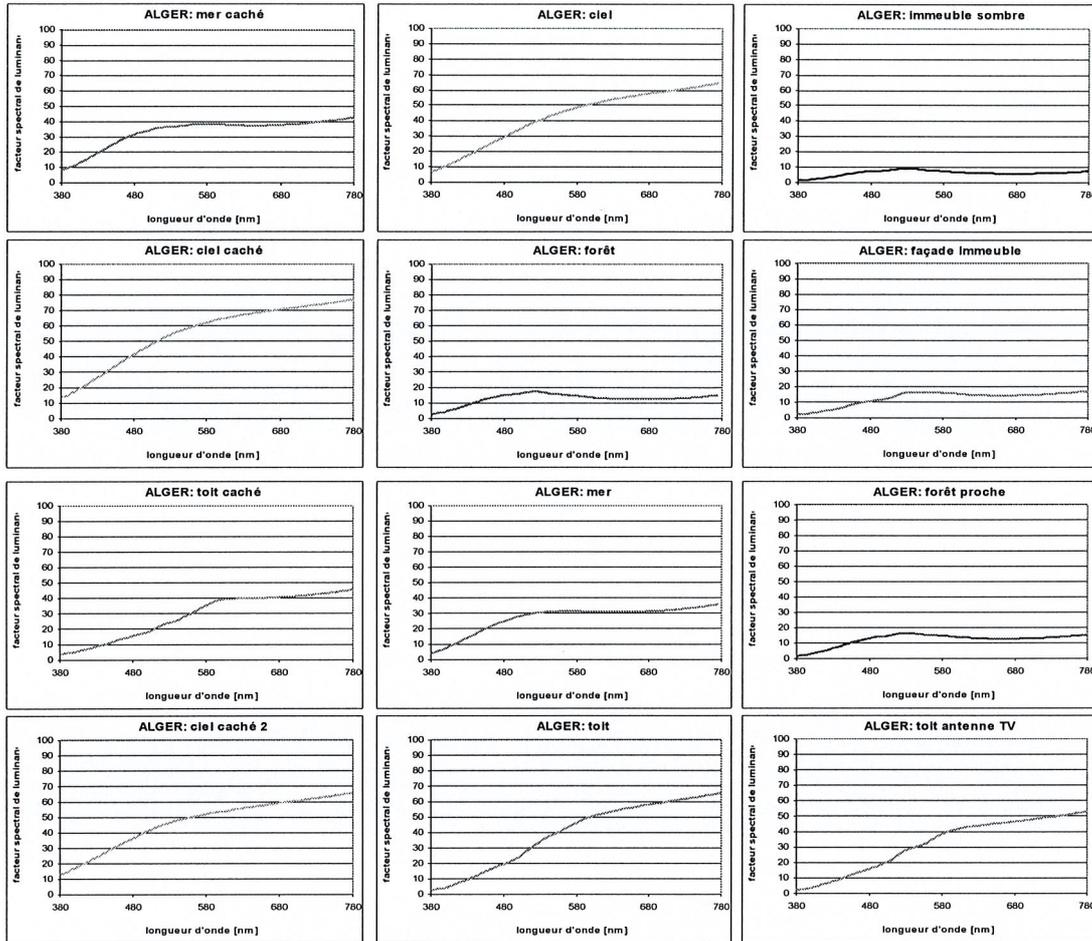
Lourdes	L*	a*	b*	
	57.83	1.75	33.90	herbe
	38.58	-4.58	23.98	bordure rivière
	50.12	-5.62	10.30	eau
	60.73	1.69	33.42	herbe jaune

