



Rapport de stage de 2^{ème} année

Chloé BERNARD

Tome 1/2

CENTRE DE RECHERCHE ET DE RESTAURATION DES MUSÉES DE FRANCE - C2RMF

Laboratoire de haute technologie du C2RMF, groupe IMAGERIE

*Palais du Louvre,
porte des Lions,
14 Quai François Mitterand,
75001 Paris*

*Pavillon de Flore,
Palais du Louvre,
Porte Jaujard,
Avenue du Général Lemonnier,
75001 Paris*

*Petite écurie du roi,
2 avenue Rockefeller,
78000 Versailles*

Sous la direction de :

Anne Maigret, photographe du laboratoire de haute technologie du C2RMF

Clotilde Boust, directrice du groupe imagerie du laboratoire de haute technologie du C2RMF

Du 10 juin au 19 juillet 2019

Remerciements

Il m'est essentiel de remercier sincèrement les personnes suivantes qui m'ont accompagnée et encouragée :

Anne Maigret, photographe au laboratoire de haute technologie du C2RMF, qui a dirigé ce stage avec bienveillance, intérêt et patience.

Thomas Calligaro, chercheur en spectrométrie et analyse non destructive, qui m'a soutenue dans ma recherche d'un point de vue technique, matériel et moral.

Alexis Komenda et Philippe Salinson, photographes pour le laboratoire de haute technologie du C2RMF, qui ont su répondre à mes questions et s'investir dans ma recherche, mais aussi l'ensemble du groupe imagerie, Jean Louis Bellec, Elsa Lambert, Gerald Parisse, Laurence Clivet, Charlotte Hochart, Nicolas Mélard pour leur accueil et leurs conseils.

Clotilde Boust, chercheur, maître de conférences et responsable du groupe imagerie, sans qui ce stage n'aurait pu avoir lieu.

Stéphanie Courtier, restauratrice spécialisée en dorure, pour sa confiance, son esprit d'expérimentation, et sa disponibilité.

Gilles Bastian, conservateur du patrimoine, et Elisabeth Ravaud, responsable du département peinture, qui m'ont permis de tester mon protocole sur des échantillons précieux et rares.

Alain Sarlat, enseignant de sensitométrie à l'école nationale supérieure Louis-Lumière, qui s'est rendu disponible pour utiliser le matériel du laboratoire de sensitométrie de l'école et pour la relecture du rapport.

Franck Maindon et Paul Bydlowski, enseignants à l'école nationale supérieure Louis-Lumière, qui ont suivi ce stage dans sa mise en place et sa réalisation.

Alexis Allemand et Mael Voyer Gadin, anciens étudiants à l'école nationale supérieure Louis-Lumière, avec qui j'ai pu échanger à propos de leur expérience au C2RMF et qui m'ont permis de mieux comprendre le rôle des stagiaires au sein de la structure.

Anne Paounov, Anne Wogelmuth et Jerome Rumolo, anciens stagiaires pour le C2RMF, pour leurs travaux qui m'ont apporté un soutien technique et des données sur le matériel.

Yannick Vandenberghe, technicien de recherche au C2RMF, qui m'a aiguillé sur le sujet de recherche du stage.

Quentin Lemasson, Laurent Pichon et toute l'équipe du groupe de jeux de société du C2RMF qui m'ont accueillie avec générosité.

Avant-propos

Après avoir contacté Clotilde Boust, responsable du groupe imagerie du C2RMF, une rencontre a eu lieu avec Mme Anne Maigret, qui a accepté de diriger mon stage. Nous nous sommes concertées pour définir ensemble un sujet de stage. Dans un premier temps, il était question de retrouver les résultats de Joanne Dyer et Sophia Sotiropoulou¹ concernant un protocole d'identification des pigments utilisés pour les sculptures polychromes. Après une concertation avec Mme Clotilde Boust, Anne Maigret est finalement revenue vers moi avec un autre sujet concernant un dispositif d'imagerie multi spectrale. Il m'a alors fallu me familiariser avec les techniques de l'imagerie scientifique afin de comprendre les fonctionnements, les utilisations, et les enjeux de ces différentes techniques.

Il existe des techniques qui mettent en image les propriétés de réflexion des matériaux hors du spectre visible, et d'autres qui concernent la capacité d'une matière à émettre de la fluorescence. En revanche, aucune technique n'est utilisée pour mettre en image le rayonnement à l'origine du phénomène de fluorescence.

J'ai alors eu la liberté de redéfinir mon sujet vers cette problématique. Lors de mes recherches préliminaires, Thomas Calligaro m'a transmis un article² à propos de ce sujet sur lequel j'ai pu m'appuyer. Dès le commencement, je savais que le travail nécessaire pour explorer cette question serait trop important pour la période de stage. Il s'agira donc ici d'une première ébauche, permettant de prouver la pertinence d'une étude plus poussée sur le sujet. Le planning du personnel en période d'été m'a amenée à travailler avec une grande autonomie, mais la bienveillance et la disponibilité de tous les employés du C2RMF m'a permis de me diriger vers la personne compétente pour répondre à mes questions lorsque cela s'est avéré nécessaire.

Pour commencer, j'ai théorisé le protocole, en me posant toutes les questions relatives au matériel, à la technologie, et à la chaîne de production des images. L'enjeu de cette recherche était d'arriver rapidement à un résultat afin de tester la pertinence du protocole et la réactivité des échantillons. Une fois le protocole établi et les premiers échantillons testés, il a fallu développer un protocole de postproduction. La problématique de la représentation était primordiale, n'étant pas familiarisée avec la représentation multi spectrale, où chaque image est comparée aux autres, j'ai préféré mettre en place une représentation sous forme d'image composite. Pour finir, j'ai eu la possibilité de tester cette technique sur des objets réels d'études.

¹ Dyer J, Sotiropoulou S, A technical step forward in the integration of visible-induced luminescence imaging methods for the study of ancient polychromy, *Heritage Science*, 5(1), 24, December 2017

² Annexe 0 : Daveri A, Vagnini M, Nucera F, Azzarelli M, Romani A, Clementi C. Visible-induced luminescence imaging: a user-friendly method based on a system of interchangeable and tunable LED light sources. *Microchem J*. 2016;125:130–41

Sommaire

Remerciements	3
Avant-propos	5
Sommaire	7
1. Introduction : L'activité du C2RMF	10
1.1. Histoire et missions	10
1.2. Le groupe imagerie	10
1.3. Les techniques de prise de vues	11
1.3.1. Les protocoles d'étude de rayonnement	11
1.3.2. Les protocoles d'étude de relief	13
1.3.3. Les protocoles d'étude de la structure	14
2. Mission	16
2.1. Sujet	16
2.1.1. Les phénomènes d'absorption et de réflexion	17
2.1.2. La Fluorescence	18
2.2. Etude préparatoire	21
2.2.1. Etude des filtres	21
- LED bleue	21
- LED verte	22
- LED rouge	22
2.2.2. Calcul de l'exposition	23
- Comparaisons d'intensité	23
- Calcul d'équilibre	25
2.2.3. Linéarisation : interrogations et partis pris	25
- La trichromie	25
- La balance des blancs	26

-	Capture	26
-	Logiciels de post production	27
-	Charte	27
2.3.	Mise en place du protocole	28
2.3.1.	Eclairage	28
2.3.2.	Exposition	29
2.3.3.	Choix des filtres	29
2.4.	Post production	32
3.	Test sur des œuvres	35
3.1.	Echantillons appliqués du département peinture	35
3.2.	Cobaye one	36
3.3.	Colonne du département dorure	39
3.3.1.	Test d'échantillons spécifiques à la dorure	39
3.3.2.	Imagerie de la colonne	43
3.3.3.	Résultats	45
-	Stratigraphie	45
-	Identification - Bibliothèque Kremer	48
-	Identification – Histoire des techniques	49
3.	Conclusion	50
3.1.	Analyse du protocole	50
3.2.	Contraintes rencontrées	51
3.3.	Apports personnels	51
	Bibliographie	52
	Table des matières	54
	Annexes	56

1. Introduction : L'activité du C2RMF

1.1. Histoire et missions

Le centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) fut créé le 1er janvier 1999 par la réunion du « *Laboratoire de recherche des musées de France* » et du « *Service de restauration des musées de France* ». Il dépend du Ministère de la Culture et de la Communication, et ses missions sont définies par l'arrêté du 16 décembre 1998 :

- La mise en œuvre de conservation préventive et de restauration des collections des musées de France (en liaison avec les conservateurs responsables des collections, la politique du service des musées de France de la direction générale des patrimoines en matière de recherche).
- La constitution et la conservation d'une documentation écrite et illustrée sur les matériaux, les techniques et la restauration des œuvres des musées.
- L'administration des laboratoires et des ateliers de restauration qui lui sont rattachés par arrêté du ministre chargé de la Culture.

Le C2RMF est composé de quatre départements, eux-mêmes constitués de quinze groupes et de filières :

- **Le département Conservation préventive** qui comprend une filière expertise en conservation préventive et une filière régie des œuvres.
- **Le département Restauration** qui regroupe six filières : archéologie et ethnographie, arts décoratifs, art contemporain, peinture, sculpture, et arts graphiques.
- **Le département Archives et nouvelles technologies de l'information** composé d'une filière archive, documentation et bibliothèque, et d'une filière nouvelles technologies de l'information.
- **Le département Recherche** qui compte cinq groupes : le groupe objets (métal, verre, céramique, pierre), le groupe peinture (peinture de chevalet, polychromie, et arts graphiques), le groupe datation (carbone 14 et thermoluminescence), le groupe AGLAE+ (Accélérateur Grand Louvre d'Analyses Élémentaires, microscope électronique à balayage, fluorescence X et diffraction), et pour finir le groupe imagerie dans lequel sont pratiqués la photographie, la radiographie et l'imagerie informatique.

1.2. Le groupe imagerie

La principale mission du groupe imagerie est de fournir des images aux restaurateurs et aux conservateurs avant, pendant, et après la restauration d'une œuvre d'art. Les images produites permettent un examen approfondi de l'état d'une œuvre, elles sont la source d'informations qui seraient impossibles à obtenir sans prélèvement.

Avec le groupe AGLAE+, le groupe imagerie forme le Laboratoire de Haute Technologie du C2RMF. Ce laboratoire a pour mission l'expertise des œuvres par le biais d'analyses des matériaux qui les constituent, pour l'analyse et la conservation. Le développement et la recherche de nouvelles techniques et technologies sont des préoccupations primordiales pour les équipes, qui font le choix de la collaboration pluridisciplinaire. Des aspects inédits des œuvres sont notamment révélés par les protocoles de prises de vue mis en œuvre par le groupe imagerie.

Le groupe imagerie est constitué de photographes et de conservateurs ayant chacun une spécialité et un rôle particulier. M Gérald Parisse, M Jean-Louis Bellec et Mme Laurence Clivet sont photographes de peintures de chevalet et arts graphiques. Les photographies d'objet sont réalisées par Mme Anne Maigret et M Alexis Komenda. M Philippe Salinson occupe un rôle plus polyvalent car il est chargé de la production photographique du laboratoire de Versailles. Mme Elsa Lambert, quant à elle, est spécialisée dans la radiographie d'objet. M Nicolas Mélard est conservateur d'arts préhistoriques et travail sur l'imagerie 3D avec Mme Charlotte Hochart, spécialiste de l'imagerie en 3D. Mme Clotilde Boust, chercheuse et maître de conférence, est responsable du groupe imagerie.

1.3. Les techniques de prise de vues

La mission du groupe imagerie est de fournir des images utiles aux conservateurs, aux restaurateurs, et aux archives du Centre à des fins d'analyse et de conservation. Différents protocoles de prise de vue ont été mis en place pour la compréhension de l'état de l'œuvre et des matériaux qui la constituent.

Les œuvres à étudier peuvent être des dessins, des peintures de chevalet, des tapisseries ou des œuvres en trois dimensions comme des sculptures, des installations, du mobilier, etc. Les protocoles d'imagerie se font avec tout type d'œuvre, mais la gestion de la lumière peut varier selon la nature de l'objet. Ces examens sont la plupart du temps conduits en studio, directement dans les locaux du Centre, mais également in situ, lorsqu'une œuvre ne peut pas être déplacée pour des questions pratiques, de coût, ou de sécurité.

1.3.1. Les protocoles d'étude de rayonnement

Les protocoles d'étude de rayonnement, qui mettent en image les caractéristiques optiques des matériaux avec des protocoles de prise de vue sous lumière blanche, sous radiations infrarouge, et les protocoles de prise de vue sous radiations ultraviolets.

- Photographies en lumière directe³

La photographie dans le domaine visible est une photographie « normale », qui correspond à ce que l'œil peut voir. Cela nous donne une information sur les caractéristiques des matériaux en termes de réflexion dans le visible.

- Photographies en luminescence infrarouges⁴

La photographie infrarouge est faite avec le même appareil photographique que pour le visible, tirant parti du fait que les capteurs CCD sont sensibles de 400 à 1000nm. Une fois l'appareil photographique défiltré, on place un autre filtre pour n'enregistrer que les radiations IR supérieures à 900nm. Cet examen met en évidence certains repentirs ou transformations apportées par l'artiste en cours d'élaboration. Des pigments de natures différentes mais d'aspects semblables en lumière visible, réfléchissent inégalement le rayonnement IR permettant ainsi de mesurer l'importance et la profondeur des altérations et restaurations subies.

- Imagerie infrarouge fausses couleurs⁵

Afin de présenter au mieux cet examen et d'en faciliter la lecture, sont fabriquées des images en fausses couleurs. On superpose sur ordinateur la photographie en lumière directe, composée des couches de rouge, vert et bleu, et l'image infrarouge. On supprime la couche du bleu puis l'infrarouge devient la couche de rouge, l'image rouge remplace la couche de vert et l'image verte celle de bleu. Le résultat donne des indications sur la nature des pigments utilisés et permet de localiser plus facilement les changements de composition effectués par le peintre.

- Photographie aux ultraviolets⁶

En photographie, on utilise les UV proches ou longs (de 350 à 380 nm). Les sources utilisées sont des tubes fluorescents « lumière noire » émettant des UV ainsi qu'un minimum de lumière visible dans les bleus. Elle consiste à enregistrer les rayonnements réémis dans le visible et l'infrarouge des matériaux fluorescents. La photographie enregistrant la fluorescence dans le visible des matériaux sous UV est très utilisée, en particulier pour les vernis. Elle permet de juger de l'importance des vernis, leur homogénéité ou inégalité, leur ancienneté et de localiser l'étendue des restaurations déjà effectuées en surface. Les repeints récents posés sur le vernis apparaissent sous forme de taches noires contrastant avec la fluorescence du vernis. Pour les œuvres peu ou pas vernies (peintures pariétales, dessins, encres, fresques), on peut observer sous UV des fluorescences colorées caractéristiques des pigments utilisés.

