

La technique picturale des peintres de la Renaissance italienne examinée par spectrophotométrie

Guillaume Dupuis

- Résumé** La technique picturale de deux peintres de la Renaissance italienne, Léonard de Vinci et Raphaël, a été étudiée grâce à des mesures spectrophotométriques réalisées sur trois de leurs œuvres. Le dispositif expérimental utilisé est un goniospectrophotomètre à fibres optiques qui permet des mesures non invasives, sans contact, éventuellement *in situ*. Afin d'interpréter de manière quantitative les mesures spectrophotométriques, une méthode de traitement des spectres par réflexion s'appuyant sur la théorie de Kubelka-Munk de propagation de la lumière dans les milieux absorbants et diffusants a été développée et validée. Ceci a permis d'évaluer la quantité de pigments présents dans les couches picturales et d'établir le fait que ces deux artistes italiens ont développé dès la fin du XV^e siècle une technique picturale optiquement très proche des glacis des Primitifs flamands.
- Mots-clés** Peinture de chevalet, Renaissance italienne, spectrophotométrie, mesures non invasives, analyses quantitatives, absorption et diffusion de la lumière, couleur, Kubelka-Munk.
- Abstract** **Painting technique of Italian Renaissance artists evaluated by spectrophotometry**
Fiber-optics diffuse reflectance spectroscopy was used to characterize the painting technique of Leonardo de Vinci and Raffaello in three major works of art of the Renaissance period. Measurements are non invasive, without any contact, and can be performed *in situ*. Reflectance spectra are processed using Kubelka-Munk theory in order to get scattering and absorption parameters of the pigments. Assuming a linear dependence of these optical properties with the pigment volume concentration of the paint layers allowed to evaluate pigment quantities in the paint layers from reflectance measurements and to establish the fact that these two Italian artists developed a painting technique similar to that of the Early Flemish painters.
- Keywords** **Easel painting, Italian Renaissance, spectrophotometry, non invasive measurement, quantitative analyses, light absorption and scattering, color, Kubelka-Munk.**

Depuis les années 1950, les scientifiques impliqués dans les laboratoires de musées ont su mettre à profit les principales techniques d'analyse physico-chimique issues des sciences des matériaux pour contribuer à élucider de nombreuses problématiques liées aux œuvres d'art [1]. Bien souvent, la mission confiée au physico-chimiste par l'historien d'art, le conservateur ou le restaurateur consiste à identifier les matériaux constitutifs de l'œuvre. Parmi les techniques dont il dispose, il doit bien évidemment privilégier les méthodes non invasives (non destructives, sans prélèvement et sans contact) et éventuellement portables sur le lieu de conservation de l'œuvre. Le développement et l'utilisation de ces techniques analytiques sont des axes de recherche majeurs du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF). Notre recherche est une contribution à cette préoccupation. Nous avons pu en effet appliquer à trois tableaux issus de la Renaissance italienne une nouvelle méthodologie de caractérisation des composants des couches picturales qui utilise une dimension cruciale des œuvres d'art : la couleur.

La chimie du solide nous apprend que la couleur d'un matériau est liée à des transitions électroniques induites par l'absorption de lumière visible au sein de ce dernier. En d'autres termes, la couleur d'un matériau est le résultat de son organisation électronique (notamment les orbitales atomiques et moléculaires, etc.). C'est donc l'une de ses

signatures caractéristiques. La mesure de la couleur « chimique » d'un matériau est possible grâce à des dispositifs appelés spectrophotomètres, qui mesurent son facteur spectral de réflectance en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident, c'est-à-dire sa capacité à renvoyer plus ou moins efficacement certaines des radiations monochromatiques composant la lumière polychromatique qui l'éclaire. Le résultat de cette mesure est appelé spectre par réflexion.

Depuis quelques années, un petit nombre d'équipes de recherche utilisent cette dimension de la couleur pour chercher à identifier les composants des couches picturales, principalement les pigments, dans les objets polychromes des collections de musées [2]. Leur approche méthodologique repose toujours sur l'utilisation d'une base de données spectrophotométriques de matériaux de référence qui permet de comparer le spectre d'un matériau inconnu à des spectres de matériaux purs [3]. Une couche picturale réelle forme cependant un milieu bien plus complexe que les seuls pigments purs utilisés pour constituer ce type de base de données, car les pigments sont souvent mélangés et dispersés dans un liant. La prise en compte de cette seconde caractéristique des couches picturales constitue la base de la démarche expérimentale menée ici sur trois tableaux de l'époque de la Renaissance italienne conservés au Musée du Louvre à Paris : *La Belle*

Ferronnière de Léonard de Vinci (1452-1519), ainsi que *La Belle Jardinière* et *L'Ange au Phylactère* de Raffaello Sanzio, dit Raphaël (1483-1520). Nous verrons donc comment la mesure de la couleur permet de caractériser d'une façon inédite la technique picturale de ces deux artistes majeurs.

