Imagerie hyperspectrale pour l'analyse d'œuvres peintes

Laurence de Viguerie[1]*, Anne Michelin[2]*, Marie Radepont[1], Fabien Pottier[2,3], Matthias Alfeld[1], Philippe Walter[1], Helen Glanville[1]

[1] Sorbonne Université, CNRS, UMR 8220 – Laboratoire d'Archéologie Moléculaire et Structurale (LAMS), 4, place Jussieu 75005 Paris, France

[2] Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France

[3] Laboratoire de physicochimie des polymères et des interfaces (LPPI), EA 2528, Université de Cergy-Pontoise, 5, mail Gay-Lussac F-95031 Cergy-Pontoise Cedex, France

Introduction

L'apport des méthodes d'analyse transportables et non invasives pour la caractérisation des peintures artistiques a été démontré dans de nombreuses études [1]. Parmi celles-ci, les techniques d'imagerie chimique sont en plein essor [2]. Elles consistent à acquérir des informations spatiales et spectrales sur une œuvre. L'imagerie hyperspectrale en particulier permet d'obtenir une image dont chaque pixel est associé à un spectre de réflexion diffuse de la lumière. Elle a tout d'abord été utilisée pour la télédétection, la géologie ou l'astronomie. Depuis le début des années 90, elle est appliquée au domaine du patrimoine afin d'augmenter la fidélité de la couleur des images obtenues pour la peinture et les manuscrits. Son exploitation spectrale se limitait alors à des comparaisons qualitatives d'une longueur d'onde à une autre, et permettait essentiellement d'identifier des zones de composition différentes, la dégradation de matériaux, des dessins préparatoires. Aujourd'hui avec un nombre croissant de bandes spectrales disponibles et une grande rapidité de la mesure, les spectres de réflexion diffuse peuvent être utilisés en tant que tel, pour l'identification de pigment ou même de liant. Le spectre de réflexion diffuse peut être enregistré dans la gamme UV, visible, proche infrarouge ; il est aussi possible d'enregistrer le spectre d'émission de fluorescence visible sous un éclairage UV. Les images obtenues peuvent être utilisées et manipulées afin d'obtenir des réflectrogrammes dans le domaine proche-infrarouge, plus lisibles (c'est-à-dire offrant un meilleur contraste), mais il s'agit surtout d'un

véritable outil d'analyse qui permet l'enregistrement de milliers de spectres en une acquisition. Son utilisation générant un grand nombre de données, le traitement est à adapter suivant chaque œuvre et selon les questions posées. La recherche actuelle vise donc à optimiser et affiner ces procédures afin de simplifier l'interprétation des données mais aussi de mieux évaluer quelles informations peuvent être extraites de chaque type d'œuvre.

Après avoir présenté les modalités d'instrumentation et de traitement des données, nous illustrerons les possibilités de ces techniques par deux exemples : l'un concerne l'analyse d'un manuscrit aztèque, le *Codex Borbonicus*, l'autre une peinture de chevalet du XVI^{e} siècle d'Andrea del Sarto. L'analyse de ces œuvres était soumise à deux contraintes courantes lors de l'étude d'objets fragiles revêtant une grande valeur culturelle, artistique et/ou historique : l'interdiction de pratiquer des prélèvements et celle de les déplacer de leur lieu de conservation ou d'exposition (la chambre forte de la bibliothèque de l'Assemblée Nationale dans le cas du manuscrit et le Palais Barberini dans le cas de la Sainte Famille de A. del Sarto). Différentes techniques non destructives et portables, d'imagerie et/ou ponctuelles, ont été combinées dans ces deux cas ; nous détaillons ici les résultats obtenus par imagerie hyperspectrale. Les modalités de traitement de données ont été adaptées pour répondre au mieux aux problématiques différentes liées à ces œuvres et à leur nature complexe, en prenant en compte les contraintes liées aux conditions d'analyse.

1 État de l'art

1.1 Principe et informations spectrales

Le principe de l'imagerie hyperspectrale est de collecter des images sur un très grand nombre de bandes spectrales étroites adjacentes : de ces données il est possible d'extraire pour chaque pixel de l'image un spectre continu de réflexion diffuse de la lumière. Le terme « hyperspectral » est utilisé en opposition au « multispectral » qui permet l'acquisition de bandes discrètes du spectre tandis que par imagerie hyperspectrale un spectre continu de grande résolution est obtenu et peut être exploité. Une image hyperspectrale est donc un cube de données réunissant pour chaque pixel de l'image deux coordonnées spatiales (x,y) ainsi que des données spectrales dont le nombre dépend de la résolution de l'instrument utilisé. Ce cube de données peut également être visualisé comme la superposition de n images monochromatiques (n étant le nombre de bandes spectrales).