³ Annexe 1

⁴ Annexe 2

⁵ Annexe 3

⁶ Annexe 4

- L'imagerie ultraviolette fausse couleurs⁷

La comparaison entre la couleur des pigments en lumière visible et leur réponse sous UV peut aider à les identifier. Un protocole de postproduction a été mis en place par Anne Paounov⁸ pour créer une image fausse couleur et faciliter l'identification.

- La spectrométrie de fluorescence X (en anglais XRF pour X-ray fluorescence)

La spectrométrie de fluorescence X est un examen d'analyse chimique élémentaire utilisant une propriété physique de la matière, qui se trouve être la fluorescence de rayons X. Cet examen est direct et non destructif. Il permet de déterminer les éléments en présence dans l'échantillon analysé. Le résultat se présente sous la forme d'un spectre dit « de rayons X » qui est caractéristique de la composition du spécimen. En étudiant ce spectre, on voit apparaître la composition sous forme de « pics de présence » des éléments. L'ensemble des mesures peut se présenter sous la forme d'une cartographie, et donc traduire la répartition des éléments sur le document.

1.3.2. Les protocoles d'étude de relief

- Lumière rasante⁹

Cet examen informe sur l'état de conservation de la surface de l'œuvre. L'œuvre est pour cela éclairée par un faisceau lumineux très dirigé formant un angle de 15° avec sa surface. Les moindres reliefs sont ainsi accentués par leurs ombres portées.

- Reflectance Transformation Imaging

Le Reflectance Transformation Imaging (RTI) est une technologie développée au début des années 2000, consacrée à la préservation du patrimoine par la diffusion de nouvelles technologies. Elle permet de produire une image dynamique à partir d'une série de photographies frontales sous des éclairages artificiels différents. En manipulant la lumière à la souris sur un ordinateur, on peut déceler dans l'image les profondeurs les plus infimes. Elle est composée à partir d'un assemblage de photographies où la source de lumière est déplacée autour de l'œuvre. Alexis Allemand a effectué une étude au C2RMF visant à améliorer ce protocole dans sa pratique¹⁰.

⁷ Annexe 3

⁸ Paounov, Anne, Mémoire de recherche de fin d'études : l'ultraviolet fausses couleurs : une méthode d'identification des pigments picturaux, vers un protocole de prise de vue destiné à l'ultraviolet, 2009.

⁹ Annexe 5

¹⁰ Allemand A, Rapport de stage : optimisation d'un protocole de prise de vue RTI, 2017.

- Les techniques de modélisation 3D

La captation de la surface d'un objet en 3D est faite au C2RMF de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique. Cet enregistrement est utile en conservation restauration car elle permet d'enregistrer précisément la forme 3D d'un objet, d'étudier les variations de surface avec les outils de rugosimétrie (mesure des creux, pentes et bosses), d'effectuer des mesures non réalisables en réel, de repérer les interventions d'analyses ou de restauration précisément en 3D, et de désigner des formes utiles à la restauration ou à la présentation des œuvres.

- o Triangulation

Le scanner 3D laser effectue la captation 3D d'un objet d'une taille comprise entre 5 et 80 cm. La précision maximale est de 50 microns. Il utilise la triangulation par laser pour capter un maillage 3D de l'objet. La surface de l'objet (couleur et matière) n'est pas enregistrée directement mais peut être ajoutée en repositionnant des photographies sur le maillage 3D par la suite.

- o Microtopographie

Le microrugosimètre permet de mesurer une surface sur quelques cm², en utilisant une simple lumière défocalisée, avec une grande précision, de 500 à 5 microns. Il est très utilisé en tracéologie, en préhistoire, afin de déterminer les instruments ayant servis à faire les traces étudiées.

1.3.3. Les protocoles d'étude de la structure

- Réflectographie infrarouge¹¹

La réflectographie est basée sur le même principe que la photo infrarouge mais utilise un système de détection différent, sensible jusqu'à 1700nm, permettant ainsi de traverser les couleurs les plus opaques. Le matériel employé est la caméra infrarouge Osiris équipée d'un détecteur InGaAs (indium gallium arsenide), sensible de 900 nanomètre à 1700 nm et d'une résolution de 4096 x 4096 pixels. Un objectif 150mm, optimisé pour l'imagerie infrarouge est monté sur la caméra. L'éclairage est composé de deux lampes halogènes de faible puissance qui émettent des IR sans dégager trop de chaleur.

Cet examen est essentiel pour l'étude du dessin sous-jacent (situé entre l'enduit de préparation et la couche picturale) et peut donner des informations sur les matériaux utilisés (substances sèches ou fluide), les instruments employés, les techniques de report (poncif, carton), l'élaboration du dessin (recherche graphique, changement, abandon de composition) et apporter des arguments lors de questions d'attributions. Cet examen met également en évidence certains repentirs ou transformations

¹¹ Annexe 6

apportées par l'artiste en cours d'élaboration. Cette technique est par ailleurs utilisée pour rendre visible des signatures, dates ou inscriptions partiellement effacées par le temps ou volontairement dissimulées.

- Radiographie

La radiographie est présente au centre depuis ses débuts et son utilité dans la connaissance des œuvres n'est plus à démontrer. Elle est aujourd'hui utilisée pour comprendre la structure des peintures et des objets, grâce à plusieurs générateurs de puissances différentes, avec des détecteurs argentique ou numérique. Pour les peintures, elle permet d'identifier les repentir de composition, l'indice de conservation du support, les changements de support, de formats. Pour les objets, il s'agit de mettre en avant le support technique à la restauration et le procédé de fabrication.

2. Mission

Etude de la photoluminescence sous éclairage LED trichrome et mise en place d'une chaîne de post production pour l'imagerie composite de fluorescence sous éclairage visible (Imagerie CFV).

2.1. Sujet

Lorsqu'une matière fluoresce, elle utilise une partie de la lumière qui lui est envoyée et la réémet à une longueur d'onde supérieure, selon une sensibilité spectrale propre à chaque matière. Il est difficile de mesurer précisément le rayonnement original responsable du phénomène tandis que le rayonnement réémis peut être isolé dans le visible ou l'infrarouge avec des filtres.

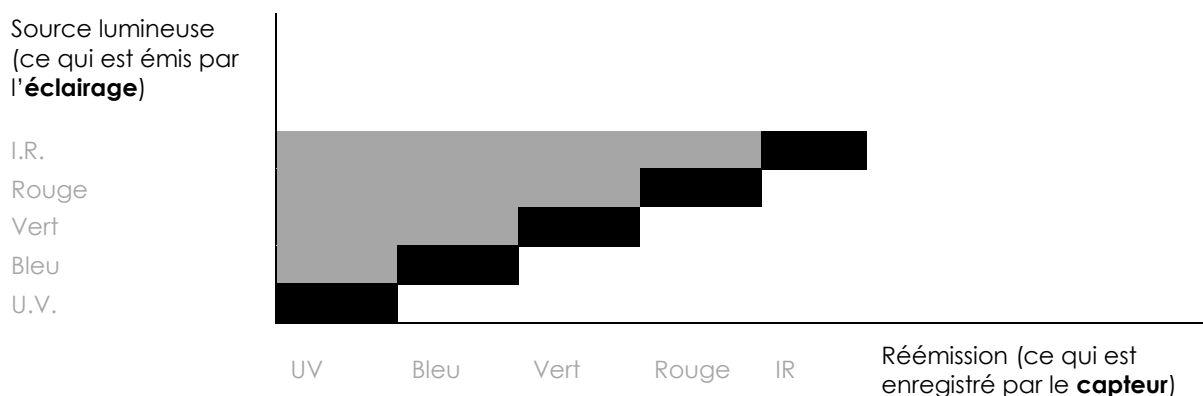


Schéma du comportement du rayonnement de photoluminescence.

Les zones grises représentent les zones où la fluorescence ne peut pas se produire, les zones noires représentent les zones de réflexion, les zones blanches sont les zones que nous cherchons à enregistrer, celles où la fluorescence se produit.

Ces phénomènes sont propres à chaque matière, ils peuvent être traités de différentes manières à des fins d'identification. Il est possible d'enregistrer le rayonnement photoluminescent émis, le rayonnement utilisé pour produire la photoluminescence et l'importance de la transformation du rayonnement.

Certaines données sont déjà traitées par les autres méthodes de prise de vue, notamment l'émission photoluminescente en infra rouge et la photoluminescence produite sous éclairages UV et réémission dans le visible. L'imagerie des fluorescences sous lumière visible n'est encore exploitée par aucune autre technique d'imagerie.

Le but de cette recherche est de créer une imagerie qui symbolise la lumière à partir de laquelle un phénomène de fluorescence se produit. Pour ce faire, nous allons éclairer des échantillons avec des sources lumineuses rouges, vertes et bleues et vérifier la présence d'un phénomène de fluorescence

dans chaque cas. Des filtres seront utilisés afin d'enregistrer les rayonnements issus uniquement de la fluorescence en éliminant les rayonnements réfléchis.

Des images seront enregistrées de l'objet éclairé avec des LED rouges, vertes et bleues, tandis que le capteur sera filtré pour enregistrer uniquement les rayonnements supérieurs.

Afin de créer des fenêtres spectrales différenciées les unes des autres, nous allons utiliser des sources différentes dont les spectres ne couvrent qu'une portion de longueurs d'ondes. De la même manière, nous allons utiliser des filtres pour permettre au capteur de n'enregistrer qu'une portion d'onde spécifique.

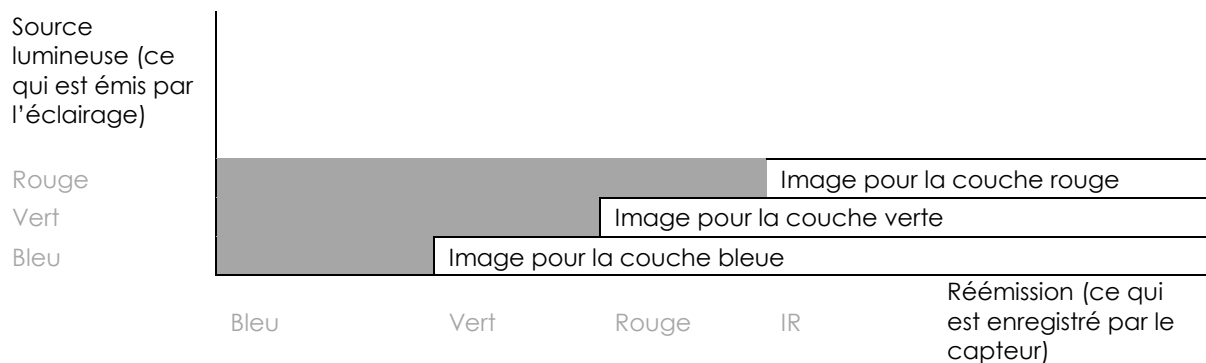
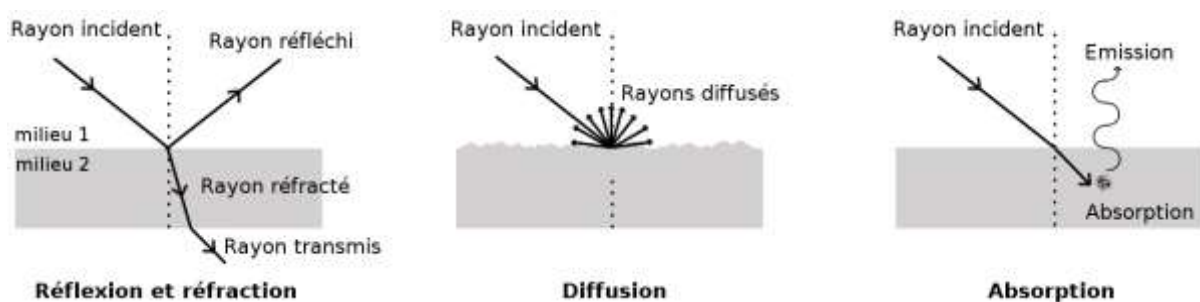


Tableau des rayonnements enregistrés selon les filtres et éclairages.

2.1.1. Les phénomènes d'absorption et de réflexion

La plupart des rayonnements se comportent de manière similaire lorsqu'ils entrent en contact avec une matière ; une partie du flux émis par la source, symbolisé ici par le rayon incident, sera transmise, réfléchi, diffusée et absorbée lorsque le flux rencontrera un milieu. Ces phénomènes sont souvent coexistants pour un cas donné.



Les types d'interactions possibles entre un rayonnement incident et une transition entre deux milieux de natures différentes : réflexion et/ou réfraction, diffusion et absorption. Image : Harold Clenet, 2012-2018

$$\Phi_i = \Phi_r + \Phi_t + \Phi_d + \Phi_a$$

Φ_i flux incident
 Φ_r flux réfléchi
 Φ_t flux transmis
 Φ_d flux diffusé
 Φ_a flux absorbé

Il est alors possible de déterminer différents coefficients :

$$R = \frac{\Phi_r}{\Phi_i}$$

$$T = \frac{\Phi_t}{\Phi_i}$$

$$A = \frac{\Phi_a}{\Phi_i}$$

$$D = \frac{\Phi_d}{\Phi_i}$$

R coefficient de réflexion

T coefficient de transmission

A coefficient d'absorption

D coefficient de diffusion

La somme des quatre coefficients étant égale à 1.

$$R + T + A + D = 1$$

Nous nous intéressons en priorité au flux réfléchi car il va entrer en jeu dans le protocole étudié. Lorsque le pigment est exposé à un rayonnement, une partie du flux est réfléchi (Φ_r) par le pigment et l'autre est absorbée (Φ_a), diffusée (Φ_d), ou transmise (Φ_t). Plus le pigment apparaît sombre sur la photographie en lumière directe, plus il a absorbé. A l'inverse, moins le pigment paraît dense, plus il a réfléchi de lumière.