Protocole expérimental

Œuvres étudiées

La Belle Ferronnière est un portrait de femme peint par Léonard de Vinci entre 1495 et 1499 environ. Il s'agit d'une peinture à l'huile sur bois de 35 x 50 cm. Le modèle pourrait être Lucrezia Crivelli ou Cecilia Galleriani, maîtresses de Ludovic le More, duc de Milan, ou Béatrice d'Este, l'épouse de ce dernier. L'appellation de « Belle Ferronnière » vient d'une confusion de ce portrait avec un autre, censé représenter la femme de Le Ferron, maîtresse de François I^{er}. L'erreur a été renforcée par le bijou, appelé ferronnière, que le modèle porte sur le front.

La Belle Jardinière est le nom habituellement donné à un tableau peint par Raphaël qui représente la Vierge à l'Enfant avec le petit Saint Jean-Baptiste. Il s'agit d'une peinture à l'huile sur bois de 80 x 122 cm. On ignore le nom de son commanditaire et les conditions de son entrée dans la collection de la Couronne de France. *La Belle Jardinière*, datée de la fin du séjour de Raphaël à Florence entre 1507 et 1508, clôt les recherches du peintre sur la Vierge à l'Enfant avec Saint Jean-Baptiste sur fond de paysage. Le cycle comprend *La Vierge du Belvédère* (Vienne) et *La Vierge au Chardonneret* (Florence).

L'Ange au Phylactère est un panneau de bois peint à l'huile de 36 x 58 cm attribué à Raphaël. Ce panneau appartient à un retable consacré à Saint Nicolas de Tolentino, commandé le 10 décembre 1500 par Andrea di Tommaso-Baronci pour sa chapelle dans l'église San Agostino de Città di Castello, et achevé le 13 septembre 1501. Trois autres fragments de cet ensemble sont conservés : *La Vierge et Dieu le Père*, exposé à la Galleria Nazionale di Capodimonte de Naples, et un autre *Ange* appartenant aux collections de la Pinacoteca Tosio Martinengo de Brescia.

Instrumentation et mode opératoire

Le dispositif expérimental développé au C2RMF à partir de 1996 pour mesurer les couleurs est un goniospectrophotomètre à fibres optiques (figure 1) [4]. Cet appareil est conçu pour réaliser des mesures en rétrodiffusion : la lumière incidente, issue de la lampe, éclaire le tableau via un faisceau de fibres optiques ; la lumière rétrodiffusée est récoltée dans la même direction que la lumière incidente, mais en sens opposé. L'angle de rétrodiffusion peut être modifié à l'aide d'un goniomètre, ce qui permet notamment d'étudier la dépendance angulaire de la quantité de lumière rétrodiffusée. La configuration géométrique inhabituelle de ce spectrophotomètre a été choisie pour permettre des mesures non destructives, rapides et sans contact. Cet instrument, transportable grâce à son montage sur un pied photographique, est parfaitement adapté aux mesures, éventuellement *in situ*, sur les œuvres d'art.

Lors des mesures, les tableaux ont été installés à la verticale sur un chevalet micrométrique motorisé. L'angle de rétrodiffusion choisi pour les mesures est de 22° : c'est

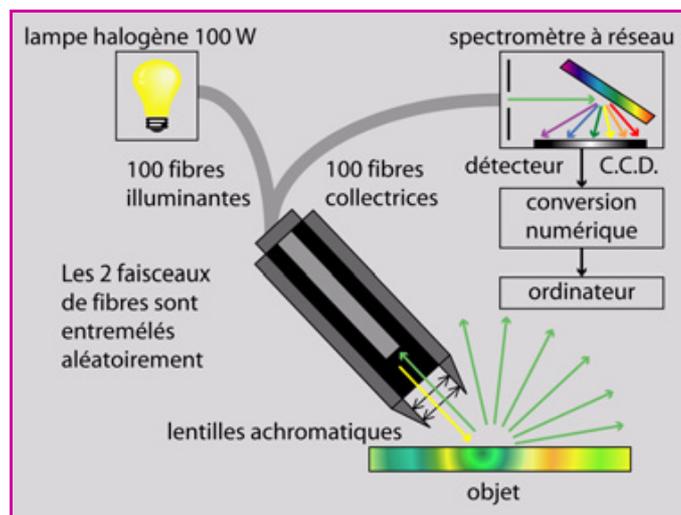


Figure 1 - Schéma de principe du goniospectrophotomètre à fibres optiques.

la configuration utilisée pour enregistrer les spectres par réflexion des pigments de la base de données du laboratoire [3]. Le spot lumineux qui définit la zone étudiée lors d'une mesure est un disque de 6 mm de diamètre. La configuration de l'appareil rapproche celui-ci des spectrophotomètres de type « simple faisceau ». Avant d'effectuer les mesures sur les œuvres, la réponse d'un blanc de référence (*Spectralon*) a donc été enregistrée dans les mêmes conditions expérimentales afin de normaliser la réponse du spectromètre. De même, la réponse d'un morceau de velours noir a été enregistrée au préalable afin d'isoler la réponse du détecteur dans l'obscurité.