La spectroscopie de réflexion diffuse est une technique d'analyse spectrale de la lumière réfléchie par la surface analysée. Lorsqu'ils sont soumis à un rayonnement lumineux, certains matériaux absorbent une partie de la lumière d'une manière particulière liée à leur structure moléculaire. L'étude des caractéristiques de la lumière réfléchie par un échantillon permet donc d'étudier sa composition.

Le spectre de réflexion des matières colorantes présente, par définition, des bandes d'absorption dans le domaine visible (380 - 780 nm), associées à des transitions électroniques existant dans le matériau. Dans certains cas, ces caractéristiques spectrales (bien que relativement larges et peu structurées) peuvent être utilisées pour identifier

des pigments et des colorants inconnus (en particulier lorsqu'ils sont utilisés purs et en couche épaisse), par comparaison entre les spectres obtenus et les nombreux spectres de références répertoriés dans la littérature ou dans des bases de données. Les enluminures se prêtent particulièrement à ce type d'identification [3]. Pour des peintures de chevalet, le problème est plus complexe : différents pigments sont utilisés et dispersés dans un liant formant ainsi une couche picturale qui peut être recouverte d'un vernis et qui repose sur d'autres couches ou sur un support. De nombreux phénomènes interviennent alors (diffusion, réflexion, et absorption) et une modélisation devient nécessaire pour en tenir compte et parvenir à interpréter le signal obtenu. Pour ce faire, la théorie de Kubelka-Munk est la plus utilisée ; dans le cas de couches de peintures opaques, la réflexion peut être exprimée sous une forme analytique simple en fonction du rapport des coefficients K, l'absorbance, et S, la diffusion à chaque longueur d'onde. D'autres traitements mathématiques tels que l'utilisation des dérivées premières et secondes des spectres de réflexion permettent de mettre en évidence voire de quantifier la présence de certains pigments utilisés en mélanges [4].

Dans le domaine du proche infrarouge, le spectre obtenu présente les harmoniques et combinaisons des bandes d'absorption présentes en moyen infrarouge. En pratique, les groupements hydroxyles (–OH) et carbonates ($-CO_3$) sont particulièrement visibles ; l'identification des composés se fait essentiellement par comparaison à des spectres de référence sur des matériaux purs ou des reconstitutions. Le gypse, la calcite ou encore l'azurite et la malachite sont facilement identifiables ainsi que différents types d'argiles grâce à ce domaine spectral comme le montrent de nombreuses applications en télédétection pour l'étude de la géologie des sols. Un intérêt important de ce domaine spectral réside aussi dans les potentialités pour l'identification des liants : certaines vibrations des groupes fonctionnels de carboxyles ou d'amides associés avec la matière organique sont visibles entre 800 et 2 500 nm [5]. Moins sensible aux changements structuraux par rapport à l'infrarouge moyen, la spectroscopie proche infrarouge a une spécificité limitée ce qui représente un avantage pour l'identification des liants car elle permet d'utiliser en première approche des composés non vieillis comme matériaux de référence. Cependant il faut souligner que les bandes d'absorption sont relativement larges et se chevauchent souvent ce qui rend l'identification délicate dans le cas de mélanges complexes et de superpositions. Ainsi pour une peinture de chevalet, le signal du support et de la couche de préparation (*gesso* à base de gypse) est souvent prépondérant, masquant parfois le signal d'autres composés de la matière picturale.

L'intérêt d'utiliser un imageur hyperspectral plutôt qu'un spectromètre classique est de pouvoir étudier l'intégralité de la surface d'une ou plusieurs œuvre dans son intégralité et d'avoir ainsi accès à des informations en tout point de l'objet. Comme toute imagerie chimique, des conclusions impossibles à énoncer avec des mesures ponctuelles peuvent ici être déduites car la représentativité statistique des données est fiable et permet de constater des nuances subtiles entre spectres, mais aussi lorsque des problématiques liées à l'imagerie sont en jeu, par exemple pour des tracés sous-jacents.

1.2 Instrumentation

Les évolutions techniques de ces dernières années vont dans le sens d'une extension du domaine spectral et d'une amélioration de la sensibilité et de la résolution des

systèmes. Nous nous intéressons ici à l'imagerie dans les domaines du visible (380 - 780 nm) et du proche infrarouge (780 - 2500 nm). Pour des raisons liées aux différentes technologies de détecteurs, les imageurs hyperspectrales permettent des acquisitions de 400 à 1000 nm (*VNIR – Visible near infrared*) ou de 1 000 à 2 500 nm (*SWIR – Short wave infrared*). En effet, de 400 à 1 000 nm des détecteurs CCD peuvent être utilisés tandis que l'acquisition de données au-delà de 1 000 nm nécessite des détecteurs bien plus coûteux : InGaAs (jusqu'à 1 700 nm), ou HgCdTe (MCT) et InSb (jusqu'à 2 500 nm). Cette différence technologique et de coût explique le nombre relativement limité des publications dans le domaine dit SWIR, en comparaison du VNIR.