2.1.2. La Fluorescence

La photoluminescence est l'émission lumineuse d'une matière après l'absorption de photons. Elle constitue l'une des nombreuses formes de luminescence. Elle est initiée par une photoexcitation, c'est-à-dire des photons qui excitent les électrons à un niveau d'énergie supérieur dans un atome. Après l'excitation, il se produit généralement divers processus de relaxation dans lesquels d'autres photons sont réémis. Les périodes de temps entre l'absorption et l'émission peuvent varier, allant d'une femtoseconde à quelques minutes ou heures. Le terme fluorescence définit ce phénomène s'il se produit dans un délai très court. S'il se produit sur une durée plus longue, il est alors nommé phosphorescence. Le protocole d'imagerie développé ici ne permet pas de distinguer les phénomènes de fluorescence et phosphorescence, cependant, la phosphorescence concerne des matériaux spéciaux et il est rarissime de la rencontrer dans le domaine du patrimoine. Le terme fluorescence pourra donc être utilisé dans la suite de ce rapport.

Pour décrire un atome, le modèle de Rutherford le représente comme un système planétaire, avec un noyau central et des électrons qui orbiteraient autour. Ce modèle, basé sur la mécanique de Newton, ne pouvait rendre compte de certains phénomènes, comme les spectres de raies. Il fut complété par le modèle de Bohr, où seules certaines « orbites » sont possibles, et par extension, l'atome ne peut prendre que certaines énergies bien déterminées. L'énergie d'un atome peut changer, via des transitions électroniques. Concrètement, cela concerne au moins un de ses électrons, qui effectue une transition d'un état d'énergie à un autre. Dans le cadre d'une interaction lumière/matière, ces transitions font intervenir des particules lumineuses, les photons.

Un électron est dans un état d'énergie, nommé E1. Si un photon lui apporte une certaine énergie, il est absorbé par l'atome, et l'électron effectue une transition de E1 vers E2. La transition ne peut se faire qu'en un coup, c'est à dire qu'avec un seul photon en même temps.

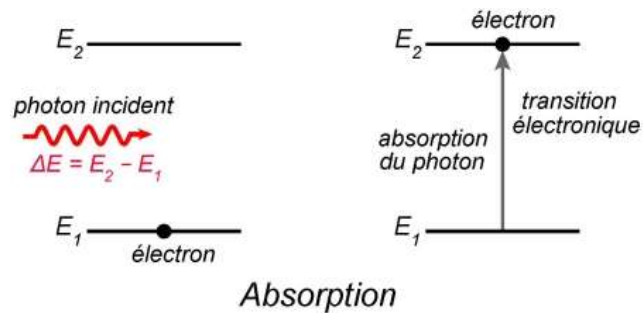


Schéma expliquant les mécanismes de la fluorescence, Benjamin Magnard

Il devient alors possible en étudiant la longueur d'onde nécessaire aux phénomènes de fluorescence de qualifier l'écart entre les états, propre à chaque molécule, et donc de les caractériser.

Quand un électron est dans un état excité, E2 dans notre exemple, la collision avec les molécules voisines peut entraîner une transition vers un état de plus basse énergie. Dans le cas d'une transition dite radiative, un photon est émis, emportant l'excédent d'énergie, c'est à dire l'écart entre les deux états. Cette émission se fait spontanément, sans intervention extérieure sur l'atome, de manière aléatoire. Le photon est également émis selon une direction aléatoire.

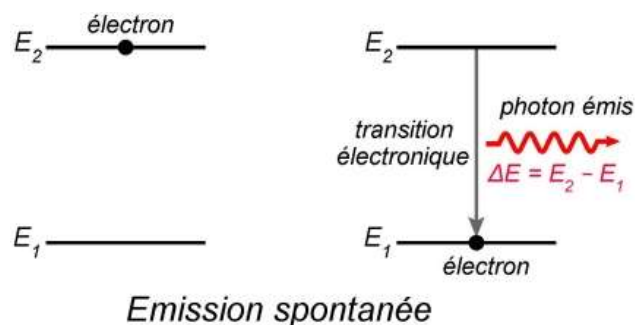


Schéma expliquant les mécanismes de la fluorescence, Benjamin Magnard

Il faut préciser que le niveau E2 nécessaire à l'absorption de l'énergie peut être différent du niveau E2 nécessaire à l'émission au sein d'une même molécule. L'étude de la longueur d'onde de réémission des photons nous donne une information supplémentaire pour caractériser la molécule.

Nous savons donc que l'énergie d'émission est inférieure à l'énergie d'excitation. Grace à la relation de Planck :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

E énergie (J)
 c célérité de la lumière dans le vide (3.108m.s-1)
 λ longueur d'onde (m)

Nous pouvons en déduire que la longueur d'onde d'émission est forcément supérieure à la longueur d'onde d'excitation.

Il est important de préciser que les phénomènes d'absorption, expliqués dans la partie précédente, et de fluorescence ne sont pas liés. Le fonctionnement de la photoluminescence fait appel à des mécaniques complexes dont la communauté scientifique ne possède pas toutes les réponses.

La fluorescence étant liée à la configuration moléculaire des matières, les changements d'états, l'âge, ou la pureté des échantillons étudiés pourraient avoir un impact sur leur réponse lumineuse.

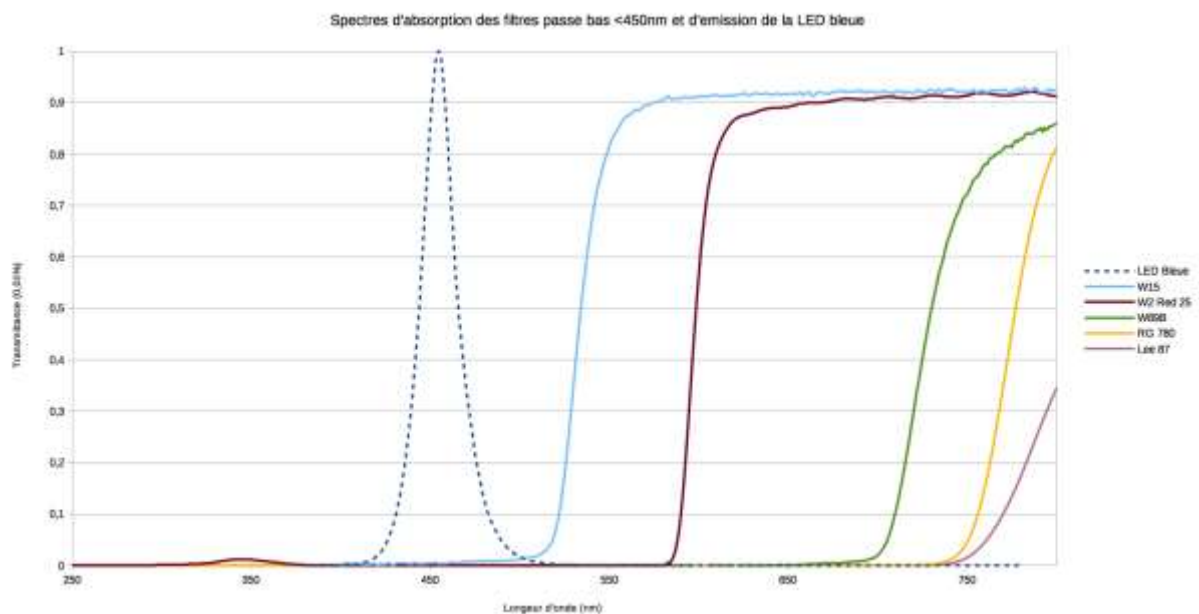
2.2. Etude préparatoire

2.2.1. Etude des filtres

Le C2RMF possède une collection de filtres issus de l'époque de l'argentique, ainsi que des filtres anti ultraviolets et anti infrarouges toujours utilisés pour réaliser différents types d'imagerie, que nous allons utiliser pour mettre en place le protocole. Il est nécessaire d'étudier spectres d'émission des lampes et l'absorbance spectrale des filtres afin de déterminer quel filtre il sera pertinent d'utiliser pour éliminer la réflexion. Des mesures au spectrophotomètre et au spectroradiomètre ont alors été réalisées.

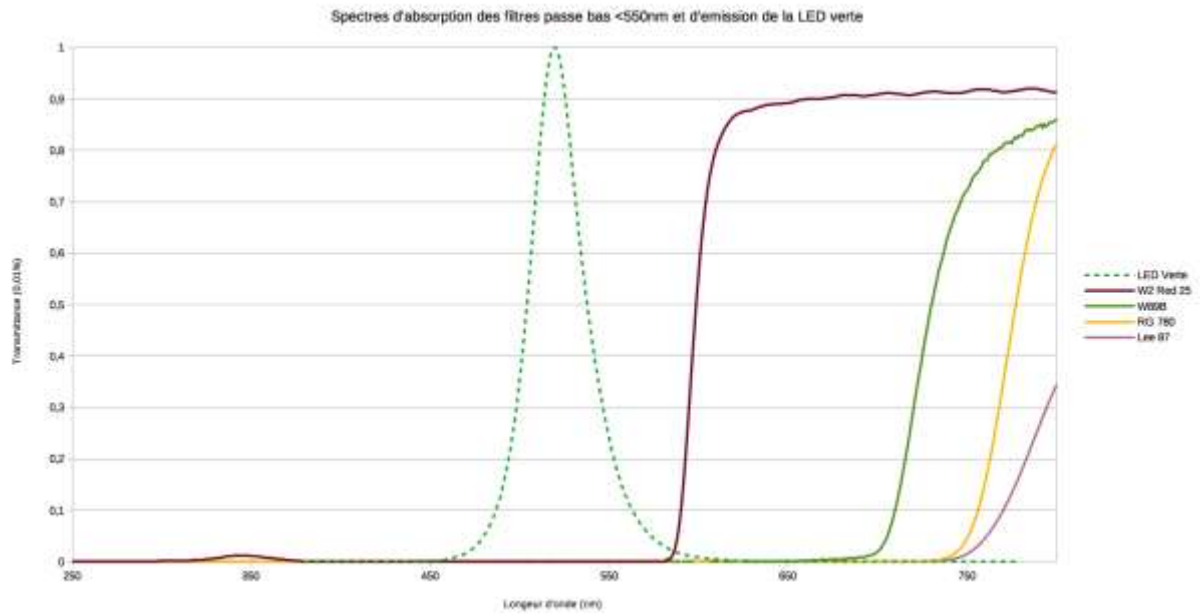
Nous pouvons grâce à ces graphiques prévoir le comportement des filtres. Il est nécessaire d'adapter la partie du spectre enregistrée si les LEDS utilisées sont rouges, vertes, ou bleue. Les filtres doivent permettre le blocage du rayonnement en réflexion venant de la lampe, mais transmettre les rayonnements de longueur d'onde supérieure. Il va s'agir de choisir un filtre dont la courbe de transmittance se place juste après la courbe d'émission des LED. Nous pouvons d'ores et déjà éliminer les filtres qui bloquent les rayonnements infrarouges car il s'agit d'un rayonnement que nous cherchons à enregistrer. Il en est de même pour les filtres qui bloquent les ultraviolets, car ils ne sont pas discriminants pour le blocage des rayonnements des LED.

- LED bleue



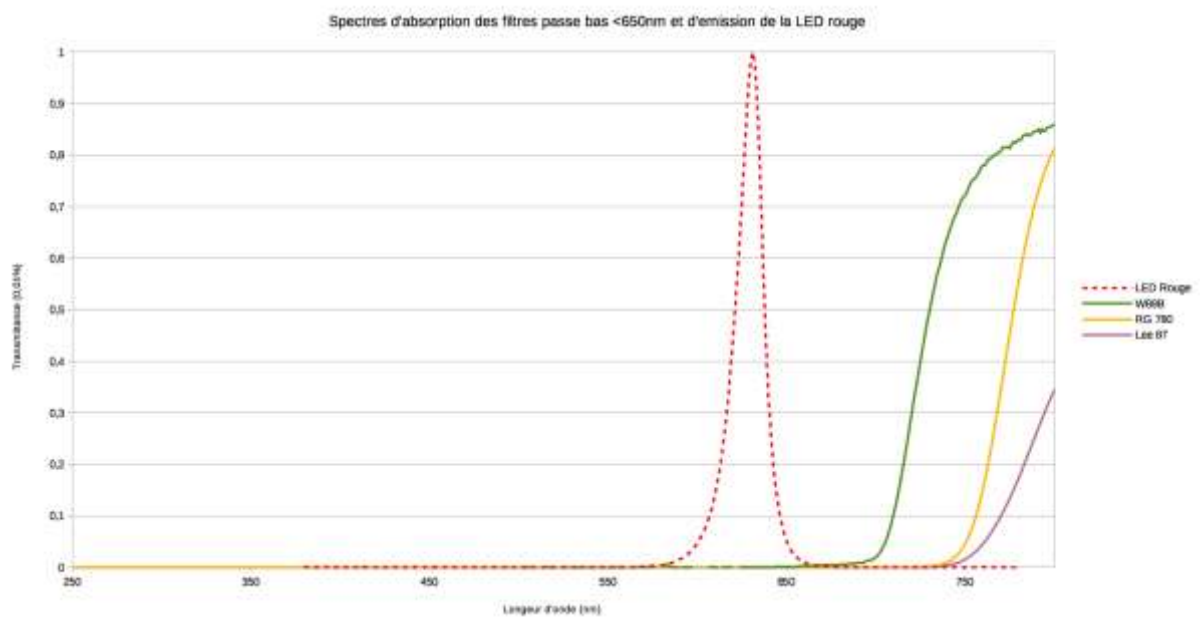
Les filtres candidats sont le Wratten 15 ou le Wratten 2 RED 25. Le Wratten 15 permet une petite proportion de réflexion, mais il va permettre d'enregistrer une plus grande partie de la zone de photoluminescence. Il sera nécessaire de tester les deux filtres afin de déterminer lequel des deux est le plus pertinent.

- LED verte



Les filtres candidats sont le Wratten 2 RED 25 et le Wratten 89B. Comme précédemment, le Wratten 2 RED 25 permet une petite proportion de réflexion, mais il va permettre d'enregistrer une plus grande partie de la zone de photoluminescence. Encore une fois, il sera nécessaire de tester les deux filtres afin de déterminer lequel des deux est le plus pertinent.