Des mesures spectrales ont été enregistrées pour chaque couleur de la palette chromatique utilisée par Léonard de Vinci et Raphaël, avec une attention toute particulière pour les carnations. Seuls les résultats relatifs aux mesures réalisées dans les carnations seront d'ailleurs présentés ici.

Résultats qualitatifs préliminaires

Dans un premier temps, nous pouvons remarquer que les spectres par réflexion enregistrés dans les carnations des trois tableaux possèdent une allure similaire. Trois spectres typiques provenant de chacun d'entre eux sont tracés à titre d'illustration dans le graphe de la figure 2. Ils présentent tous un important front d'absorption à 580 nm, empreinte spectrale caractéristique de l'emploi d'un sulfure de mercure rouge utilisé comme pigment : le vermillon. Ce pigment rouge est très vraisemblablement mélangé à un blanc de plomb, bien que ce dernier ne puisse pas être identifié via son spectre par réflexion puisque par définition, un pigment blanc n'a pas d'empreinte spectrale spécifique dans le domaine du visible. Une légère nuance dans les spectres permet cependant de noter une différence entre la composition de la matière picturale chez Raphaël et celle chez Léonard de Vinci. Dans les spectres provenant de *L'Ange au Phylactère* (AP02) et de *La Belle Jardinière* (BJ41), une bande d'absorption supplémentaire apparaît en effet aux alentours de 485 nm. Cette bande d'absorption est trop peu intense pour permettre d'identifier le pigment qui la cause, notamment parce qu'elle se situe dans la zone où le vermillon est également très absorbant. L'empreinte

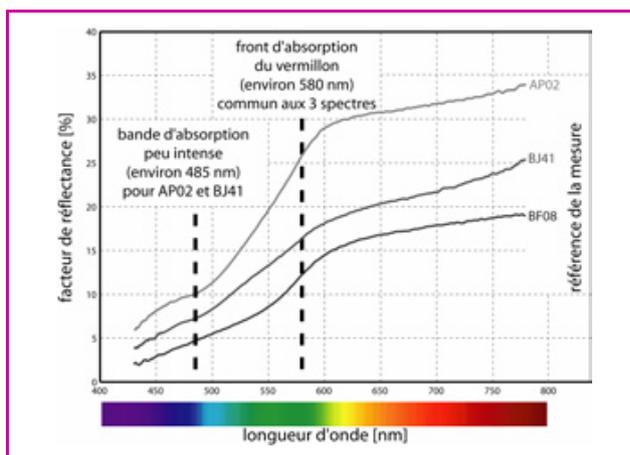


Figure 2 - Résultats des mesures spectrophotométriques dans les carnations de *L'Ange au Phylactère* (spectre noté AP02), de *La Belle Jardinière* (BJ41) et de *La Belle Ferronnière* (BF08).

spectrale de ce pigment supplémentaire est comme « éteinte » par l'importante absorption du vermillon dans ce domaine spectral, empêchant son identification formelle [5]. Nous pouvons néanmoins émettre l'hypothèse selon laquelle ce pigment supplémentaire est de couleur jaune, puisqu'il absorbe dans le bleu, voire légèrement verdâtre si l'on interprète la très légère inflexion des spectres AP02 et BJ41 aux alentours de 750 nm comme une seconde bande d'absorption de ce pigment.

Dans un second temps, il est intéressant de comparer les spectres enregistrés sur une œuvre donnée, pour plusieurs points de mesure correspondant à différentes nuances de carnations. Le cas de *La Belle Ferronnière* est présenté à titre d'illustration dans le graphe de la figure 3. Les zones sombres (BF14 ou BF15 par exemple) présentent un front d'absorption du vermillon moins marqué que les zones claires (BF10 ou BF11 par exemple). L'empreinte spectrale du vermillon est donc de moins en moins marquée au fur et à mesure que l'on se rapproche des zones sombres du visage. Le même effet peut être observé sur les mesures relatives à *La Belle Jardinière* et à *L'Ange au Phylactère*. À la différence des Primitifs italiens qui augmentent la proportion de vermillon dans les zones sombres pour créer le relief des carnations [6-7], Léonard de Vinci et Raphaël procèdent différemment pour modeler les couleurs des visages puisque l'empreinte spectrale du vermillon est moins marquée dans ces zones.