Deux des groupes les plus actifs dans ce domaine, l'IFAC-CNR à Florence (« Nello-Carrara », Institut de physique appliquée) et la National Gallery of Art (NGA) de Washington D.C., ont publié une revue de leurs activités indiquant les différentes évolutions de leurs systèmes respectifs [6]. Ainsi le groupe de J. Delaney (NGA, Washington) a développé ses propres prototypes améliorant leurs performances depuis une dizaine d'années. Leurs deux caméras sont basées sur des spectromètres Specim et connectées à un détecteur CCD pour le domaine visible et InSb pour le proche infrarouge (jusqu'à 2450 nm) ; les deux peuvent être utilisés en mode dit « *push-broom* » c'est-à-dire en translatant la caméra (Figure 1) ou « *whiskbroom* » en utilisant un miroir interne. Ils ont été les premiers à démontrer l'intérêt de l'extension au proche infrarouge, tout d'abord jusqu'à 1 650 nm pour une meilleure identification des pigments et l'obtention d'images de haute qualité en réflectographie infrarouge qui permettent de révéler des éléments difficiles à discerner par réflectographie traditionnelle [7]. En étendant ensuite la gamme spectrale jusqu'à 2 500 nm, ils ouvrent de nouvelles perspectives pour l'identification et la cartographie des liants, démontrant l'approche notamment sur un manuscrit enluminé par Lorenzo Monaco (XV^{e} siècle) [5]. L'amélioration récente de la résolution spectrale jusqu'à 2,8 nm et du rapport signal sur bruit ($> 300 : 1$) de leur caméra InSb, pour l'instant sans équivalent commercial, leur a récemment permis de différencier et cartographier l'huile et la résine alkyde utilisées sur la même œuvre *Number 1, 1950 (Lavender Mist)* de Jackson Pollock. En effet la différentiation de ces deux liants implique de séparer des bandes spectrales étroites (< 15 nm) et de faible amplitude [8].

Certains groupes cherchent aussi à développer l'imagerie dans l'infrarouge moyen bien que son utilisation en soit limitée intrinsèquement à des peintures non vernies (en raison de l'absorption importante du vernis dans cette gamme de longueurs d'onde) : le groupe italien NCR-INO a développé une approche multispectrale de 3 300 à 5 000 nm (2 000 à 3 030 cm^{-1}) et démontré son utilisation notamment sur des peintures murales et fresques de Piero della Francesca [9]. Des résultats prometteurs ont aussi été obtenus avec un système commercial (Hi 90, Bruker Optics) permettant une analyse de 7 700 à 11 000 nm (910 à 1 300 cm^{-1}), au départ utilisé pour l'identification des composés toxiques et appliqué à l'identification des liants (acrylique et résine vinylique) d'une peinture non vernie d'Alberto Burri, *Sestante 10* (1982) [10]. Ce système permet de limiter l'échauffement pendant la mesure par l'utilisation d'un *shutter* ne s'ouvrant que pour l'acquisition. Cependant, depuis ce travail aucun autre n'a été publié avec ce système, sans doute en raison du domaine spectral limité. Une

autre solution expérimentale, présentée par Legrand *et al.* [11], est de développer un scanner en plaçant un spectromètre FTIR équipé d'un module en réflexion (Alpha Bruker, opérant de 1 300 à 25 000 nm [400 à 7 700 cm^{-1}]) sur une platine de translation.

1.3 Traitement des données

En parallèle des développements instrumentaux, les procédures de traitement exploratoires des images hyperspectrales se sont aussi améliorées. Il est possible de trouver les bases du traitement de données dans un tutoriel en ligne, destiné à l'origine pour des applications en télédétection [12]. Une image hyperspectrale étant composée de plusieurs centaines de pixels dans les deux dimensions spatiales et de quelques centaines de bandes spectrales, les volumes de données impliquées dans cette technique d'imagerie sont très grands (un cube représente typiquement plusieurs giga-octets de données). Lors de l'étude d'une telle image, il ne serait pas envisageable de consulter une par une chacune des n images ou chacun des x^*y spectres enregistrés. L'assistance d'outils statistiques d'exploration des données est donc souvent nécessaire. Deux catégories générales de routines de traitement peuvent être distinguées. Dans les deux cas, l'objectif est de réduire la complexité des données pour en faciliter la visualisation et la compréhension.