- LED rouge



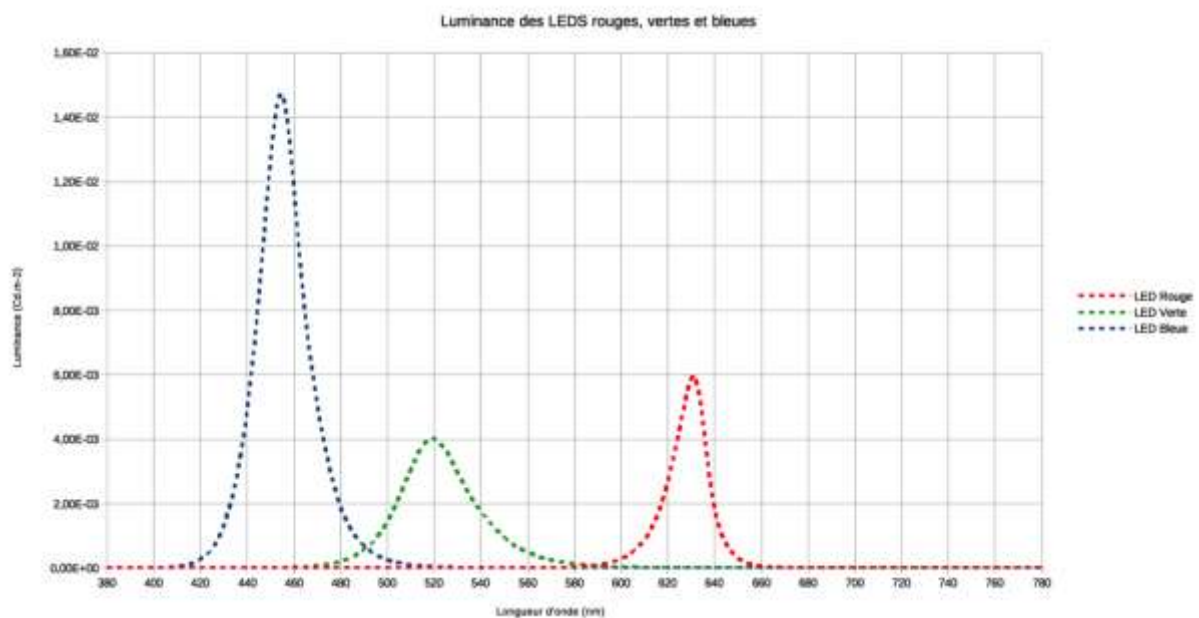
Les filtres candidats sont tous les filtres qui bloquent le visible. Le plus approprié semble être le Wratten 89B car il permet l'enregistrement d'un maximum de réémission de photoluminescence. La réflexion devrait être totalement éliminée, mais il sera tout de même important de le vérifier.

2.2.2. Calcul de l'exposition

- Comparaisons d'intensité

Afin de s'inscrire dans une démarche rigoureusement scientifique, il est serait nécessaire de maîtriser tous les éléments de la chaîne de prise de vue. Nous devons alors faire face aux problèmes de sensibilité spectrale du capteur, intensité lumineuse et densité des filtres. En effet, pour que la création de l'image fausse couleurs soit cohérente, il est nécessaire que les trois prises de vues soient alignées en termes d'intensité du signal, de couleur, de mise au point, de position, etc.

Pour commencer, voici la comparaison des trois éclairages rouges, verts et bleus du panneau de LED Slimpar 56 Chauvet :



Nous observons que les LEDS bleus sont plus puissantes que les verts et rouge, et que les LEDS verts ont une valeur de pic à mi-hauteur plus large. Il existe plusieurs moyens d'équilibrer ces intensités :

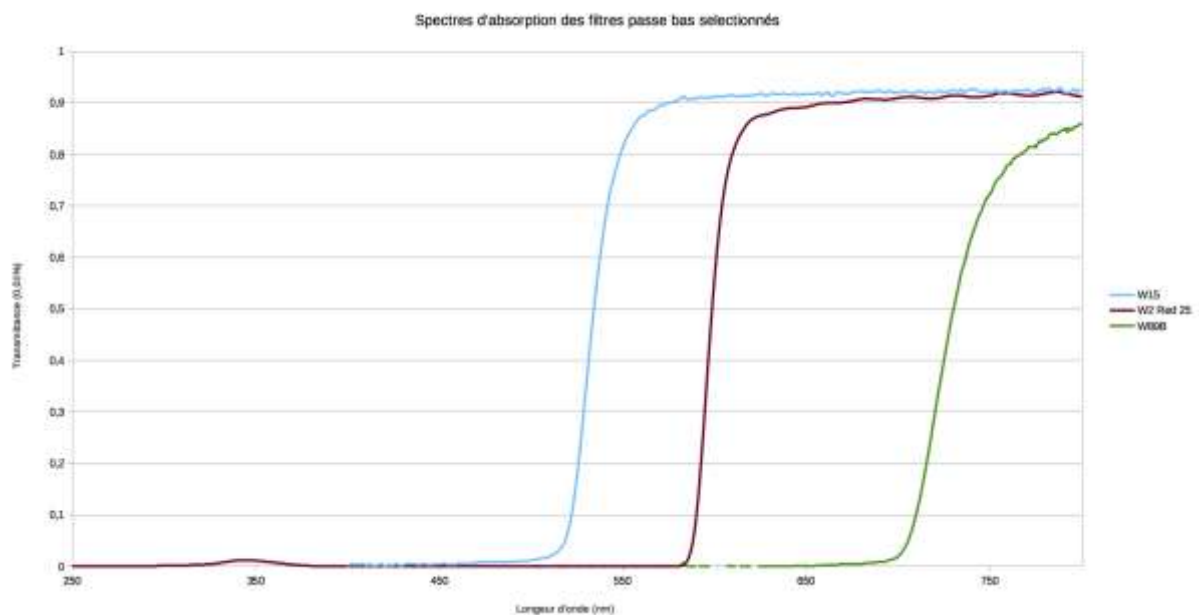
- L'utilisation de filtres de densité neutre. Elle est fastidieuse à mettre en place sachant que chaque LED de couleur nécessite un filtre spécifique, cette solution sera donc éliminée.
- Le changement de la distance entre la source lumineuse et l'objet. Des tests ont été réalisés, montrant que les déplacements impliquent un changement de place des reflets spéculaires sur les flacons, une imprécision due aux écarts de position et d'inclinaison des LEDS et une mise en place fastidieuse.

- La modification de l'ouverture. Elle est à éliminer car elle change la profondeur de champ qui doit rester la même pour former des images composites cohérentes.
- Le changement de la vitesse de prise de vue. Cette solution est pertinente car le phénomène de fluorescence est linéaire :

$$I_f = \Phi_f \cdot I_a = \Phi_f \cdot (I_0 - I_t)^{12}$$

I_f Intensité de fluorescence
 I_a Intensité du rayonnement absorbé
 I_0 Intensité du rayonnement incident
 I_t Intensité du rayonnement transmis

Nous pouvons aussi faire l'approximation que réponse du capteur dans le temps est linéaire¹³. Cette technique présente l'avantage d'être applicable avec tous les schémas d'éclairage et facile de réalisation (changement en un clic).



De la même manière, nous observons des disparités dans les valeurs de transmission des filtres. Pour les équilibrer, la modification de la vitesse sera également le paramètre le plus facile à contrôler. Nous allons par le calcul coupler les équilibres d'intensité lumineuse et de transmittance des filtres pour avoir seulement le paramètre de vitesse à ajuster.

¹² Eugénie Ringuette, spectrométrie de fluorescence moléculaire, Faculté de Médecine d'Alger - Département de Pharmacie - Laboratoire de Chimie Analytique, 2016.

¹³ P. Bonnet, Cours de Traitement d'Image, USTL, <http://www-lagis.univ-lille1.fr/~bonnet/image/capteurs.pdf>

- *Calcul d'équilibre*

Afin de prendre en considération la quantité de lumière émise par chacun des éclairages LED, Nous avons mesuré les spectres lumineux de chaque source. Les mesures de luminance réfléchies par le spectralon ont aussi été calculées par le spectroradiomètre.

	LED Bleue	LED Verte	LED Rouge
L_0	3,92E-001	1,61E-001	1,21E-001

Après calcul¹⁴, nous obtenons les résultats suivants :

	LED bleue / W15	LED bleue / W2R	LED verte / W2R	LED verte / W89B	LED rouge / W89B
t (s)	0,076t	0,102t	0,248t	0,752t	t
ΔIL	-3,72 EV	-3,32 EV	-2,01 EV	-0,41 EV	0

Afin de respecter la condition de la source ponctuelle, il est nécessaire d'éloigner au maximum les sources. En s'appuyant sur le protocole d'utilisation de la charte UV rédigé par Anne Wohlgemuth¹⁵, une distance de 2,5m sera choisie. Elle permet une utilisation optimale de la superficie des studios photo.

2.2.3. Linéarisation : interrogations et partis pris

Dans le cadre d'un protocole d'imagerie scientifique, il est indispensable de maîtriser la chaîne de prise de vue d'acquisition et de post production d'un point de vue optique et sensitométrique afin que le signal émis soit correctement retranscrit sur l'image finale. Il n'a pas été possible matériellement de procéder à une caractérisation spectrale du matériel d'acquisition, mais les conditions de prises de vues et le matériel étant identique entre les échantillons de référence et les objets photographiés, les résultats restent valables.

- *La trichromie*

Les systèmes de vision et d'enregistrement des couleurs que nous connaissons sont basés sur le principe de la trichromie. C'est un procédé de synthèse des couleurs basé sur l'utilisation du mélange de trois couleurs primaires entre elles pour synthétiser le maximum de couleurs possibles. Les protocoles d'imagerie scientifiques cherchent à reproduire des données physiques qui obéissent à un

¹⁴ Détails en annexe 7

¹⁵ Wohlgemuth, Anne, Rapport de stage de 2eme année, 2016.

système de fréquence ondulatoire. Les problématiques de représentation photographiques de données scientifiques apparaissent lors du passage d'un système à l'autre.

Les coordonnées de chromaticité des lampes LED rouge, verte et bleue sont proches de celles qui constituent les extrémités de l'espace adobe RVB 1998, pour que la représentation que nous allons proposer se rapproche le plus possible de ce système, c'est l'espace colorimétrique que nous allons choisir pour la postproduction sur Photoshop.

	ROUGE	VERT	Bleu
Pic spectral des LED (nm)	631	519	455
Extrémités de l'espace sRVB	610	550	466
Δ sRVB-LED (nm)	21	31	11
Extrémités de l'espace adobe RVB	610	535	466
Δ adobe RVB-LED (nm)	21	16	11
Extrémités de l'espace profoto RVB	700	530	470
Δ profoto RVB-LED (nm)	69	11	17

- *La balance des blancs*

L'information recherchée dans les images est la mesure de l'intensité du rayonnement de réémission. Les images étant destinées à une conversion en noir et blanc pour constituer une nouvelle couche de l'image composite, seule les valeurs de luminance sont pertinentes. La balance des blancs a surtout une influence sur la répartition des couleurs entre les couches rouges, vertes et bleues. Il serait alors nécessaire de mesurer la sensibilité spectrale du capteur afin de déterminer les pics de sensibilité des couches afin de calculer son blanc nominal. Nous pourrions aussi travailler avec un capteur noir et blanc afin de contourner ce problème.

Par soucis de productivité et de résultats, nous allons choisir la balance des blancs fixe et minimisé au possible son influence en réglant l'image en noir et blanc avec la même quantité de couleur RVBCMJ dans l'outil noir et blanc de Photoshop.

- *Capture*

Afin de linéariser la réponse de l'appareil, il est nécessaire de la calibrer. Un module disponible sur Phocus permet de gérer cette étape très facilement : le « color calibration ». Une mire color checker est analysée et les couleurs sont corrigées lors de l'export des images du RAW vers le TIF par le biais d'un profil icc.

Cette méthode nous permet de rester cohérents dans le domaine visible, mais la sensibilité infrarouge reste une inconnue. Les courbes de caractérisation génériques nous indiquent une remontée de la sensibilité des trois couches dans l'infrarouge¹⁶. Pour cette étude, nous allons négliger les problématiques de sensibilité spectrale du couple capteur / optique.

¹⁶ https://maxmax.com/spectral_response.htm, consulté le 08.10.2019.

Par la suite, un filtre pourra être ajouté pour lisser cette réponse. Nous pourrions aussi faire évoluer le processus en réalisant une nouvelle prise de vue avec des filtres spécifiques nous permettant d'enregistrer des fenêtres de rayonnement pour les pondérer avec le reste du spectre.

- *Logiciels de post production*

Les logiciels de postproduction restent opaques sur leurs méthodes de traitement des couleurs au moment du développement Raw. L'utilisation de Matlab pour la post production est impossible à mettre en place durant ce stage, c'est pourquoi nous allons négliger les modifications effectuées par les algorithmes de Phocus, le logiciel utilisé pour le développement au C2RMF.

- *Charte*

Le phénomène étudié étant particulier et inédit en imagerie, aucune matière n'a été isolée pour ses propriétés de fluorescence linéaire sous éclairage visible. Nous pouvons calculer les proportions de rouge vert et bleu pour l'équilibre, mais il n'y a pas de moyen simple qui permette de le mesurer. Il devient alors compliqué de faire concorder toutes les images en termes d'intensité et d'équilibre. Il existe cependant deux échantillons qui produisent une fluorescence notable sous éclairage visible : la charte de bleu égyptien et l'échantillon de garance. Nous pourrions les utiliser pour définir un équilibre entre les images issues de ces prises de vue. Nous allons aussi tenter de minimiser les variables de prise de vue et de postproduction pour un résultat cohérent comparativement.

Pour aller plus loin, il sera nécessaire de faire analyser l'absorbance spectrale de certaines matières clés, d'en déduire les valeurs $L^*a^*b^*$, et de s'en servir comme référence pour la postproduction. Ces valeurs peuvent être obtenues par des analyses réalisables à chimie Paris pour obtenir des spectres 3D prenant en compte toutes les longueurs d'ondes renvoyées par la matière pour chaque éclairage monochromatique. Cette analyse a déjà été réalisée pour certains échantillons¹⁷.

¹⁷ Yin, Huanchu, rapport de stage de 3eme année, cycle ingénieur, 2016.