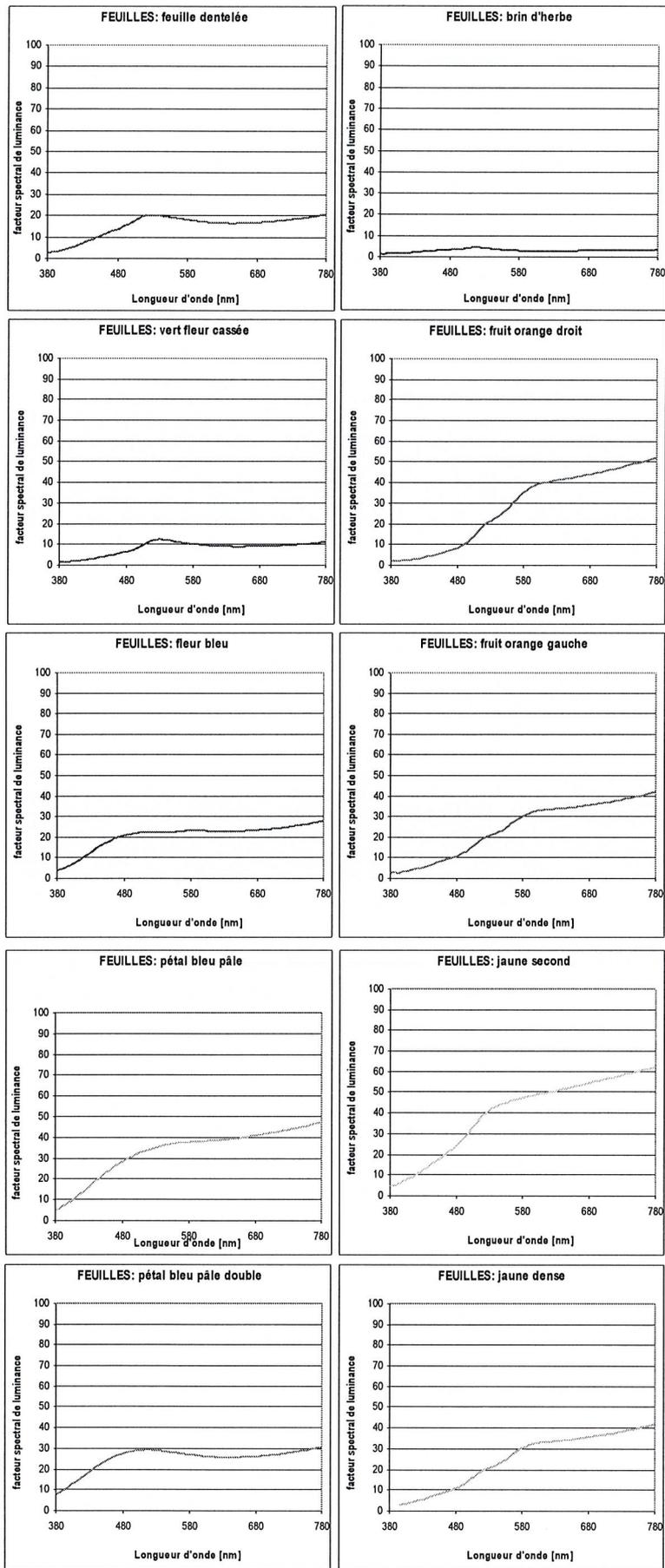
Feuilles	L*	a*	b*	
	50.35	-7.34	17.67	feuille dentelée
	39.02	-8.78	19.90	vert fleur cassée
	55.23	-1.55	9.99	fleur bleu
	67.50	-0.07	19.88	pétale bleu pâle
	59.96	-5.10	5.74	pétalesbleudoubl
	21.89	-6.35	3.00	brin d'herbe
	61.89	15.61	52.08	fruit orange D
	58.83	10.64	39.04	fruit orange G
	72.85	10.58	67.13	jaune dense
	73.28	3.30	36.87	jaune 2