Le premier mode de traitement des images hyperspectrales considère plutôt le cube de données comme une superposition de n images (correspondant aux n bandes spectrales) dont il faut réduire le nombre [13]. Une réduction statistique de la dimensionnalité des données est alors appliquée en concentrant la variabilité des n images en un nombre minimal d'images composites. Les analyses en composantes principales (ACP) sont souvent utilisées pour cette opération, les images finalement obtenues sont alors une représentation en niveau de gris des premières composantes qui représentent au mieux la variabilité des données. Il est également possible de visualiser la répartition des données spectrales de l'image étudiée en fonction de 2 (dans un plan) ou 3 (dans un volume) de ces dimensions synthétiques. Cette représentation permet de détecter des groupes de pixels se différenciant des autres, ce qui peut être associé à une allure spectrale, donc à une composition matérielle différente. Cette approche présente l'avantage de concentrer en quelques représentations la complexité du cube de données. Elle peut toutefois générer des images difficiles à interpréter.

La seconde stratégie consiste à classer les pixels spatiaux en groupes présentant une allure spectrale commune ; il s'agit d'extraire un ensemble de composantes spectrales qui décrit au mieux le cube de données. Par définition ces composantes spectrales ne peuvent pas être obtenues par combinaison linéaire de spectres de l'ensemble de données, alors que tous les autres le peuvent. En général, dans le domaine du patrimoine, la classification est réalisée de manière supervisée ; les composantes spectrales de référence peuvent être extraites de l'image (référence interne [14]) ou provenir d'une base de données de spectres de matériaux de composition connue (référence externe [15]). Chaque spectre de l'image étudiée est alors comparé aux spectres de référence et est associé à l'un ou l'autre en fonction d'un indice de proximité. Le résultat final d'un tel traitement est en général une image permettant de visualiser la répartition spatiale des différentes composantes spectrales associées à des couleurs choisies : une segmentation de la peinture en différentes régions permet de localiser des zones de

compositions différentes. L'intérêt de cette méthode est qu'une partie des nombreuses informations du cube des données est concentrée en une image finale dont chaque pixel spatial est associé à une appartenance à telle ou telle classe, que l'on peut attribuer à une allure spectrale. De plus, lorsque la référence utilisée est de composition connue, chaque classe peut être associée à un constituant donné.

Il faut mentionner qu'il est possible d'utiliser une routine hybride [16, 17] dans laquelle une première étape de réduction de la dimensionnalité des données permet de détecter les spectres les plus représentatifs d'une image, qui sont ensuite utilisés pour une classification spectrale (référence interne). Ces différents traitements ne sont pas équivalents, et le choix du protocole utilisé dépend grandement de l'objectif de l'étude. D'une manière générale, si le but de l'étude est par exemple la visualisation d'un tracé sous-jacent, alors une réduction de la dimensionnalité est pertinente puisque le sens de la cartographie finale importe moins que la visualisation efficace du tracé recherché. Si au contraire on s'intéresse à la distribution d'un matériau précis (associé à une allure spectrale), alors une classification est plus appropriée. De nombreux travaux utilisant ces techniques statistiques, portant sur l'étude de peintures sur toile, sur panneau de bois ou murales [17-20] et de textes et enluminures de manuscrits [5, 15, 21-28] ont ainsi été publiés dans les quinze dernières années. Les traitements statistiques de ces cubes de données ont permis de visualiser avec succès des dessins préparatoires, des repentirs, des couches picturales décolorées, l'utilisation de plusieurs liants ou matières colorantes, ou encore des traitements de restauration récents.

Il est à noter que l'étape finale des méthodes de classification, qui consiste en l'identification de la composition des composantes spectrales, nécessite bien souvent l'utilisation de techniques d'analyse complémentaires (le plus souvent spectroscopie Raman ou de fluorescence des rayons X [16, 29]) et la réalisation d'échantillons de référence. Différentes équipes ont construit leur propre base de données, à partir de pigments purs, supports et liants mais aussi d'éprouvettes plus ou moins élaborées réalisées à partir des recettes anciennes [5, 15, 30]. En 2014, Motsatsou et Alexopolou [31] déplorent le manque de procédures communes pour la construction de ces échantillons de référence : chaque groupe utilise différents protocoles et techniques qui peuvent aussi varier en fonction du type d'applications. De plus aucune procédure commune n'a été mise en place pour rendre accessibles les différentes bases de données existantes. Certaines bases de données sont cependant disponibles sur internet comme celle mise en place par le CNR-IFAC [32] mais les spectres de références dans le domaine SWIR sont plus difficiles à trouver et il faut se référer aux bases existant en géologie, largement incomplètes pour les applications dans le domaine du patrimoine.

2 Exemples d'études

2.1 Instrumentation

Deux imageurs (Specim Corp. [Finlande]) ont été utilisés dans le cadre de cette étude pour couvrir le domaine spectral du visible au proche infrarouge (400-2 500 nm). L'imageur VNIR est un spectrographe ImSpector N10E équipé d'un capteur CCD de 1 600 pixels spatiaux et 1 200 pixels spectraux, opérant de 395 à 1 000 nm. L'imageur

SWIR est un spectrographe N25E, équipé d'un détecteur MCT de 384 pixels spatiaux et 288 spectraux (résolution spatiale 12 nm), opérant de 1 000 à 2 500 nm.