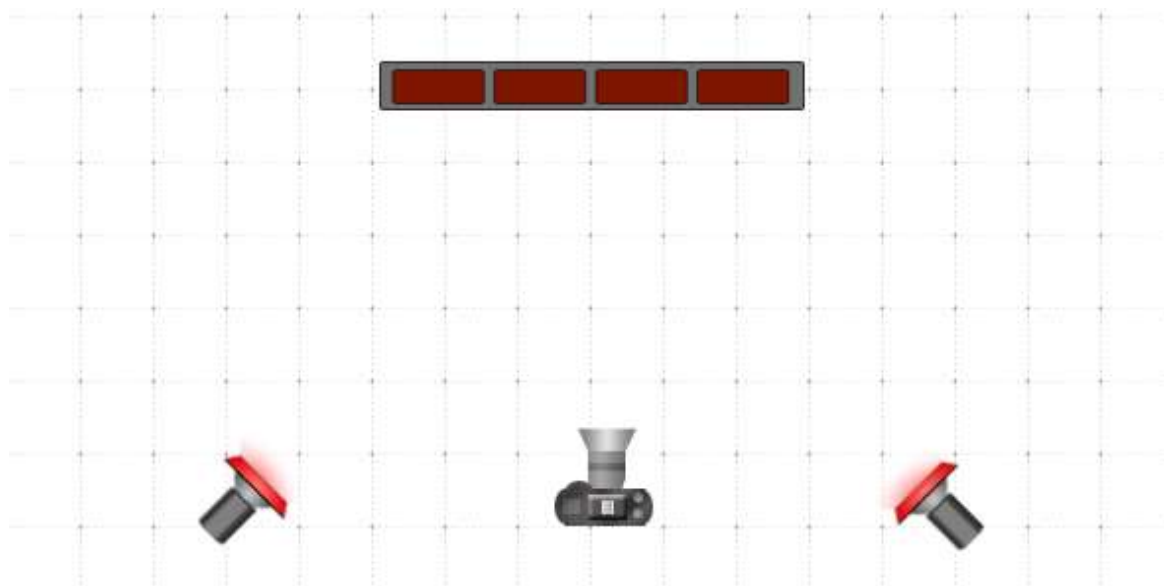
2.3. Mise en place du protocole

Les pigments utilisés pour tester et développer le protocole ont été choisis auprès du fabricant KREMER. Leur composition a été contrôlée en amont¹⁸ ; certains d'entre eux sont dits « historiques », quand leur fabrication vise à se rapprocher des procédés anciens, employés avant la révolution industrielle, d'autres sont plus récents comme le cadmium, le cobalt, le chrome ou des composés organiques, non utilisés avant le XIX^{ème} siècle, mais on trouve aussi des matériaux contemporains comme les pigments fluorescents ou les paillettes. Dans un premier temps, nous avons choisi d'examiner la totalité des échantillons disponibles dans la gamme d'échantillons purs. Ceci nous permet d'isoler un certain nombre de pigments d'intérêt, sur lesquels nous allons poursuivre l'analyse. La finalité de ce travail est de constituer une première bibliothèque de référence pour l'identification.

Le matériel de prise de vue se compose d'un boîtier Hasselblad H4D-60, défiltré pour infrarouge ainsi qu'un objectif HC macro 4/120 mm II Hasselblad, corrigé pour l'infrarouge (IR coating). La capture et le développement RAW se font avec le logiciel Phocus sur des Macbooks pro.

2.3.1. Eclairage

Nous pouvons considérer les équations précédentes comme exactes seulement si l'éclairage est symétrique verticalement et horizontalement et que les différentes torches sont situées à la même distance du sujet. Il faudra veiller à respecter ces conditions lors des prises de vues. Pour faciliter la mise en place, nous allons établir une inclinaison standard de 45° par rapport à la surface de l'œuvre à photographier.



¹⁸ Tableau des compositions disponible en annexe 8

2.3.2. Exposition

Voici ci-dessous un tableau rappelant les écarts d'exposition nécessaires entre chaque filtre. Les vitesses disponibles sur le logiciel de capture sont en tiers de diaph et ne permettent pas d'être aussi précis que les calculs théoriques. Il sera nécessaire d'ajuster les valeurs avec le correcteur d'exposition Phocus lors du développement des images brutes.

	ROUGE	VERT W89B	VERT W2R	BLEU W2R	BLEU W15
Δ EV théorique	0	-0,41	-2,01	-3,32	-3,72
Vitesse	8	6,3	2	0,6	0,6
Δ EV expérimental	0	-0,33	-2	-3,66	-3,66
Δ EV Phocus	0	-0,08	-0,01	+0,34	-0,06

Afin de vérifier l'absence de reflets spéculaires, un spectralon blanc sera placé sur les images. Le spectralon a la particularité de réfléchir 99,9% des rayonnements dans le visible dans toutes les directions. Il peut être assimilé à une matière parfaitement lambertienne.

Lors de la prise de vue, n'ayant pas de charte pour ajuster l'exposition, un bracketing a été réalisé afin de déterminer la meilleure exposition possible. L'ouverture a été fixée à 8, pour permettre d'exploiter au maximum les qualités de l'optique. Dans un premier temps, une vitesse de 8s a été choisie pour le rouge, car ce réglage était le premier où le spectralon n'apparaît pas. Les résultats étaient convaincants pour les échantillons de pigments purs, mais après une confrontation avec des œuvres où le signal est souvent beaucoup plus faible, les prises de vues qui serviront de référence ont été re-photographiées avec un temps de pose de 32 secondes, qui va correspondre au temps de pose utilisé pour photographier les œuvres. L'élimination des réflexions en postproduction sera alors préférée car elle permet de garder un signal plus intense.

2.3.3. Choix des filtres

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs filtres sont candidats pour éliminer la réflexion des différentes LED. Afin de déterminer les plus pertinents, nous avons photographié les échantillons avec plusieurs combinaisons de filtres. Pour la LED rouge, le filtre Wratten 89B semble pertinent sur les graphiques, car il n'y a pas de zone de chevauchement entre l'absorbance spectrale du filtre et le spectre d'émission de la LED. Concernant la LED verte, une zone de chevauchement apparaît avec l'utilisation du filtre Wratten 2 Red 25, il sera donc nécessaire de comparer le résultat avec une image prise avec le filtre Wratten 89B, le filtre avec le spectre le plus proche sans chevauchement. La même question se pose pour la LED bleu, entre le filtre Wratten 15 et le filtre Wratten 2 Red 25.

Le but de ce test est de trouver le bon compromis entre un filtre qui coupe trop de longueurs d'onde et nous fait perdre une partie de la fluorescence et un filtre qui permet trop de réflexions

parasites. Ces réflexions existent quel que soit le filtre utilisé, et sont ensuite éliminées en post production en prenant le noir sur le spectralon. Les images brutes et post-produites couleur par couleur sont disponibles en annexe¹⁹. L'image intermédiaire avec seulement une prise de noir, et l'image post produite sans prise de noir sont aussi ajoutées pour visualiser l'impact de la prise de noir et pouvoir faire un choix cohérent.

Le fonctionnement trichrome des capteurs ne permet pas de différencier la différence de longueur d'onde au sein d'une même couche, par exemple pour la LED verte, les principales longueurs d'ondes enregistrées seront sur la couche rouge. Un signal parasite, autour de 600nm sera éliminé de la même manière qu'un signal à 750nm, qui provient quant à lui d'une fluorescence lors de la prise de noir. Pour cette raison, le filtre Wratten 2 Red va être éliminé pour l'enregistrement de fluorescence sous éclairage vert, le signal perdu est plus important qu'avec le Wratten 89B.

Le cas de la LED bleue est différent, car les réflexions sont enregistrées sur les couches vertes et bleues, où il y a peu ou pas de fluorescence. Le choix est ici plus compliqué car le signal est plus fort avec le Wratten 2 Red 25, mais moins discriminant. Il paraissait plus judicieux d'ajuster le protocole au niveau de la finesse de la réponse plutôt que l'intensité, car la chaîne d'acquisition n'est pas calibrée. Le filtre Wratten 15 a donc été choisi.

Afin de vérifier la pertinence de ces choix visuellement, les images des boîtes ont été post produites en images CFV²⁰.

Nous utiliserons donc les réglages suivants :

	ROUGE W89B	VERT W89B	BLEU W15
ΔEV théorique	0	-0,41 EV	-3,72 EV
ΔEV expérimental	0	-0,33 EV	-3,66 EV
ΔEV Phocus	0	-0,08 EV	-0,06 EV

Afin de guider les photographes dans le choix de leur exposition, nous allons créer un tableau d'équivalences afin qu'ils puissent ajuster leur exposition en fonction de la réponse lumineuse de l'objet :

LED rouge		LED verte		LED bleue	
†	ΔEV Phocus	†	ΔEV Phocus	†	ΔEV Phocus
8	0	6,3	-0,08	0,6	-0,06
16	0		-0,08		-0,06

¹⁹ Annexe 9

²⁰ Annexe 10

32	0	25	-0,08	2,5	-0,06
----	---	----	-------	-----	-------

Un guide d'utilisation qui résume les résultats de cette étude est disponible en annexe²¹. Ce document permet de garder une trace concrète du protocole pour une éventuelle reprise de l'étude.

²¹ Livrable 1

2.4. Post production

Pour illustrer le processus de postproduction, nous allons utiliser l'exemple de la boîte de pigments Kremer numéro 3. Voici une image dans le visible des échantillons :

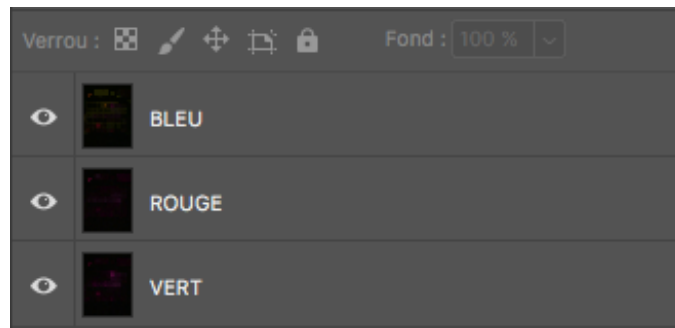


Image en lumière directe de la boîte de pigments Kremer n°3

Pour la composition de l'image composite, nous allons représenter les couleurs comme étant celles utilisées par l'élément pour produire la fluorescence :

- La couche bleue de l'image composite sera une addition des trois couches de l'image réalisée avec l'éclairage bleu, en niveau de gris.²²
- La couche verte de l'image composite sera une addition des trois couches de l'image réalisée avec l'éclairage vert, en niveau de gris.¹⁷
- La couche rouge de l'image composite sera une addition des trois couches de l'image réalisée avec l'éclairage rouge, en niveau de gris.¹⁷

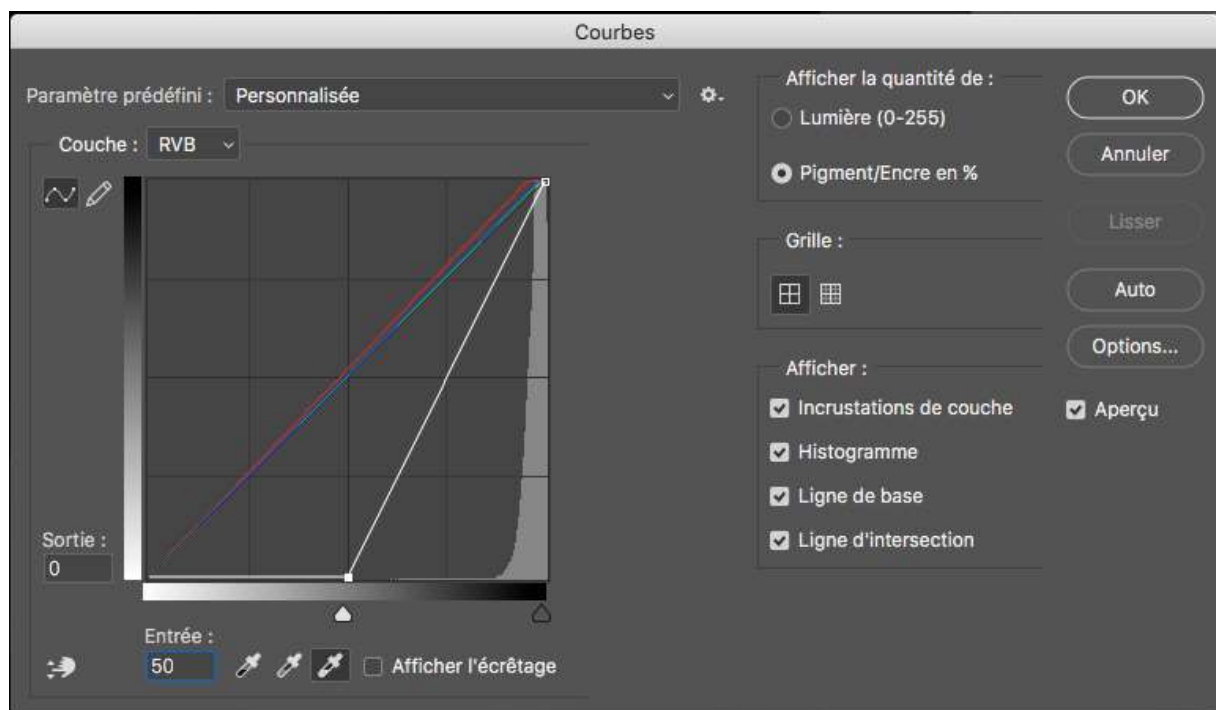
²² Exemple d'images réalisées avec les éclairages rouges, vert, et bleu, avant et après postproduction en annexe 9



Capture d'écran de la fenêtre des couches dans Photoshop

Un script va être créé afin d'automatiser la chaîne de production et d'éviter les écarts de résultats. La première étape est de placer trois images réalisées sous lumière rouge verte et bleu en tant que calques dans un document Photoshop. L'utilisation de Bridge est recommandée pour cette étape. Il faut ensuite renommer et organiser les calques comme sur l'illustration ci-contre.

La seconde étape sera de définir les niveaux de l'image. Pour cette étape, une intervention de l'opérateur est nécessaire pour faire la prise de noir. Il est recommandé d'utiliser la pipette de prise de noir sur le spectralon blanc. Cette étape a lieu avant le passage au noir et blanc pour remonter les noirs couche par couche, sans perdre d'éventuelles informations dans les autres couches de l'image. Il est alors nécessaire d'amplifier le signal en remontant l'image dans les blancs. La valeur de référence sera établie pour un blanc à 50%, ou 127 VN.



Capture d'écran de l'outil « courbes » de Photoshop

Le script va ensuite passer chacune de ces images en noir et blanc avec l'outil de conversion réglé pour que chaque couleur rouge, verte, bleu, magenta, jaune et cyan soient à 100%.

L'outil « opérations » sera ensuite utilisé par le script pour dupliquer la couche grise de chaque calque, dans l'ordre rouge, verte puis bleue afin que les nouvelles couches s'organisent d'elles même dans le bon ordre. Les couches rouges, vertes et bleues d'origine vont alors être supprimées. L'image est alors composée des trois couches d'intérêt en mode « multicouche », le script va changer le mode de l'image en RVB pour obtenir l'image finale.