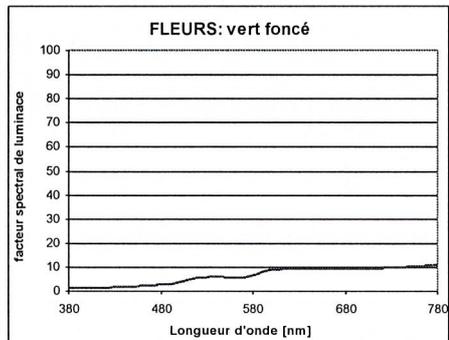
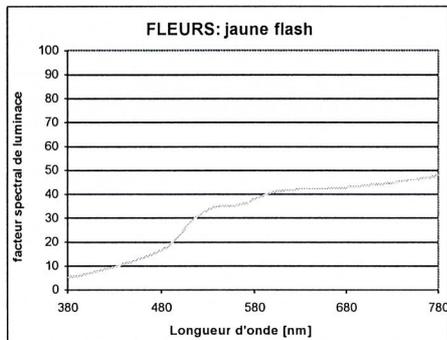
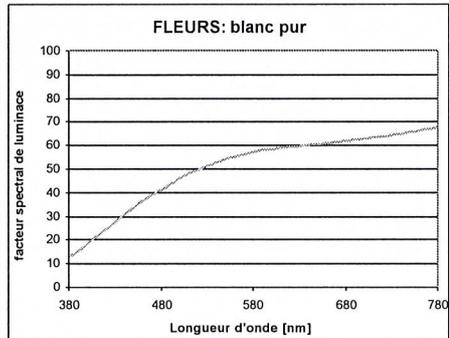
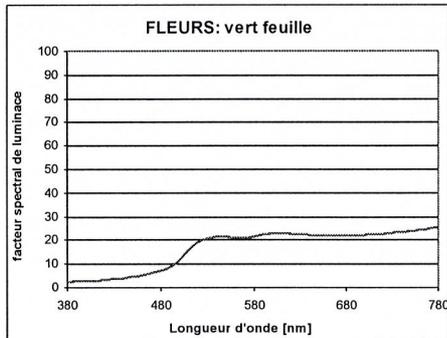
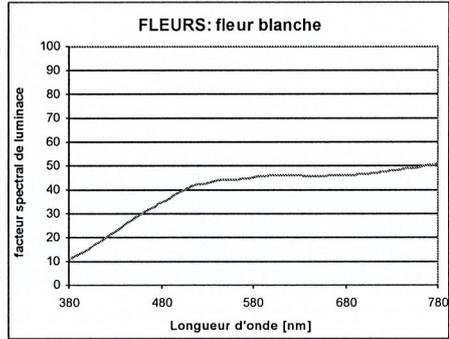
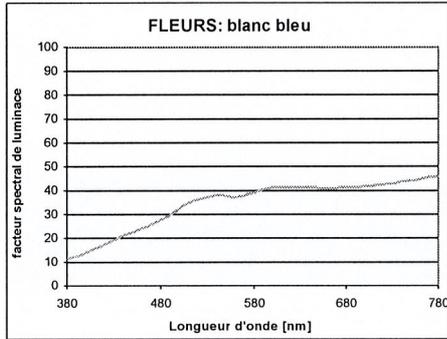
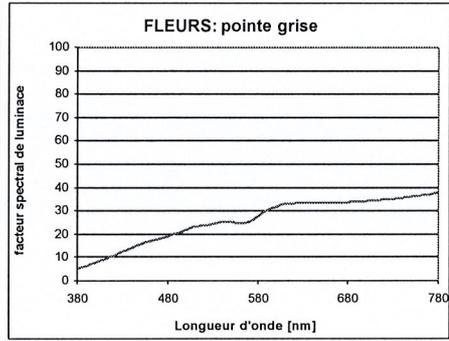
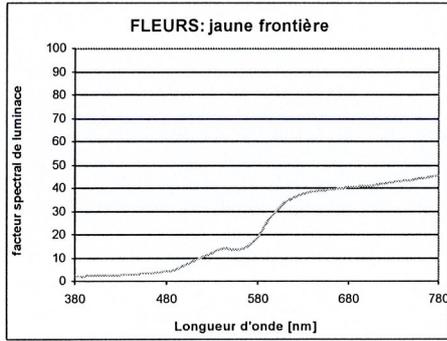
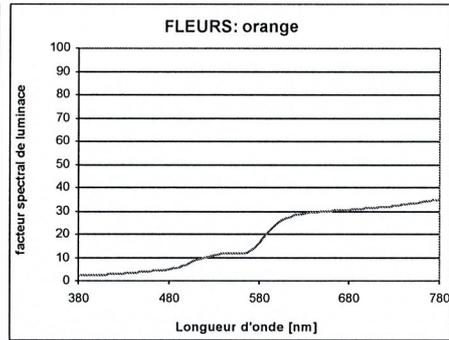
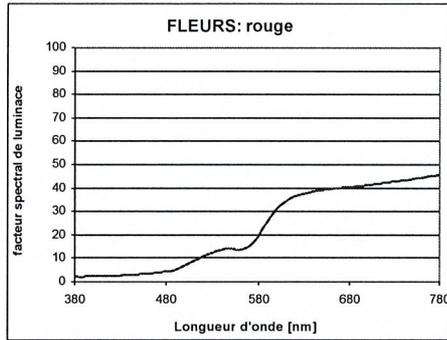
Gélatines	L*	a*	b*	
	59.99	-20.60	-27.43	gélatine bleu
	67.10	5.20	42.70	gélatine jaune