Dans le cas du *Codex Borbonicus*, l'imageur VNIR a été monté sur une barre motorisée qui permet de diriger le faisceau d'acquisition vers le bas et de scanner horizontalement pour obtenir une image de la surface étudiée. La résolution spatiale des images obtenues dépend de l'objectif utilisé et de la distance de travail qui définissent la largeur du champ mesuré. La distance de travail a été réglée afin de pouvoir enregistrer une page par acquisition (largeur de champ de 45 cm). Cela correspond à une distance de 85 cm pour l'imageur et l'objectif utilisé. Le temps d'intégration utilisé est de 14 ms, la vitesse de déplacement est réglée à 5,34 mm/s. La résolution spatiale des images ainsi générées est de l'ordre de 0,3 mm. La source de lumière (deux rangées de trois ampoules halogènes de 35 Watts disposées de chaque côté du détecteur, à un angle de 45°C) est fixée avec l'imageur et permet d'éclairer la bande d'acquisitions de façon constante au cours du déplacement. Afin de limiter l'exposition à la lumière de l'objet en cours d'acquisition, un écran est également fixé au bloc imageur / source ; une fente réalisée dans cette plaque, seule la bande analysée (3 cm de large) est éclairée pendant l'acquisition (Figure 1). Grâce à ce système, le *Codex* a été exposé au total (caméra VNIR + SWIR) à une dose de 14 Lux.heure.

Dans le cas de la *Sainte Famille* d'Andrea del Sarto, des contraintes de temps et de déplacement ont imposé de monter les caméras sur un support en rotation (plus léger et maniable que les barres de translation), visible Figure 1. Avec l'imageur VNIR, la distance de travail était de 80 cm, le temps d'intégration de 80 ms pour une vitesse de déplacement de 0,10 °/s. Avec l'imageur SWIR, la distance de travail était de 97 cm, le temps d'intégration de 25 ms pour une vitesse de déplacement de 0,50 °/s. La résolution spatiale des images générées est de 0,5 mm avec l'imageur VNIR et de 1,5 mm pour l'imageur SWIR. La source de lumière (deux lampes halogènes de 100 Watts disposées de chaque côté du détecteur) est également fixée avec l'imageur et permet d'éclairer la bande d'acquisitions de façon constante au cours du déplacement ; le flux instantané mesuré maximum est de 3 500 lux, correspondant à une exposition maximale d'environ 350 lux.heure pour chaque zone de l'œuvre.

Une barre de Spectralon® (6 x 50 cm) couvrant la totalité du champ de vue du capteur est disposée à côté de l'objet étudié et utilisée comme blanc de référence. L'acquisition d'un noir de référence (correspondant au bruit de fond électronique du capteur) pour chaque pixel spatial est également réalisée à chaque mesure par la fermeture d'un obturateur interne. Chaque colonne de l'image scannée par le même pixel du capteur est alors normalisée à l'aide de ses valeurs de noir et de blanc de référence propres. Le traitement ainsi que la visualisation des données sont effectués à l'aide du logiciel ENVI®.

2.2 Analyse du *Codex Borbonicus*

Le *Codex Borbonicus* est un manuscrit aztèque, conservé depuis 1826 à l'Assemblée nationale, ayant fait l'objet d'une étude approfondie entre 2014 et 2017, dans le cadre de la thèse de Fabien Pottier, afin d'en caractériser les matières picturales. Les historiens s'accordent sur une production du document localisée dans le bassin de Mexico



FIGURE 1 – Montage utilisé pour l'analyse du *Codex* (à gauche) : caméra VNIR sur le support en translation, et système de protection pour limiter l'exposition à la lumière de l'objet en cours d'acquisition. À droite, montage en rotation de la caméra SWIR (pour l'analyse de *La Princesa Eudoxia davant la tomba de Sant Esteve*, retable de Saint-Étienne-de-Granollers, MNAC, Barcelone). Dans le cas de la *Sainte Famille* de del Sarto, les lampes sont fixées avec l'imageur au support en rotation.

mais sa date précise de fabrication ne fait pas consensus. Ce manuscrit a la particularité de présenter une rupture dans son contenu graphique (style, technique, utilisation de l'espace et des couleurs), qui permet de définir deux parties distinctes. Selon les hypothèses des spécialistes, ces deux parties auraient pu être produites à des époques différentes : si la première partie semble être dans la pure tradition précolombienne, certains indices laissent penser que la réalisation de la deuxième a été influencée par la présence espagnole.