La dernière étape proposée par le script est l'enregistrement, où l'utilisateur a le choix pour le nom, le format et l'emplacement du fichier.

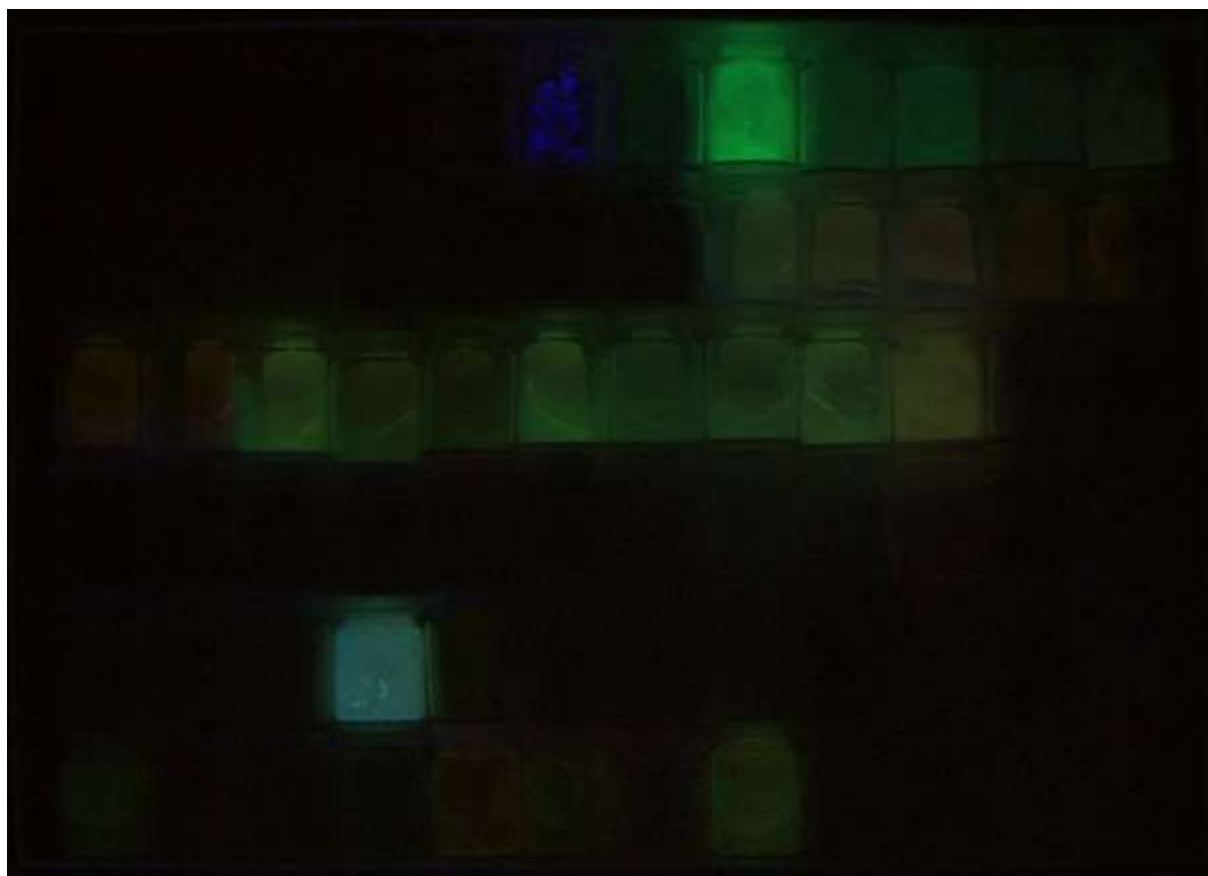


Image en imagerie CFV de la boîte de pigments Kremer n°3 après postproduction

Des images de chaque couche sont ajoutées aux images CFV pour le référencement des échantillons²³. L'image CFV permet en effet d'enrichir l'observation du phénomène en proposant d'observer les proportions entre chaque réaction. Elle est complétée par l'image de chaque couche qui permet d'identifier les faibles réactions qui seraient masquées par les autres couleurs. Les échantillons qui réagissent à cette imagerie sont recensés dans une liste²⁴.

²³ Livrable 2

²⁴ Livrable 3

3. Test sur des œuvres

3.1. Echantillons appliqués du département peinture

La bibliothèque de pigments purs qui a permis d'établir le protocole ne représente pas l'état réel des pigments qui se trouvent sur les œuvres. En effet, ils sont souvent mélangés à une mixtion, un liant, ou d'autres pigments. Des échantillons ont été créés pour répondre à cette problématique par Gilles Bastian et Elisabeth Ravaud lors du mémoire d'Anne Paounov en 2009.

« Les pigments liés sont déposés sur un panneau transparent de type plexiglass®. La transparence de celui-ci facilite certains examens, au microscope par exemple. Les pigments sont liés à l'huile, une autre série est liée au jaune d'œuf selon la méthode appelée tempéra. Afin d'éviter d'éventuelles interactions avec la peinture, le support n'est pas préparé et l'huile ne contient pas de siccatif. L'absence de siccatif entraîne un allongement considérable du temps de séchage des couleurs à l'huile.

Afin de réaliser les panneaux, les pigments sont pesés et broyés à l'eau. Ensuite est ajouté le liant et un broyage est effectué jusqu'à obtention d'une substance facile à étendre. L'étalement est effectué au pinceau de manière à obtenir une surface la plus homogène possible. Enfin, les plages de peinture sont séchées à l'air.

Bien que la fabrication au sein du laboratoire des panneaux permette une connaissance des éléments constitutifs, les proportions exactes du mélange liant/pigment sont difficiles à contrôler. Chaque pigment possède une granulométrie qui influe sur sa couleur, un pouvoir couvrant et une miscibilité dans le liant qui lui sont propres. Ces caractéristiques peuvent causer une difficulté d'étalement entraînant la non uniformité de certaines plages. »²⁵

Les images issues de cette prise de vue sont disponibles en annexe²⁶, ainsi que le tableau récapitulatif des résultats observés²⁷.

Certains échantillons identiques aux poudres Kremer testées plus tôt ont des réactions différentes. L'hypothèse selon laquelle les composés changeraient de réaction optique lors de mélanges avec d'autres composés qui réagissent ou non avec la technique du CFV doit être vérifiée. Ces échantillons demandent à être analysées de manière plus poussée, avec l'aide de spécialistes avant de pouvoir agrandir la bibliothèque d'échantillons de référence. Les résultats sont tout de même encourageants, car certains composés organiques, comme le blanc d'œuf, réagissent à cette imagerie, alors qu'ils sont difficiles à détecter en analyse chimique.

²⁵ Cité par Anne Paounov, L'ultraviolet fausses couleurs, une méthode d'identification des pigments picturaux : vers un protocole de prise de vues destiné à l'ultraviolet. Dirigé par Elisabeth Ravaud et Alain Sarlat, ENS Louis-lumière, 2009, p62.

²⁶ Livrable 4

²⁷ Livrable 5

3.2. Cobaye one

Afin de confronter ce protocole à la réalité des œuvres, Thomas Calligaro, chercheur spécialisé en imagerie non destructive pour le C2RMF, a mis à disposition un tableau du 18^{ème} siècle dont l'analyse chimique par fluorescence sous X²⁸ et l'imagerie²⁹ ont déjà été effectuée. Afin de prouver la pertinence de cette technique d'imagerie, une analyse comparative pourra alors être effectuée en utilisant le fond d'images des pigments purs présentés auparavant.



Image en lumière directe du tableau Cobaye one

Les résultats de la première imagerie composite ont montré que l'exposition était trop faible pour détecter les nuances de couleurs, il a fallu refaire la prise de vue en ajustant l'exposition à 32 secondes pour le rouge. Il faut en effet adapter la sensibilité du protocole aux œuvres dont les signaux sont plus faibles que les échantillons purs en conséquence de leur âge et de la concentration variable du composé d'intérêt.

Voici le tableau avec le temps d'exposition adapté en CFV :

²⁸ Cartographie chimique du tableau disponible en annexe 11

²⁹ Résultats des différentes techniques d'imagerie réalisées sur ce tableau en annexe 12



Image en CFV du tableau Cobaye one

Nous observons :

- Une restauration dont la matière utilise le rayonnement vert-jaune
- Le pigment utilisé pour les parties claires du ciel qui utilise un rayonnement bleu
- La partie basse du tableau qui ne produit pas de fluorescence sous éclairage visible

Les pigments qui apparaissent verts dans nos images CFV de référence et rosés dans le visible sont :

Certains Cadmiums
L'orange paliogen
Le rouge zirconium

En comparant l'image avec les images chimiques, nous pouvons en effet identifier la présence de Cadmium à cet endroit, mais cette réponse pourrait aussi être causée par d'autres composants qui ne font pas partie de nos échantillons. En effet, nous remarquons aussi sur cette zone la présence de titane et de zinc.

Les pigments qui apparaissent bleu en CFV et clair en lumière visible sont :

La diopside
Les spores de lycopade
La gomme mastic de Chios

L'ambre jaune
Une grande partie des gommages, laques et colles

La couche bleue a été isolée pour faciliter la comparaison avec les autres techniques d'imagerie. Il est alors plus simple d'isoler les zones qui réagissent au bleu, afin de comparer le dessin précis de ce composé.



Couche bleue de l'image CFV du tableau Cobaye one

Aucune image de l'analyse de fluorescence sous X ne semble correspondre dans ce cas. Il serait nécessaire d'améliorer le protocole afin de s'assurer que cette réponse ne soit pas causée par un défaut dans le processus d'élimination des réflexions. Il pourrait aussi s'agir d'un composé organique qui n'apparaît pas dans l'analyse chimique. Les zones concernées correspondent aussi à l'image en infrarouge réalisée par Alexis Komenda, photographe pour le C2RMF.

3.3. Colonne du département dorure

Une colonne en ivoire plaquée d'or, extraite d'un meuble de voyage du 16^{ème} siècle³⁰ a fait l'objet d'une analyse en imagerie. La restauratrice Stéphanie Courtier, spécialiste de la dorure, et Maxime Lopez, qui réalise une thèse sur l'utilisation des lasers en restauration, ont lancé une étude sur l'utilisation du dégagement laser en restauration. Sur cet objet, la moitié supérieure de la colonne a subi un dégagement laser, l'autre partie est restée telle quelle. Ce document ainsi que les images réalisées à cette occasion serviront pour des illustrations du dégagement laser, mais aussi pour la demande de mise en place d'un projet d'étude autour de la restauration de cet objet.

Bien que la technique du CFV ne soit pas assez développée pour aboutir à des résultats d'identification, elle prouve ici son utilité. Combinée aux autres techniques d'imagerie, elle permet ici d'établir une stratigraphie de l'objet de manière non destructive. Un compte rendu de cette analyse d'imagerie est disponible en annexe³¹.




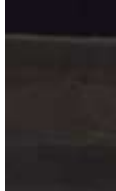
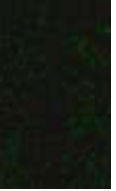





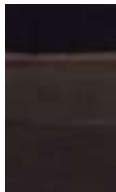

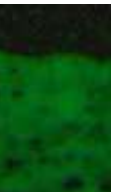







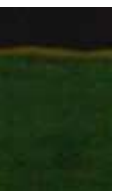



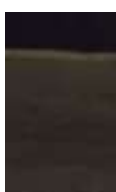













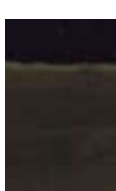



3.3.1. Test d'échantillons spécifiques à la dorure

Dans un premier temps, il était nécessaire de tester des échantillons appliqués sur de la dorure afin de créer un référentiel qui permette de caractériser la réaction en CFV d'échantillons purs, mélangés à deux liants différents, et appliqués sur une dorure, afin de se rapprocher des conditions techniques de l'objet. Nous avons testé ici différents pigments cadmiums car nous savons qu'ils sont utilisés en charge dans les couches préparatoires et qu'ils ont une réaction en CFV. Les liants utilisés sont la colle de peau de lapin et un vernis gomme laque blond dé-ciré.

³⁰ Dossier de restauration en annexe 13

³¹ Livrable 6

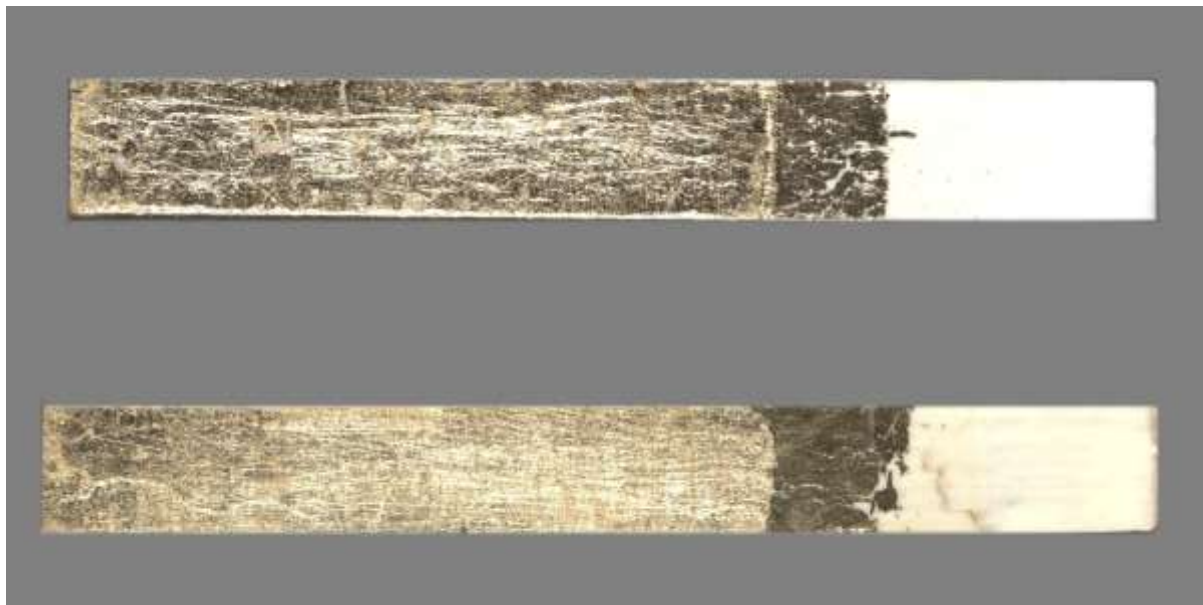
Voici ci-dessous un tableau récapitulatif des résultats obtenus :

Liant	Visible		UV		CFV		
	Colle de peau	Vernis gomme laque blond décirée	Colle de peau	Vernis gomme laque blond décirée	Pigment pur (poudre)	Colle de peau	Vernis gomme laque blond décirée
Liant pur							
Cadmium (N.1) 21100 Kremer (orange)							
Cadmium rouge 605 Sennelier (Clair veritable)							
Cadmium jaune cadmiumgello (N.1) Zitron Sennelier							
cadmiumgello (N.6) Mittel							
Jaune de chrome 549 Sennelier							

Sur les images, nous voyons les échantillons appliqués sur la partie basse de l'image et la dorure à nu sur la partie haute pour servir de témoin.