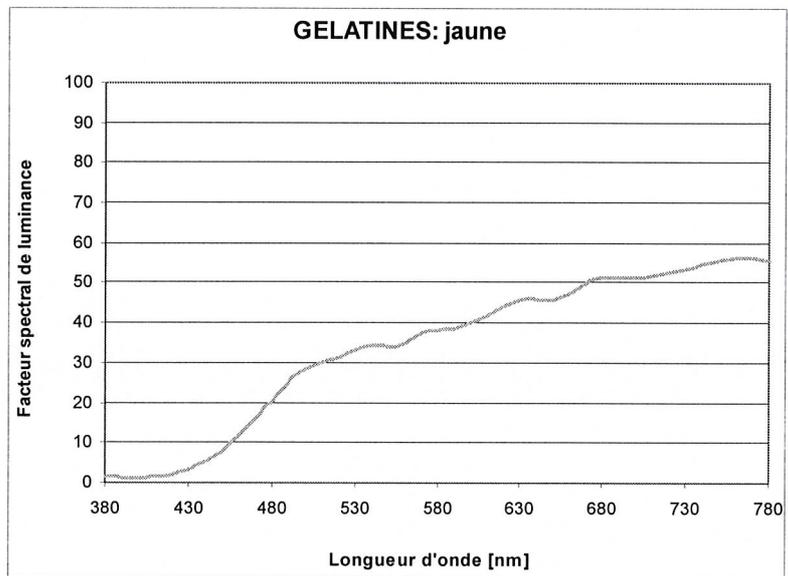
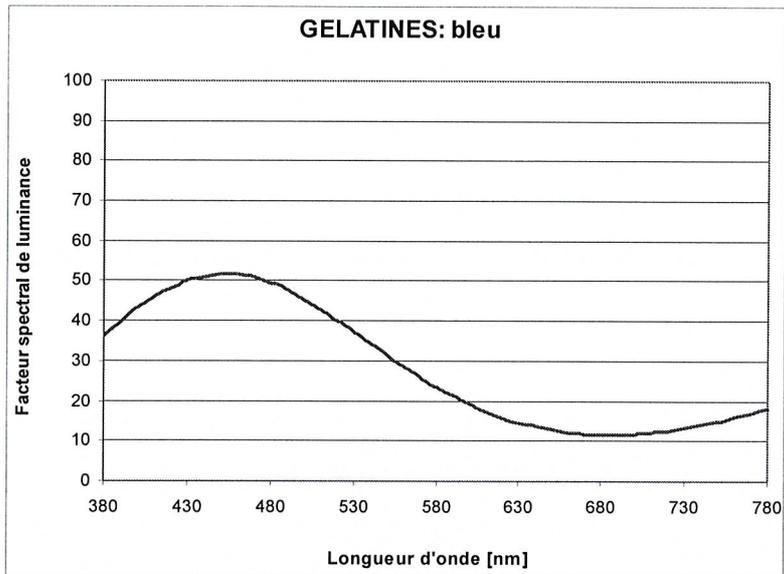
Annexe 8. Graphiques du facteur spectral de luminance des 6 photographies de Ducos du Hauron analysées