L'objectif de cette étude était d'enrichir les connaissances sur les savoir-faire mis en œuvre lors de la production de ce manuscrit afin d'aider les historiens à mieux déterminer sa provenance et son contexte de production, et pour le positionner dans une culture technique [33]. Un large panel de techniques ponctuelles ou d'imagerie a été appliqué (spectrométrie de fluorescence de rayon X, spectroscopie Raman, spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, imagerie hyperspectrale…) lors de trois campagnes d'analyse d'une semaine chacune. Dans cet article, nous nous concentrerons sur les résultats obtenus en imagerie hyperspectrale. Les 36 pages du manuscrit ont été entièrement scannées dans les gammes visible et proche infrarouge (400-2 500 nm). Cette technique a été utilisée pour enregistrer et évaluer la totalité de la variabilité spectrale des différentes matières picturales le constituant, avec pour objectif de comparer les spectres des deux parties et de confirmer la représentativité des conclusions tirées des analyses ponctuelles.

Une analyse automatique s'est révélée nécessaire pour appréhender une quantité d'informations aussi importante. Différentes approches ont été abordées dans le traitement des données. Ici une des procédures décrites dans la section 1.3 (la plus fréquemment employée pour les analyses du patrimoine) sera exposée car il s'agit d'une démarche qui ne nécessite pas de connaissance préalable sur la nature ou le nombre de matières colorantes utilisées et qui est donc idéale pour une première exploration des résultats. Une analyse selon une approche supervisée (nécessitant la connaissance des matériaux constitutifs) a aussi été effectuée sur les données du *Codex Borbonicus* et a fait l'objet de plusieurs articles [34, 35].

2.2.1 Traitement des données

Afin d'avoir des informations sur la répartition des matériaux, la routine hybride mentionnée dans la section 1.3 a été appliquée aux données VNIR. Les données SWIR n'ont pas fait l'objet d'une telle procédure car les spectres obtenus dans cette gamme sont une combinaison de différents matériaux ; en effet, le rayonnement dans la gamme infrarouge pénètre plus dans la matière (ici stratifiée) que celui dans la gamme visible. Les spectres obtenus reflètent donc aussi bien les données du support, de la couche de préparation que des matières colorantes. Une allure spectrale ne correspondant pas à un seul matériau, cette routine n'est pas adaptée à ces données.

Ce traitement des images hyperspectrales doit permettre d'une part d'avoir une idée de la diversité des profils spectraux (et donc des matériaux) composant le document, et d'autre part, de regrouper les profils spectraux semblables pouvant être associés à une composition similaire afin de la cartographier.

Une telle exploration des données a été réalisée à l'aide de l'algorithme appelé « *spectral hourglass wizard* » implémenté dans le logiciel ENVI® [14]. Le traitement est divisé en plusieurs étapes : (1) réduction de la dimensionnalité des données, (2) définition de spectres référence, puis (3) classification des pixels spatiaux en fonction de leur proximité avec les références. L'application à un détail de l'image de la page 6 du *Codex Borbonicus* (Figure 2a) est présentée en illustration.

(1) Lors de la première étape, les dimensions spectrales (840 bandes pour l'imageur VNIR) sont réorganisées pour qu'un nombre limité (quelques dizaines) de dimensions composites représentent le maximum de la variabilité des données. Cette étape est obtenue en effectuant une transformation appelée Minimum Noise Fraction (MNF) correspondant à deux analyses en composantes principales en cascade. Le contenu de l'image est alors présenté dans un espace à n de ces dimensions dont on peut choisir la nature et le nombre (deux, trois, voire plus, à l'aide d'une animation) (Figure 2b et c).

(2) En étudiant la distribution du nuage de points en fonction des dimensions mettant en évidence les plus grandes différences, les données aux extrémités du nuage sont sélectionnées manuellement (Figure 1c, chaque groupe est associé à une couleur). Celles-ci définissent les spectres de référence internes de l'image (Figure 2d).

(3) Enfin, chaque spectre (chaque pixel spatial) du cube de données initial est classé en fonction de sa proximité avec l'un ou l'autre de ces spectres de référence. Dans l'exemple présenté ici, la distance mathématique appelée SAM (Spectral Angle Mapper) est utilisée pour évaluer cette proximité. Différentes distances mathématiques existent car s'il est aisé de définir une distance entre deux points, la question est plus complexe lorsqu'il s'agit de calculer une distance entre deux spectres. La distance SAM considère les spectres comme des vecteurs à n dimensions, et calcule l'angle entre les deux spectres comparés. Lorsque l'angle calculé est inférieur à une valeur seuil qui est définie par l'expérimentateur, le spectre est associé à la référence étudiée. Une cartographie est donc obtenue pour chaque spectre de référence (voir Figure 2e, l'exemple de la cartographie de la classe associée au spectre de référence en jaune dans la Figure 2d).