En résumé, Léonard de Vinci a donc choisi un mélange de blanc de plomb et de vermillon pour réaliser la teinte de base des carnations. Raphaël a choisi un mélange similaire auquel il a ajouté un pigment jaune en petite quantité. L'analyse des spectres met en effet en évidence l'utilisation probable par ces artistes d'un pigment supplémentaire pour modeler les ombres du visage. Ce pigment supplémentaire est forcément d'une couleur sombre – puisqu'il fait baisser le facteur spectral de réflectance de la couche picturale et permet donc de créer des ombres – et neutre – puisqu'il ne modifie pas particulièrement l'empreinte spectrale du vermillon. Se pose alors la question de la technique picturale qu'ils ont mise en œuvre pour incorporer ce pigment sombre et neutre à la matière picturale. Plus précisément, l'ont-ils ajouté à leur peinture sous forme d'un mélange de pigments ? Ou bien, intégrant à leur pratique picturale les subtilités permises par la peinture à l'huile, ont-ils introduit ce pigment supplémentaire *via* des couches superficielles

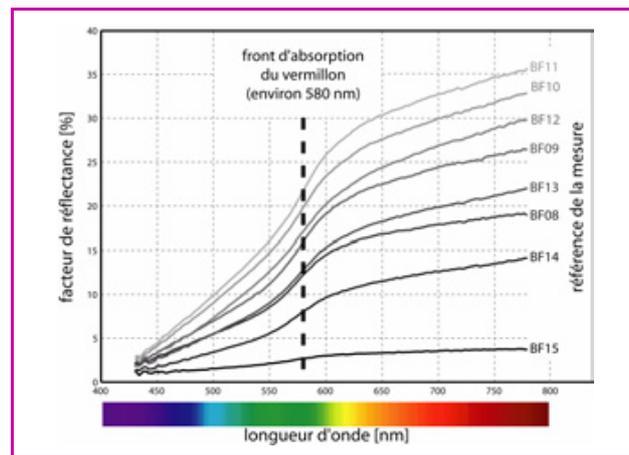


Figure 3 - Spectres par réflexion enregistrés dans différentes zones des carnations de *La Belle Ferronnière*.

légèrement teintées, et joué alors sur le nombre de ces couches pour créer les ombres et les lumières dans le visage ? Une étude similaire portant sur un autre tableau de Léonard de Vinci, *La Joconde*, tend à prouver que c'est la seconde hypothèse qui est la plus probable [8]. Nous verrons dans les paragraphes suivants que c'est sans doute également le cas pour *La Belle Ferronnière*.

Traitement des données expérimentales

La spectrophotométrie permet de caractériser plus précisément la technique picturale de l'artiste. Une couche superficielle sombre présente en effet une réponse spectrale très différente de celle d'un mélange de pigments, qui est due au principe même de la technique d'analyse. La lumière collectée par le spectrophotomètre comporte une information spectrale liée aux composés rencontrés lors de son parcours dans la couche picturale. Optiquement, une couche picturale est un milieu hétérogène comportant un médium, le liant, dans lequel sont dispersées des particules colorées et diffusantes, les pigments. Elle peut être recouverte d'un vernis transparent ou légèrement absorbant et repose sur un substrat généralement diffusant, typiquement du bois ou de la toile recouvert d'une préparation blanche. Le parcours de la lumière dans un tel milieu est complexe (figure 4) : réflexions, réfractions, absorption, diffusion, etc. Une modélisation est donc nécessaire pour tenir compte de ces interactions et établir ainsi un lien quantitatif entre la grandeur physique mesurée,

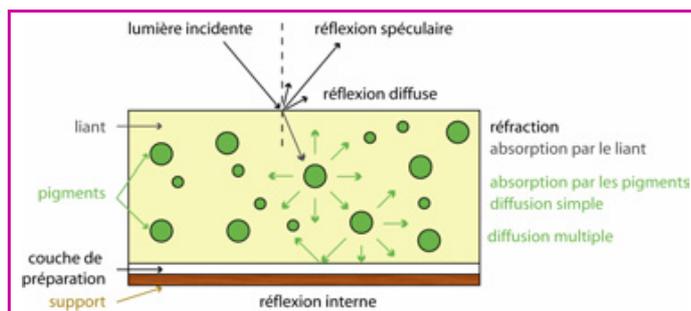


Figure 4 - Représentation schématique des interactions lumière/matière dans les couches picturales.

le facteur spectral de réflectance de la couche picturale, et les caractéristiques intrinsèques des matériaux, qui sont principalement leurs propriétés d'absorption et de diffusion.

Modélisation : théorie de Kubelka-Munk

Le modèle le plus adapté pour décrire le comportement optique des couches picturales est celui mis au point par Paul Kubelka et Franz Munk en 1931 [9-10]. Cette approche traite un milieu absorbant et diffusant de manière effective, c'est-à-dire non pas comme un milieu hétérogène (dispersion de discontinuités optiques dans une matrice transparente), mais comme un milieu homogène auquel sont attribués macroscopiquement un coefficient d'absorption K (traduisant la perte d'énergie lumineuse à certaines longueurs d'onde) et un coefficient de diffusion S (traduisant le changement de sens de propagation du rayonnement lumineux au sein de la couche). À la différence d'autres approches, cette théorie ne s'appuie pas sur une description microscopique des couches picturales. Elle ne nécessite donc pas une connaissance *a priori* d'informations précises sur la composition de la matière picturale et se trouve donc particulièrement adaptée à notre problématique. Moyennant des simplifications, ce modèle est utilisé couramment dans l'industrie textile ou plastique pour formuler, à partir de plusieurs colorants de base, les recettes nécessaires à l'obtention d'une couleur donnée [11]. Ces simplifications sont licites parce que les matériaux industriels sont très calibrés. En revanche, dans le cas des couches picturales, les matériaux calibrés sont rares : souvent d'origine naturelle ou artisanale, les pigments de l'ère préindustrielle étaient broyés et mélangés au liant à la main. L'aspect novateur

dans l'utilisation du modèle de Kubelka-Munk est donc le refus ici de la simplification.