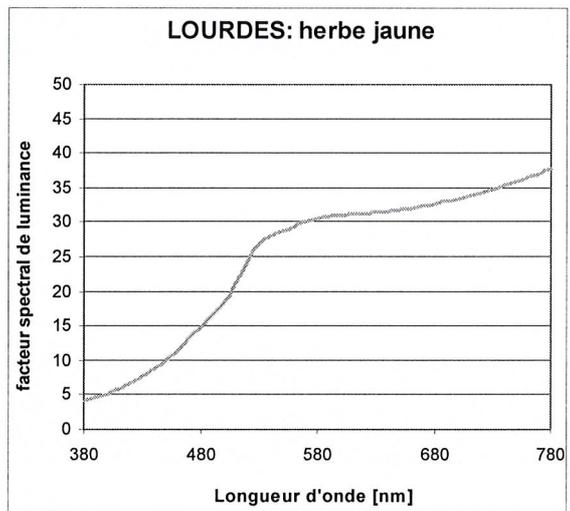
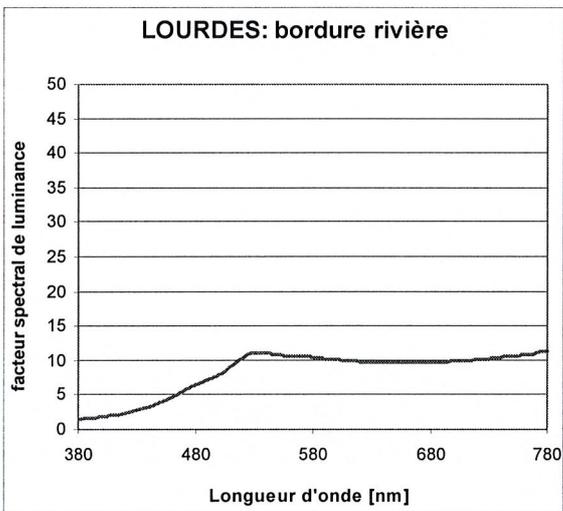
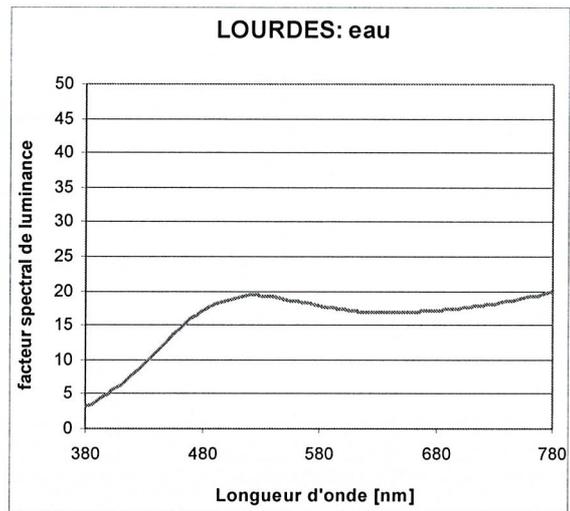
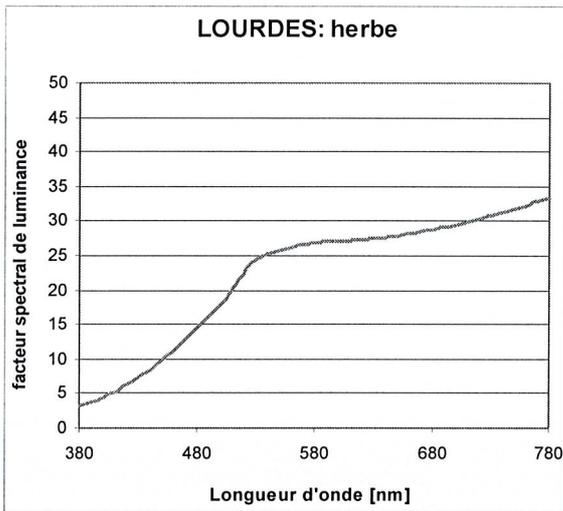