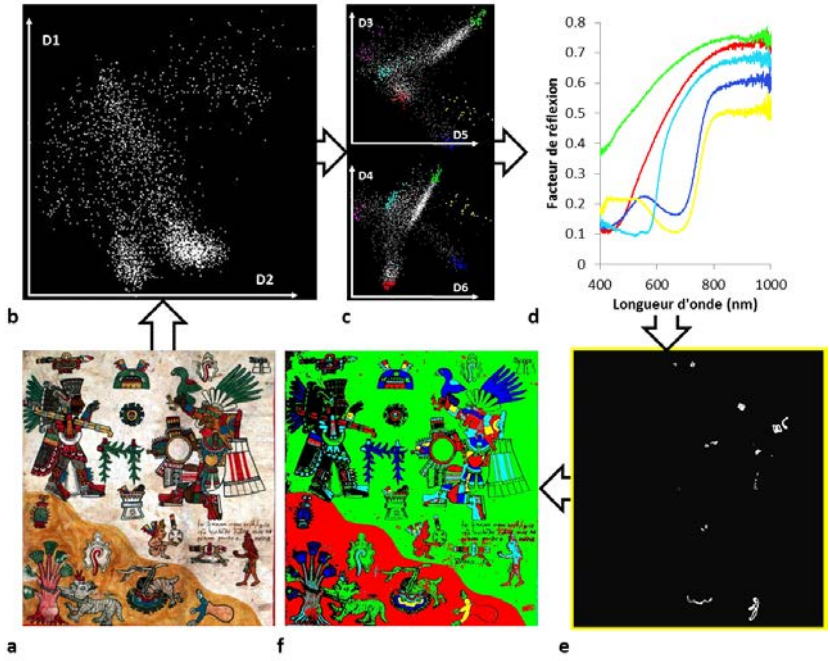


Figure 2 – Différentes étapes du traitement statistique d'un cube hyperspectral. Rendu RVB (chaque canal est associé à la valeur du facteur de réflexion à 460 [B], 549 [V] et 640 nm [R]) d'un détail de la page 6 du Codex Borbonicus (a). Visualisation des données dans un espace à n dimensions (b). Sélection des données se distinguant du groupe dans certaines dimensions (c). Visualisation des spectres de référence (d). Cartographie de la classe associée au spectre de référence jaune (e). Classification des pixels spatiaux de l'image en fonction de leur proximité avec les spectres de références (f).

Une image synthétique finale (Figure 2f) est obtenue en affichant chaque pixel de la couleur de la classe à laquelle il a été associé. Il s'agit donc d'une cartographie des allures spectrales, segmentée en fonction de spectres de référence déterminés par une réduction de la dimensionnalité des données. Elle permet de visualiser au sein d'une

image du manuscrit, les peintures partageant une allure spectrale commune à l'aide d'une représentation en fausses couleurs.

2.2.2 Résultats

La totalité du *Codex Borbonicus* a été assemblée en un cube de données hyperspectrales unique. Un moyennage spatial d'un facteur 4 (chaque carré de 4x4 pixels de l'image initiale est moyenné en un pixel) a été appliqué à chaque page au préalable, afin de réduire le bruit spectral ainsi que le volume de données mis en jeu. Le format linéaire du manuscrit ne se prêtant pas bien à la visualisation des données, elles sont présentées dans une image hyperspectrale rectangulaire synthétisant le document (Figure 3).

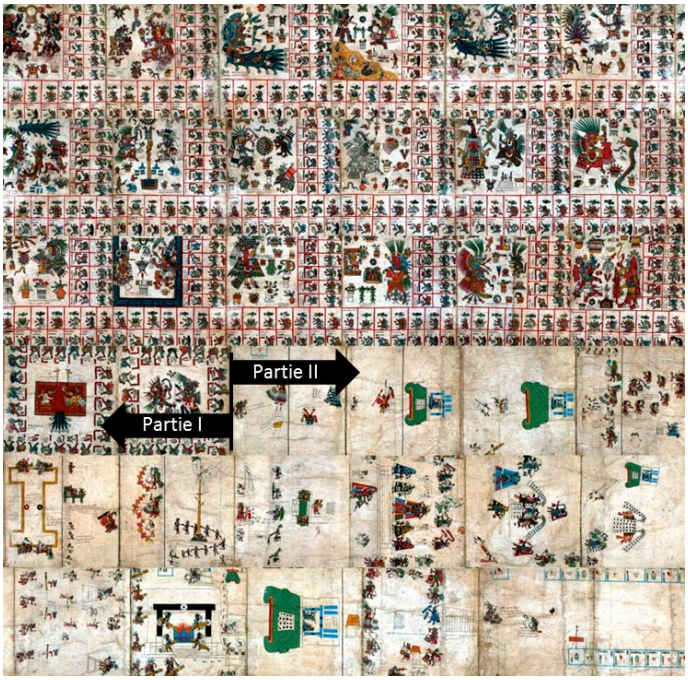


Figure 3 – Rendu RVB de la totalité du Codex Borbonicus.