L'un des intérêts de ce modèle est qu'il permet d'obtenir des expressions analytiques qui lient les grandeurs optiques mesurables sur les couches picturales par notre dispositif expérimental aux coefficients d'absorption et de diffusion des pigments (cf. les équations (2), (3) et (4) dans l'encadré). À défaut de décrire précisément les interactions lumière/matière, le modèle permet de traiter rapidement un grand nombre de données expérimentales. De plus, sa validité opératoire a été vérifiée lors de récents travaux de recherche au C2RMF [7].

Validation du modèle théorique

Le choix du modèle de Kubelka-Munk comme support théorique à une méthodologie pour la caractérisation des composants des couches picturales se justifie par la validité des résultats obtenus. Dans le cas qui nous intéresse de couches picturales translucides superposées en glacis, nous avons validé le modèle théorique en effectuant des mesures spectrophotométriques sur des nuanciers réalisés par un peintre contemporain, Jean-Pierre Brazs (*figure 5a*). Sur ces nuanciers, le peintre a appliqué sur différents supports des couches translucides de peintures d'épaisseurs et de concentrations pigmentaires données. Nous avons évalué avec succès, par un traitement numérique des mesures de spectres par réflexion s'appuyant sur le modèle de Kubelka-Munk, les quantités de pigments déposées sur les différentes zones des nuanciers. Le traitement numérique, décrit de manière exhaustive dans la référence [12], repose principalement sur le fait que les coefficients d'absorption et de diffusion volumiques K' et S' sont intrinsèques au pigment présent dans la

Formalisme du modèle de Kubelka-Munk

Considérons une couche absorbante et diffusante déposée sur un support de facteur spectral de réflectance ρ_g . Cette couche, au sein de laquelle se propage le rayonnement, est caractérisée par son coefficient d'absorption K et son coefficient de diffusion S . Désignons par w_T l'éclairement (en $W.m^{-2}$) du rayonnement se propageant dans le sens des z décroissants et par w_R celui du rayonnement se propageant dans le sens des z croissants (cf. *figure*). Lors du passage à travers la couche infinitésimale d'épaisseur dz , les variations de w_T et w_R vérifient les équations suivantes :

$$\begin{cases} -dw_T = -(S + K)w_T dz + w_R S dz & [1] \\ dw_R = -(S + K)w_R dz + w_T S dz & [2] \end{cases} \quad (1)$$

La résolution de ce système d'équations intégrées-couplées fournit l'expression suivante pour le facteur spectral de réflectance ρ de la couche absorbante et diffusante à une longueur d'onde donnée :

$$\rho = \frac{1 - \rho_g(a - b \coth(bSZ))}{a - \rho_g + b \coth(bSZ)} \quad (2)$$

avec $a = 1 + K/S$ et $b = (a^2 - 1)^{1/2}$ et Z l'épaisseur totale de la couche.

Dans le cas d'une couche translucide d'épaisseur Z donnée, la couleur dépend de la concentration en particules absorbantes et diffusantes μ . Cette dépendance est linéaire en première approximation [12]. Il est donc légitime d'introduire des coefficients d'absorption et de diffusion intrinsèques K' et S' ,

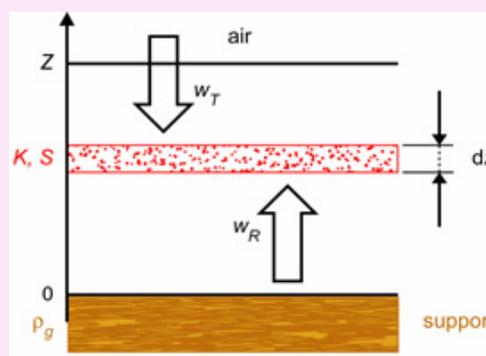
avec $K = \mu K'$, et $S = \mu S'$. L'équation (2) devient alors :

$$\rho = \frac{1 - \rho_g(a - b \coth(b\mu S'Z))}{a - \rho_g + b \coth(b\mu S'Z)} \quad (3)$$

Lorsque l'échantillon est opaque, c'est-à-dire lorsque son facteur spectral de réflectance ρ_∞ ne dépend ni du facteur spectral ρ_g du support, ni de la concentration pigmentaire μ de la peinture, les coefficients K' et S' sont liés à ρ_∞ par la relation suivante :

$$\frac{K'}{S'} = \frac{K}{S} = \frac{(1 - \rho_\infty)^2}{2\rho_\infty} \quad (4)$$

La simplicité de cette équation, aussi nommée fonction de Kubelka-Munk, a grandement contribué au succès de ce modèle.