Nous observons que la réponse des différentes imageries varie selon la concentration en liant, la forme des pigments solides ou liquides, et la présence d'un liant réactif ou non aux imageries. Il sera nécessaire de prendre ces variables en compte lors de la considération des résultats.

Nous avons aussi pu tester des éprouvettes sur ivoire, composées de deux dorures appliquées à la mixtion et superposées afin de reproduire la problématique. Un des échantillons a été placé dans une chambre de vieillissement accéléré afin que nous puissions déterminer l'effet du temps sur la réponse visuelle des matériaux.



Échantillons d'ivoire recouvert d'une couche de vernis, puis de deux dorures à la mixtion superposées. L'échantillon inférieur a subi un vieillissement artificiel. Imagerie visible.



Échantillons d'ivoire recouvert d'une couche de vernis, puis de deux dorures à la mixtion superposées. L'échantillon inférieur a subi un vieillissement artificiel. Imagerie UV.



Échantillons d'ivoire recouvert d'une couche de vernis, puis de deux dorures à la mixtion superposées. L'échantillon de droite a subi un vieillissement artificiel. Imagerie CFV.

Sur ces échantillons, seules les informations concernant la réponse de l'ivoire et de la dorure sont confirmées. Le vernis n'est pas mis en évidence par ces techniques d'imagerie.

	Visible	UV	CFV
Dorure	Doré	/	/
Ivoire	Blanc	Blanc	Bleu

3.3.2. Imagerie de la colonne



Colonne, vue générale. Imagerie visible.

Lors de la vue d'ensemble, en lumière visible, nous pouvons distinguer l'ivoire, des parties dorées et des mixtions.

Grace à l'image visible, il a été possible d'identifier :

- Une couche d'or n°2 (feuille d'or)
- Une couche de mixtion n°2 de couleur marron, située sous la couche d'or n°2
- Une couche d'or n°1 (feuille d'or)
- Une mixtion orange
- Une base en ivoire

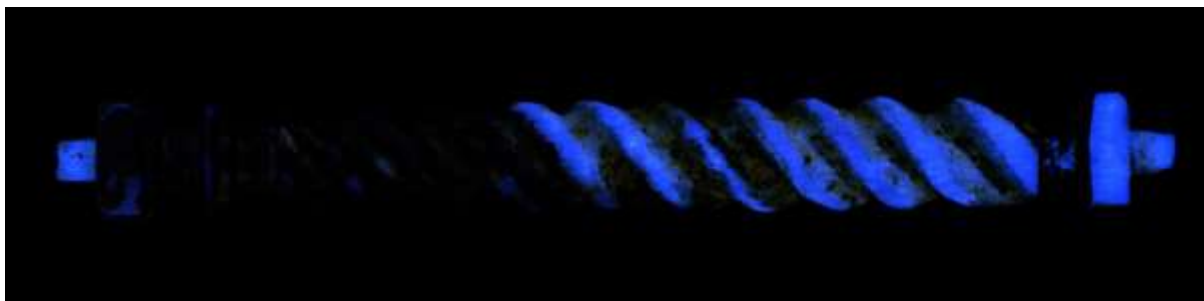


Colonne, vue générale. Imagerie UV.

L'image UV est d'une couleur différente dans les creux de la colonne non dégagée au laser.. La comparaison des détails de la partie dégagée permet aussi d'identifier un composé qui recouvre une couche d'or.

Grâce à l'image UV, il a été possible d'identifier :

- La présence d'une couche orange translucide qui recouvre l'or n°1 de la partie dégagée
- La présence d'une couche jaune dans les creux, par-dessus l'or n°2, sur la partie non dégagée



Colonne, vue générale. Imagerie CFV.

Sur la partie dégagée, une partie du vernis apparaît de la même couleur que l'or, jaune, tandis qu'une autre partie apparaît marron foncé.

L'image composite de fluorescence sous éclairage visible (CFV) montre trois rayonnements notables utilisés par les matières pour produire une fluorescence : l'ivoire qui apparaît bleu, une couche en contact direct avec l'ivoire, apparaît orange, une couche apparaît verte-orange, qui pourrait correspondre à une nouvelle couche, ou s'apparenter à la réponse orange polluée par le reflet bleu de l'ivoire, une autre couche apparaît bleue en CFV mais ne correspond pas à des parties où l'ivoire est apparent. La couche qui utilise le rayonnement vert-orange semble placée au-dessus de la couche qui ne fluoresce pas, et correspond à une couleur dorée dans le visible. Sur la partie non dégagée de la colonne, il n'y a aucune fluorescence, ce qui nous permet de déduire que les mixions visibles sont internes.

Grâce à l'image CFV, il a été possible d'identifier

- La présence d'une couche à même l'ivoire qui utilise un rayonnement orange
- La présence d'une couche intermédiaire qui utilise un rayonnement vert-orange
- La présence d'une couche par-dessus l'or n°1 qui utilise un rayonnement bleu

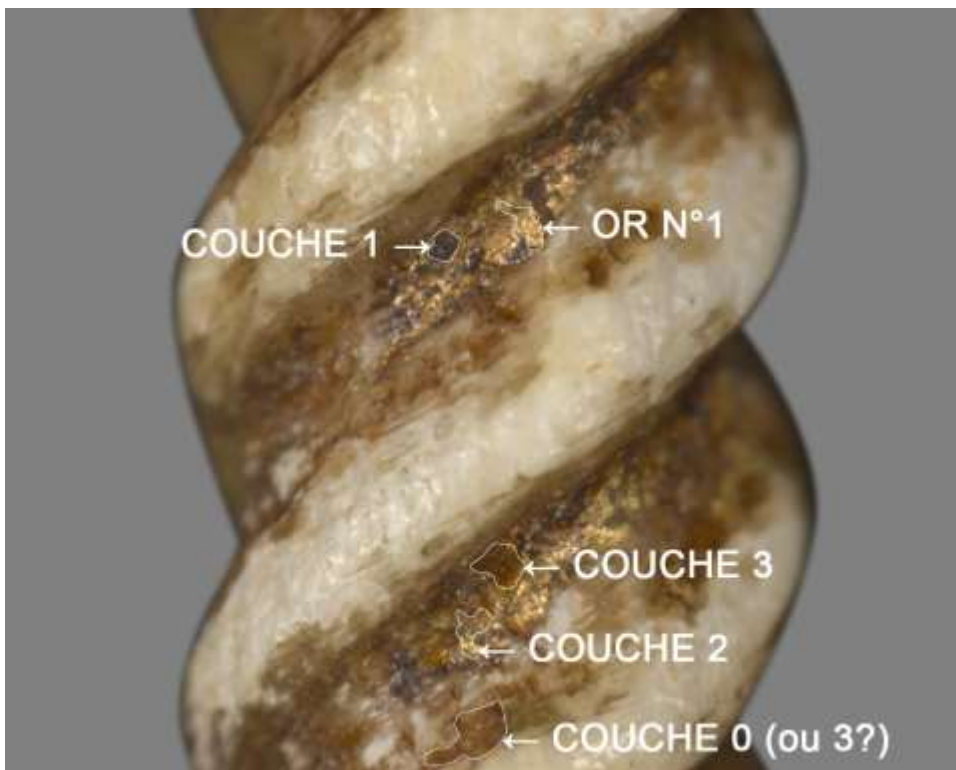
3.3.3. Résultats

- Stratigraphie

Pour établir l'ordre des différentes couches, il est nécessaire d'observer un détail de l'objet.



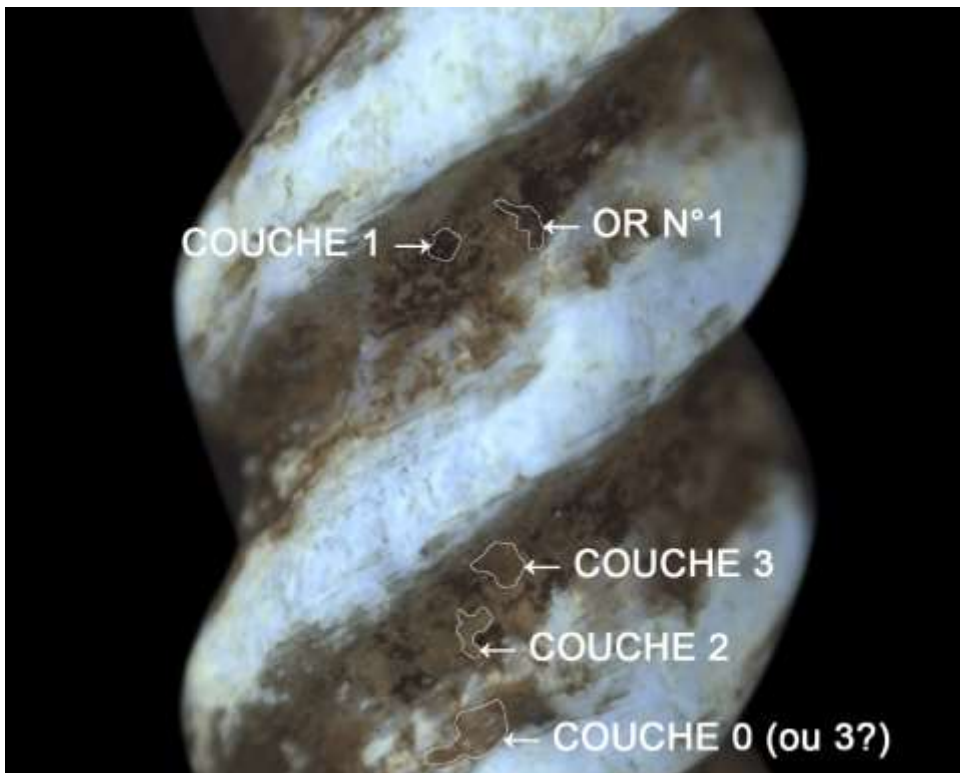
Détail de la colonne, imagerie visible.



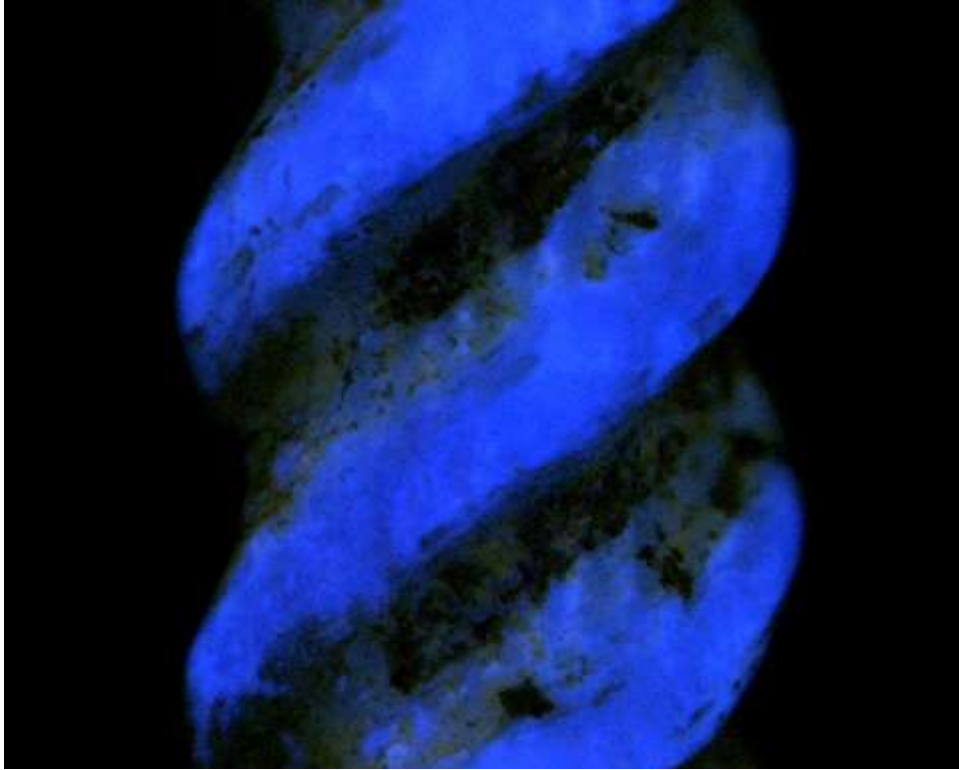
Détail de la colonne légendé, imagerie visible.



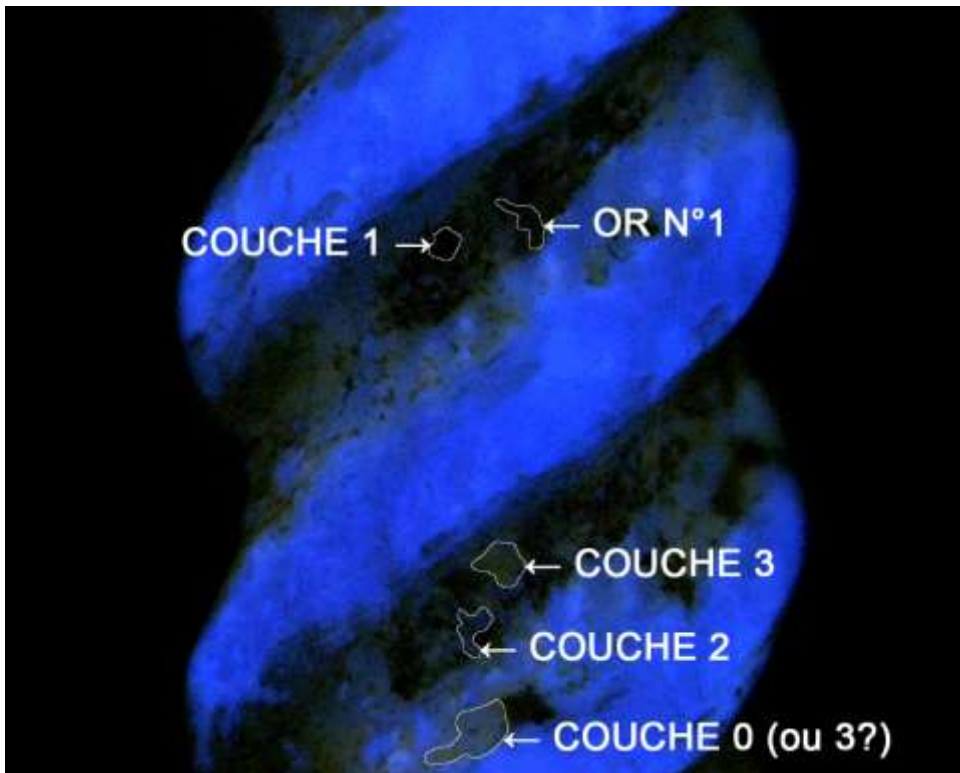
Détail de la colonne, imagerie UV.