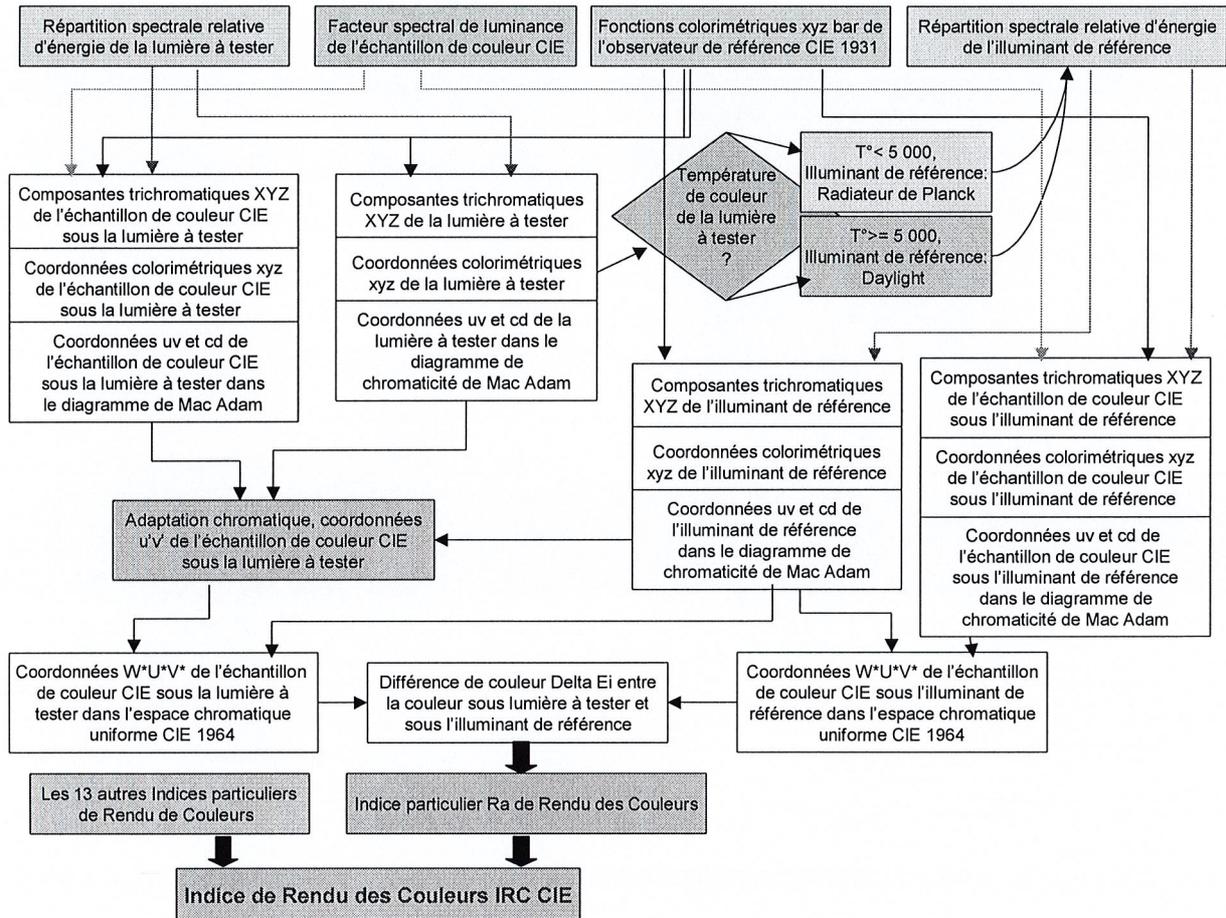








Annexe 9. Organigramme de calcul de l'Indice de Rendu des Couleurs de la CIE



Annexe 10.

Indices de Rendu des Couleurs particuliers, propres à chaque photographie

Indice de Rendu des Couleurs de la photographie "AGEN" de Ducos Du Hauron

	Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB	
Ri 1	98.31	99.11	96.68	83.18	65.91	fourche tronc
Ri 2	98.26	98.46	97.34	86.17	63.46	sac poubelle
Ri 3	97.65	97.03	97.51	80.29	48.86	ciel
Ri 4	97.57	97.96	96.67	79.05	48.83	volet bleu
Ri 5	98.80	99.01	98.77	88.49	66.40	forêt 1
Ri 6	99.28	98.88	98.35	93.97	91.37	herbes folles
IRC AGEN	98.31	98.41	97.55	85.19	64.14	