Géométrie du modèle de Kubelka-Munk.

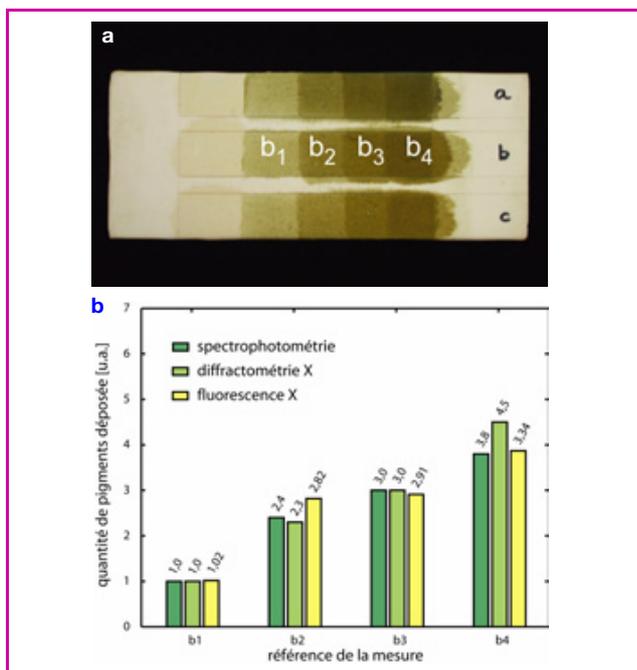


Figure 5 - a) Nuancier du peintre Jean-Pierre Brazs ; b) Validation des résultats obtenus par traitement numérique des mesures spectrophotométriques : les valeurs de quantités de pigments calculées sont similaires quelle que soit la technique analytique utilisée pour les déterminer.

couche superficielle : ils sont donc identiques quel que soit le point considéré. Par conséquent, ces coefficients peuvent être utilisés comme paramètres pour déterminer les grandeurs qui, elles, sont différentes suivant les zones considérées : l'épaisseur Z de la couche superficielle et la concentration pigmentaire volumique μ de la peinture. En fait, une mesure optique ne permet pas de déterminer indépendamment Z et μ : seul leur produit peut être évalué, c'est-à-dire la quantité μZ de pigments déposée dans la couche superficielle par unité de surface. Cette grandeur est calculée par optimisation numérique au sens des moindres carrés en utilisant les coefficients K' et S' comme paramètres constants. Les valeurs obtenues ont été confirmées par microfluorescence X et diffraction des rayons X, avec une erreur relative moyenne de l'ordre de 3 % (figure 5b)⁽¹⁾. Le modèle de Kubelka-Munk établit donc un lien fiable entre les mesures effectuées sur les couches picturales et la composition quantitative de la matière picturale, et est par conséquent un candidat très prometteur pour l'application au cas concret des œuvres d'art qui nous occupe ici.

Caractérisation optique du modelé des carnations

Le modelé de la couleur des carnations étant optiquement identique dans le cas de Léonard de Vinci et de Raphaël, nous nous focaliserons ici sur le cas de *La Belle Ferronnière*, en

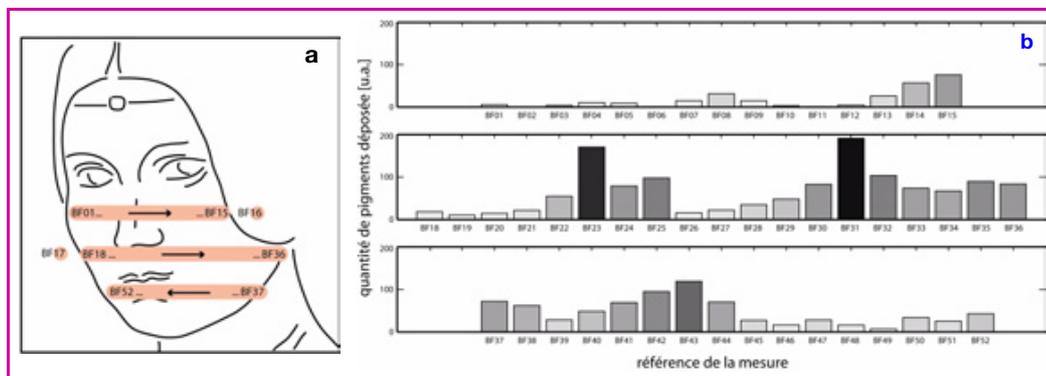


Figure 6 - a) Position des mesures spectrophotométriques enregistrées dans les carnations de *La Belle Ferronnière* ; b) Résultats du traitement numérique des spectres par réflexion.

gardant à l'esprit que des résultats similaires seraient obtenus pour *La Belle Jardinière* et *L'Ange au Phylactère*.