Détail de la colonne légendé. Imagerie UV.



Détail de la colonne, imagerie CFV.



Détail de la colonne légendé, imagerie CFV.

Nous arrivons alors au résultat suivant :

	Visible	UV	CFV
Couche 4	/	jaune	/
Or n°2	Doré	/	/
Couche 3	Orange translucide	Orange-marron	Orange / Vert
Couche 2	/	Jaune foncé	Bleu
Or n°1	Doré	/	/
Couche 1	Marron	/	/
Couche 0	Orange translucide	Orange-marron	Orange
Base	Blanc	Blanc	Bleu

Dans ce tableau, le symbole / symbolise l'absence de réponse visuelle. En visible, cela sera utilisé pour les matières transparentes, en fluorescence, pour les matières qui apparaissent noires.

Nous pouvons émettre l'hypothèse que la couche 0 est la même que la couche 3 qui a été appliquée sur une colonne usée, parfois a même l'ivoire, parfois par-dessus d'autres couches.

Concernant la couche 2, elle pourrait elle aussi être confondue à la couche 3 car les réponses d'imagerie sont proches. La forme des démarcations en UV entre la couche orange et la couche jaune nous permettent cependant d'éloigner cette possibilité. Les résultats en imagerie CFV sont cependant indispensables pour confirmer cette déduction.

- *Identification - Bibliothèque Kremer*

Pour guider l'identification, nous pouvons relever les composés testés qui réagissent de la même manière au sein des échantillons Kremer étudiés préalablement. Il faudra cependant veiller à confirmer ces résultats par une autre méthode d'analyse. Cette proposition de piste prend seulement en compte les résultats obtenus avec l'imagerie CFV, elle pourra être affinée avec une analyse des résultats de l'imagerie UV. Il est important de souligner que les échantillons testés ne représentent qu'une partie des matériaux entrant dans la composition des objets, la réaction peut être due à un

composé non répertorié ou un mélange de plusieurs composés dont la réaction sera différente de celle observée dans les échantillons de référence.³²

Liste des matériaux sélectionnés et candidats à la composition des couches préparatoires :

- Composés candidats pour la composition de la mixtion 2 :

Colles et gommes diverses

- Composés candidats pour la composition de la mixtion 3 :

Gomme laque
Blanc de titane
Sang dragon en poudre
Safran
Cadmium divers
Rouge Zirconium

- *Identification – Histoire des techniques*

L'analyse d'imagerie a permis la stratigraphie des couches, mais aussi de donner des pistes concernant l'identification des composants. En croisant les informations obtenues avec l'histoire des techniques des différentes époques de fabrication et de restauration de l'objet, il a été possible d'établir le tableau suivant :

	Identification
Couche 4	Vernis ou cire
Or n°2	Feuille d'or
Couche 3	Mixtion à l'huile
Couche 2	Glacis ou couche d'accroche ?
Or n°1	Feuille d'or
Couche 1	Mixtion à l'huile
Base	Ivoire

³² Livrable 3

3. Conclusion

3.1. Analyse du protocole

L'imagerie composite de fluorescence sous éclairage visible à l'avantage de pouvoir représenter en image des phénomènes qui n'étaient visibles qu'à la suite d'analyses spectrométriques poussées, et visualisables sous forme de courbes uniquement. Elle est inédite sous sa forme composite et a prouvé son efficacité sur des œuvres. Elle a pu apporter de nouvelles informations, notamment dans l'analyse de la colonne du bargueno, et a été validée pour faire partie de l'analyse d'imagerie officielle. Cette méthode va aussi être ajoutée aux techniques d'imageries pratiquées par les photographes du C2RMF.

Bien que la technique reste valable dans le cadre du C2RMF qui l'utilise de manière comparative, il est intéressant de mettre en place une démarche de normalisation et d'amélioration qui puisse uniformiser et optimiser les résultats au maximum, quel que soit le matériel utilisé.

La mise au point, par exemple, varie en fonction de la couleur de la torche utilisée. Un calcul serait nécessaire pour l'ajuster avec le logiciel Phocus qui propose un décalage de la mise au point par paliers fixes. Il est impossible de faire cette mise au point manuellement car le temps de pose pour enregistrer le signal est de plusieurs secondes. La faible sensibilité des signaux de fluorescence reste problématique concernant l'analyse des résultats.

Aussi, les filtres n'étant pas assez discriminants pour le matériel utilisé, le taux de lumière réfléchi reste important face au flux de lumière réémise. Une recherche de filtres ou de sources plus adaptés pourrait réduire ce phénomène et améliorer la réponse visuelle.

Elle présente cependant des failles, certaines relèvent de l'approximation dues au manque de temps et de moyens de mesures spécifiques, certaines ne peuvent se détacher du principe même de la technique, soit l'imagerie multicouche. En effet, si on considère la répartition spectrale du rayonnement utilisée par les matières pour produire la fluorescence, la courbe pourrait être peu continue et présenter de nombreuses et soudaines variations. La vision et la création d'images repose aujourd'hui sur la synthèse trichrome des couleurs, aussi bien en photographie argentique, numérique qu'en vision directe. Le phénomène de photoluminescence quant à lui, repose sur les principes de la physique de la lumière qui associe la couleur à la longueur d'onde du rayonnement. Il est donc inévitable d'obtenir des aberrations en termes de représentation stricte du phénomène. On remarque en effet que nous soumettons la matière à seulement trois rayonnements, les seules informations que nous avons concernent la réaction des matières pour ces longueurs d'ondes uniquement. Il est alors important de prendre conscience que l'apparition d'une couleur jaune sur l'image fausse couleur ne signifie pas que la matière utilise un rayonnement jaune pour produire de la fluorescence, mais un rayonnement bleu et un rayonnement vert.

Une réflexion mériterait d'être menée concernant la méthode de représentation. Une technique d'imagerie multispectrale permettrait d'améliorer l'identification en proposant plusieurs fenêtres plus discriminantes. Le piqué des images CFV n'est pas suffisant pour que la perte de représentation de l'œuvre soit pertinente à prendre en compte, cependant, la notion de proportion entre les couches serait perdue.

3.2. Contraintes rencontrées

La première difficulté à laquelle j'ai dû faire a été le temps. Le stage de deuxième année du cursus de l'école nationale supérieure Louis-Lumière a duré 6 semaines seulement. Le sujet choisi couvre un champ d'étude, de réflexion, et d'application très large. Il était aussi impossible d'envisager des commandes de matériel spécifique dans ces délais. Il n'était pas non plus possible de sortir les échantillons réactifs à la technique des boîtes en verre pour des résultats plus fiables par manque de temps. Les interrogations exposées dans la partie « linéarisation » méritent elles aussi plus de temps et de moyens afin de trouver une réponse plus recevable. L'organisation et la planification m'ont finalement permis d'obtenir des résultats dans le temps imparti.

Il est aussi important de prendre en compte l'état de l'industrie du filtre actuellement. En effet, les filtres photographiques étaient plus utilisés lorsque la photographie argentique dominait le marché. De nombreux modèles ne sont plus produits, ou bien leur taille est limitée à 5cm x 5cm, ce qui est insuffisant pour les portes filtres adaptables sur les optiques de l'appareil utilisé. J'ai partiellement résolu ce problème en fabricant des adaptateurs de tailles pour les petits filtres et en utilisant le stock de filtres du C2RMF et de l'école nationale supérieure Louis-Lumière, mais l'utilisation de filtres qui ne sont plus produits pose problème concernant la pérennité du protocole. Il est nécessaire de mener une étude du marché plus approfondie concernant les filtres et les sources afin de trouver des combinaisons avec du matériel toujours en production.

3.3. Apports personnels

Les caractéristiques des métiers de la recherche semblent correspondre à mes attentes sur le plan professionnel. L'autonomie, les responsabilités, l'indépendance, la curiosité, la rigueur technique, le rythme de travail, ou encore les collaborations, indispensables dans ce milieu, correspondent à mes envies et ma personnalité. Il est nécessaire d'ajouter que le domaine du patrimoine me tiens particulièrement à cœur, pour ces enjeux culturels, historiques et sociaux. Je prévois de m'orienter dans le domaine de l'imagerie scientifique pour le patrimoine, car les techniques d'analyses non destructives méritent, selon moi, d'être développées plus en profondeur.

Bibliographie

Daveri, Alessia & Vagnini, Manuela & Nucera, F & Azzarelli, M & Romani, A & Clementi, Catia. (2015). Visible-induced luminescence imaging: A user-friendly method based on a system of interchangeable and tunable LED light sources. *Microchemical Journal*, 2015.

G. Verri, The spatially resolved characterisation of Egyptian blue, Han blue and Han purple by photo-induced luminescence digital imaging, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009.

C.Fischer, I.Kakoulli, Multispectral and hyperspectral imaging technologies in conservation: current research and potential applications, *Rev. in Conservation*, 2006

M. Thoury, J.K. Delaney, E.R Rie, M.Palmer, K. Morales and J. Krueger, Near-infrared luminescence of cadmium pigments: in situ identification and mapping in paintings, *Appl. Spectrosc*, 2011

Verri, G., de Fonjaudran, C. M., Acocella, A., Accorsi, G., Comelli, D., D'Andrea, C., ... Saunders, D. (2018). An "imperial radiation": Experimental and theoretical investigations of the photo-induced luminescence properties of 6,6'-dibromoindigo (Tyrian purple). *Dyes and Pigments*, 2018.

Colombini MP, Carmignani A, Modugno F, Frezzato F, Olchini A, Brecoulaki H, et al. Integrated analytical techniques for the study of ancient Greek polychromy. *Talanta*. 2004.

Shimoyama S, Noda Y. Non-destructive determination of Natural Dyestuffs used for ancient coloured cloths using a three-dimensional fluorescence spectrum technique. *Dyes in History and Archaeology*. 1994.

Improta R, Scalmani G, Frisch MJ, Barone V. Toward effective and reliable fluorescence energies in solution by a new state specific polarizable continuum model time dependent density functional theory approach. *The Journal of Chemical Physics*. 2007.

Crosby GA, Demas JN. Measurement of photoluminescence quantum yields. Review. *The Journal of Physical Chemistry*. 1971.

Cesaratto A, D'Andrea C, Nevin A, Valentini G, Tassone F, Alberti R, et al. Analysis of cadmium-based pigments with timeresolved photoluminescence. *Analytical Methods*. 2014.

Verri G. The spatially resolved characterisation of Egyptian blue, Han blue and Han purple by photo-induced luminescence digital imaging. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2009.

Caneve, L., Guarneri, M., Lai, A., Spizzichino, V., Ceccarelli, S., & Mazzei, B. (2019). *Non-Destructive laser based techniques for biodegradation analysis in cultural heritage*. *NDT & E International*. doi:10.1016/j.ndteint.2019.03.007

Hayem-Guez, Anita, « Caractérisation des pigments de peintures de chevalet par des méthodes optiques non-invasives », C2RMF SOSCO Université de Cergy, 2011-2014.

Wohlgemuth, Anne, Rapport de stage de 2eme année, 2016.

Paounov, Anne, Mémoire de recherche de fin d'études : l'ultraviolet fausses couleurs : une méthode d'identification des pigments picturaux, vers un protocole de prise de vue destiné à l'ultraviolet, 2009.

Yin, Huanchu, rapport de stage de 3eme année, cycle ingénieur, 2016.

Jacques Gaudin, Alain Sarlat, Gilles Arnaud, Yann Cainjo, Baptiste Magnien, Etude sur les caractéristiques des capteurs, CST-ENSL, 02/2019.

Eugénie Ringuette, spectrométrie de fluorescence moléculaire, Faculté de Médecine d'Alger - Département de Pharmacie - Laboratoire de Chimie Analytique, 2016.

<http://www.britishmuseum.org/pdf/charisma-multispectral-imaging-manual-2013.pdf>

<https://copa.hypotheses.org/>

https://maxmax.com/spectral_response.htm

Table des matières

Remerciements	3
Avant-propos	5
Sommaire	7
1. Introduction : L'activité du C2RMF	10
1.1. Histoire et missions	10
1.2. Le groupe imagerie	10
1.3. Les techniques de prise de vues	11
1.3.1. Les protocoles d'étude de rayonnement	11
1.3.2. Les protocoles d'étude de relief	13
1.3.3. Les protocoles d'étude de la structure	14
2. Mission	16
2.1. Sujet	16
2.1.1. Les phénomènes d'absorption et de réflexion	17
2.1.2. La Fluorescence	18
2.2. Etude préparatoire	21
2.2.1. Etude des filtres	21
2.2.2. Calcul de l'exposition	23
2.2.3. Linéarisation : interrogations et partis pris	25
2.3. Mise en place du protocole	28
2.3.1. Eclairage	28
2.3.2. Exposition	29
2.3.3. Choix des filtres	29

2.4. Post production	32
3. Test sur des œuvres	35
3.1. Echantillons appliqués du département peinture	35
3.2. Cobaye one	36
3.3. Colonne du département dorure	39
3.3.1. Test d'échantillons spécifiques à la dorure	39
3.3.2. Imagerie de la colonne	43
3.3.3. Résultats	45
3. Conclusion	50
3.1. Analyse du protocole	50
3.2. Contraintes rencontrées	51
3.3. Apports personnels	51
Bibliographie	52
Table des matières	54
Annexes	56

Annexes

Les annexes sont disponibles dans le 2eme tome du rapport de stage.

Contact : chloebernard.photo@gmail.com