Indice de Rendu des Couleurs de la photographie "ALGER" de Ducos Du Hauron

	Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB	
Ri 1	98.63	96.33	98.22	87.36	86.07	mer caché
Ri 2	96.84	96.88	93.70	72.47	48.40	ciel caché
Ri 3	95.65	97.23	91.17	55.68	19.05	toit caché
Ri 4	97.35	97.14	94.61	78.25	58.61	ciel caché 2
Ri 5	96.28	97.07	92.53	67.54	35.96	ciel
Ri 6	98.61	96.48	99.48	86.16	72.60	forêt
Ri 7	98.45	96.49	97.30	86.98	85.25	mer
Ri 8	94.73	97.27	88.38	52.91	6.35	toit
Ri 9	98.92	97.02	99.63	87.69	75.27	immeuble sombre
Ri 10	98.92	96.69	95.30	91.25	88.48	façade immeuble
Ri 11	98.83	96.56	99.29	88.25	78.41	forêt proche
Ri 12	95.20	97.53	89.32	55.90	15.38	toit antenne TV
IRC ALGER	97.37	96.89	94.91	75.87	55.82	

Indice de Rendu des Couleurs de la photographie "FEUILLES" de Ducos Du Hauron

	Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB	
Ri 1	98.98	96.32	97.12	88.58	80.34	feuille dentelée
Ri 2	99.27	95.28	95.68	87.74	77.23	vert fleur cassée
Ri 3	98.82	95.94	98.99	89.94	89.12	fleur bleu
Ri 4	98.06	96.34	96.52	84.22	76.13	pétale bleu pâle
Ri 5	98.77	96.39	98.60	89.50	83.42	pétale bleu pâle double
Ri 6	99.30	98.02	98.90	88.84	83.97	brin d'herbe
Ri 7	93.98	98.74	86.28	43.79	-10.15	fruit orange droit
Ri 8	95.63	98.34	90.06	60.43	25.20	fruit orange gauche
Ri 9	93.12	94.73	78.76	44.32	-5.92	jaune dense
Ri 10	96.33	96.32	90.21	73.65	50.59	jaune second
IRC FEUILLES	97.23	96.64	93.11	75.10	54.99	

Indice de Rendu des Couleurs de la photographie "FLEURS" de Ducos Du Hauron

	Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB	
Ri 1	92.52	98.85	90.81	40.84	-54.67	rouge
Ri 2	95.77	95.95	88.30	72.09	45.31	jaune frontière
Ri 3	98.07	97.75	95.86	87.08	78.87	blanc bleu
Ri 4	97.20	94.43	89.12	87.60	81.09	vert feuille
Ri 5	96.27	96.42	89.91	75.59	52.81	jaune flash
Ri 6	94.04	99.26	93.04	52.33	-21.94	orange
Ri 7	97.34	97.57	97.12	78.65	54.01	pointe grise
Ri 8	98.31	97.10	96.91	86.60	81.98	fleur blanche
Ri 9	97.59	96.79	95.35	78.57	63.37	blanc "pur"
Ri 10	97.55	98.32	95.66	84.14	62.25	vert foncé
IRC FLEURS	96.47	97.24	93.21	74.35	44.31	

Indice de Rendu des Couleurs du positif en "gélatine bleu et jaune" de la photographie "FEUILLES" de Ducos Du Hauron

	Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB	
Ri 1	94.30	98.22	87.71	49.81	-4.44	gélatine bleu
Ri 2	95.79	98.46	92.67	71.49	33.52	gélatine jaune
IRC Gélatines	95.05	98.34	90.19	60.65	14.54	

Indice de Rendu des Couleurs de la photographie "LOURDES" de Ducos Du Hauron

	Solux	WWARGB	WR	RGBA	RGB	
Ri 1	97.51	97.14	92.19	82.07	71.18	herbe
Ri 2	99.00	97.10	95.21	93.65	91.22	bordure rivière
Ri 3	98.81	96.79	99.63	89.58	84.77	eau
Ri 4	97.05	97.03	90.46	78.00	64.06	herbe jaune
IRC LOURDES	98.09	97.01	94.37	85.83	77.81	