Méthodologie

Le traitement numérique des spectres mesurés sur l'œuvre est quasiment identique à celui décrit dans le cas des nuanciers modernes. La seule différence porte sur deux paramètres des équations (3) et (4) (voir encadré) dont nous disposons dans le cas du nuancier, mais pas nécessairement dans le cas d'une œuvre : le spectre du fond ρ_g et celui de la couche opaque ρ_∞ . Dans le cas réel d'une œuvre, il est donc nécessaire de choisir deux points de mesure qui fourniront ces deux valeurs. Le spectre BF02, enregistré au niveau de la joue à droite⁽²⁾, est pris comme référence de couleur de fond (soit ρ_g), parce qu'il correspond à la zone la plus claire. Le spectre BF56, enregistré dans l'ombre de l'arcade sourcilière à senestre, est pris comme référence de couleur une fois l'opacité atteinte (soit ρ_∞) car il correspond à la zone la plus foncée. La quantité de pigments déposée sur la zone BF51 est prise comme référence pour le calcul de K' et S' parce qu'elle correspond au spectre moyen parmi tous les spectres enregistrés dans le visage.

Résultats et discussion

Le traitement numérique des spectres par réflexion mesurés nous permet d'exprimer, pour chaque zone étudiée, la quantité de pigments μZ déposée au sein du glacis sombre relativement à la zone BF11, pour laquelle cette valeur est minimale et à laquelle nous attribuons arbitrairement la valeur 1. Les résultats sont reportés dans l'histogramme de la figure 6. La quantité μZ peut également être utilisée pour calculer puis afficher un spectre par réflexion simulé à l'aide des différents paramètres déjà évoqués (ρ_g , ρ_∞ , K' , S') et en utilisant l'équation (3). Un faible écart entre ce spectre simulé et le spectre mesuré sur la zone considérée confirme la fiabilité du traitement numérique. Les spectres obtenus par simulation pour quatre points de mesure sont reportés dans la figure 7.

Les spectres par réflexion sont particulièrement bien simulés par le traitement numérique, comme le montre la figure 7 : l'écart entre les mesures et les simulations est faible sur l'ensemble du domaine visible, quelle que soit la zone considérée. La modélisation choisie décrit donc fidèlement les variations du facteur spectral de réflectance dans le domaine du visible. L'hypothèse selon laquelle l'artiste a, au moins en partie, modelé la couleur du visage

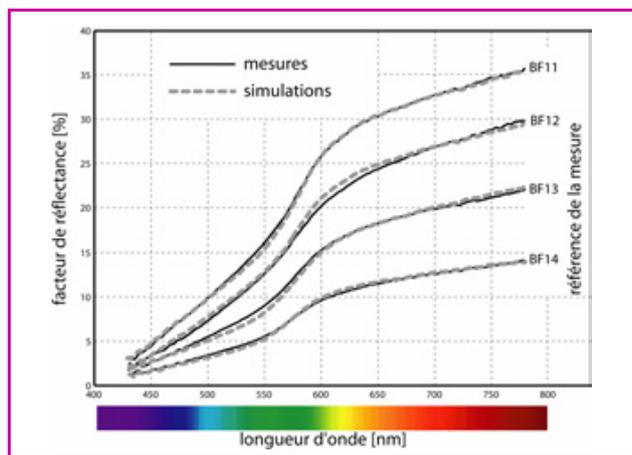


Figure 7 - Comparaison entre les spectres par réflexion mesurés sur *La Belle Ferronnière* et les simulations fournies par la théorie de Kubelka-Munk.

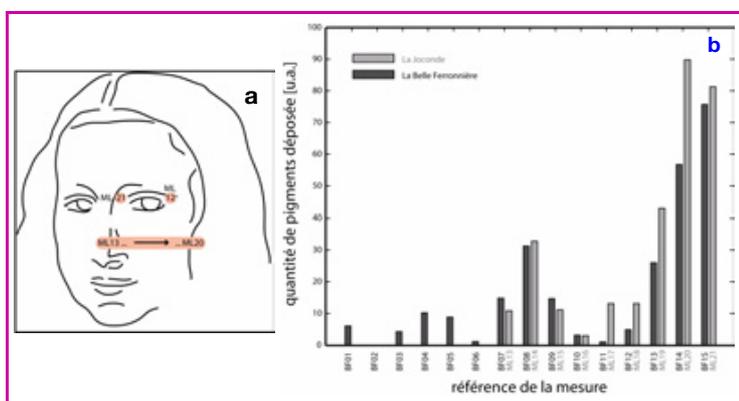


Figure 8 - a) Position des mesures spectrophotométriques enregistrées dans les carnations de *La Joconde* ; b) Résultats du traitement numérique des spectres par réflexion.

à l'aide d'une couche superficielle sombre, optiquement proche d'un glacis, semble donc être vérifiée par le traitement des spectres par réflexion enregistrés au niveau des carnations. Les résultats obtenus en termes de quantité de pigments déposés par unité de surface sont cohérents avec ce qui peut être observé sur le tableau (figure 6) : aux zones les plus claires (nez : BF06 ; joue à senestre : BF09 à BF12) correspondent des quantités faibles et vice versa. Le modèle du visage est effectivement reproduit dans l'histogramme de la figure 6b : lumière sur le nez en BF06, puis ombre du nez en BF08, lumière de la joue de BF09 à BF12 avec un maximum en BF11 et ombre de la joue à senestre à partir de BF13.

Ce profil des couches superficielles sombres, vraisemblablement relatif à un pigment noir à base de carbone finement divisé, est à rapprocher de celui obtenu dans le cas de *La Joconde* par une méthode de traitement des spectres tout à fait analogue, avec cette fois un pigment sombre à base de terre d'ombre [8, 13]. Cette comparaison est illustrée par la figure 8 : les résultats des différents points de mesure réalisés sur chacune des deux œuvres dans les mêmes zones du visage sont représentés sur le même

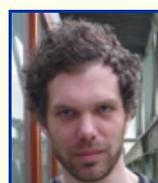
graphique. La normalisation des quantités de pigments déposées est identique dans les deux cas, donc les valeurs obtenues sur les deux tableaux peuvent être effectivement comparées. La ressemblance entre les deux profils est frappante et suggère une technique picturale similaire, bien que *La Belle Ferronnière* soit une œuvre antérieure.

Conclusion

Ces nouvelles analyses mettent en lumière la technique picturale utilisée par Léonard de Vinci et Raphaël pour construire les effets chromatiques dans leurs œuvres. La spectrophotométrie confirme que les carnations sont modélées selon une technique picturale dont le rendu optique est proche de celui des glacis issus de la tradition flamande. L'utilisation de cette technique picturale permet de maîtriser les effets de lumière, d'ombres et de couleurs, et explique sans doute la finesse et le réalisme des carnations dans ces tableaux.

Notes et références

- (1) L'écart plus important entre les mesures de diffraction des rayons X et celles des autres techniques s'explique par les limites d'une approximation faite dans les traitements des diffractogrammes par affinement Rietveld [12]. Cette approximation porte sur le coefficient d'absorption des rayons X des couches colorées, qui est négligé. Quand l'épaisseur de ces couches augmente, cette supposition est de moins en moins licite.
- (2) Le terme *dextre* désigne conventionnellement la partie droite d'une œuvre, c'est-à-dire située à gauche du spectateur qui la considère, par opposition au terme *senestre*.
- [1] Mohen J.-P., *Les Sciences du Patrimoine*, Odile Jacob, Paris, **1998**.
- [2] Johnston-Feller R., *Color Science in the Examination of Museum Objects*, The Getty Conservation Institute, Los Angeles, **2001**.
- [3] Dupuis G., Elias M., Simonot L., *Appl. Spectrosc.*, **2002**, *56*, p. 1329.
- [4] Menu M., Chiron A., *Technè*, **1999**, *9-10*, p. 161.
- [5] Dupuis G., Menu M., *Appl. Phys. A*, **2006**, *83*, p. 469.
- [6] Cennini C., *Il Libro Dell'Arte*, réédition d'après l'original de 1390, Neri Pozza Editore, Vicenza, **2001**.
- [7] Dupuis G., Thèse de doctorat, Université Paris-Sud 11, **2004**.
- [8] Dupuis G., *Au cœur de la Joconde, Léonard de Vinci décodé*, J.-P. Mohen, M. Menu, B. Mottin (eds), Musée du Louvre Éditions, Gallimard, Paris, **2006**.
- [9] Kubelka P., Munk F., *Zeit. Teck. Physik*, **1931**, *12*, p. 593.
- [10] Kubelka P., *J. Opt. Soc. Am. A*, **1948**, *38*, p. 448.
- [11] Billmeyer F.W., Saltzman M., *Principles of Color Technology*, 3rd ed., R.S. Berns (ed), Wiley-Interscience, New York, **2000**.
- [12] Dupuis G., Menu M., *Appl. Phys. A*, **2005**, *80*, p. 667.
- [13] Martin E., Da Costa Pinto Dias Morera R., Rioux J.-P., *Au cœur de la Joconde, Léonard de Vinci décodé*, J.-P. Mohen, M. Menu, B. Mottin (eds), Musée du Louvre Éditions, Gallimard, Paris, **2006**.



Guillaume Dupuis

a effectué sa thèse et son post-doctorat au Laboratoire du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF). Il est actuellement maître de conférences à l'Université Paris-Sud 11*.

* Centre de Photonique Biomédicale, Centre Laser de l'Université Paris-Sud 11, Faculté des Sciences d'Orsay, Bât. 106, 15 rue George Clemenceau, 91405 Orsay Cedex. Courriel : guillaume.dupuis@u-psud.fr