Le protocole d'exploration statistique précédemment décrit a été appliqué à cette image synthétique du Codex Borbonicus, avec notamment pour objectif de mettre en évidence des différences de composition (donc de profils spectraux) entre les deux parties. Sept spectres de référence ont été définis à l'aide de la réduction de dimension. Ils correspondent aux profils spectraux du substrat et de peintures de différentes couleurs (jaune, rouge, bleu, verte, bleu-gris et brune) (4a). Ils permettent une classification de la majorité des spectres contenus dans l'image du document. Les classes de la Figure 4b sont définies selon les spectres de la Figure 3a et représentées par la couleur du spectre de référence correspondant (valeur seuil SAM = 0.14).

Il est remarquable que le traitement des données ait mis en évidence l'existence d'une peinture bleu-gris (Figure 4a) bien qu'elle ne soit utilisée que sur deux pages du manuscrit. Cet exemple montre la capacité d'exploration de cet outil statistique puisqu'il permet de déceler des profils très minoritaires dans l'image étudiée. Ce résultat confirme par ailleurs qu'aucune nuance distincte spectralement n'a été oubliée lors des analyses ponctuelles, puisqu'elle aurait été mise en évidence par cette première étape du traitement statistique.

Par ailleurs, les paramètres de classification choisis permettent de grouper en une classe unique le substrat de la totalité du document. De la même façon, toutes les zones peintes d'une même couleur (que ce soit pour la couleur bleue, verte, rouge ou jaune) sont regroupées dans une même classe, indépendamment de la page (ou de la partie) considérée, ce qui semble souligner une grande homogénéité de composition des matériaux du manuscrit (à l'exception des peintures brune et bleu-gris, qui ne sont cartographiées que dans la partie II).

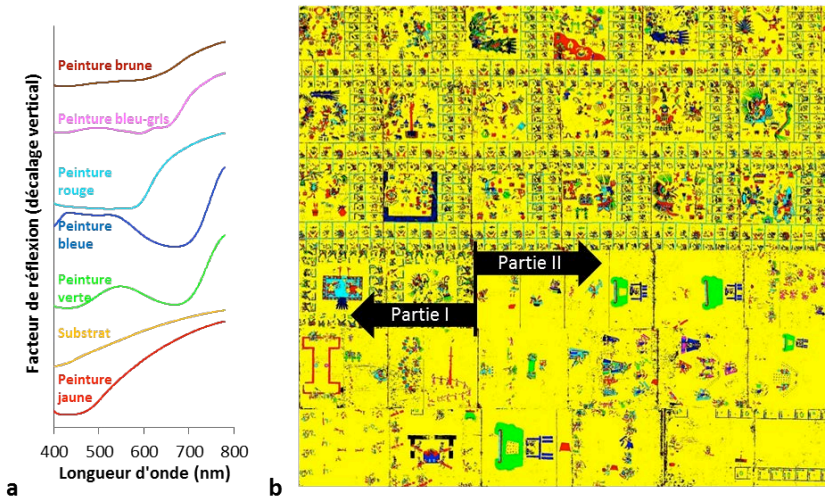


Figure 4 – Spectres de référence ayant émergés de l'étude statistique de l'image du Codex Borbonicus (a). Classification spectrale de la totalité du Codex Borbonicus réalisée à l'aide du spectral hourglass wizard (ENVI®).

Un autre type de représentation doit être utilisé pour étudier indépendamment chaque couleur de manière plus fine. En effet, la représentation synthétique de la Figure 4 est affectée par le fait que les différences spectrales entre couleurs sont plus grandes que les différences éventuelles au sein d'une même couleur. Autrement dit, une analyse globale de la variabilité spectrale du document ne peut pas mettre en évidence des différences spectrales subtiles (qui peuvent être la conséquence d'un mode de préparation différent par exemple) pour des matériaux de composition similaire.

Un histogramme de distance permet ici de visualiser la distribution des spectres de l'image en fonction de leur proximité avec la référence (Figure 5a, exemple de la référence verte Figure 4a). La majorité des spectres est concentrée à une distance

spectrale assez grande (au-delà de 0.3), ce qui signifie une absence de correspondance avec la référence.

Il est alors intéressant d'étudier la cartographie des spectres les plus proches de la référence (SAM < 0.23 dans l'exemple) en fonction de la valeur de l'indice de proximité (Figure 5b), toujours avec le spectre de référence de la peinture verte. Il ne s'agit donc plus ici d'une cartographie binaire en fonction d'une valeur seuil mais une représentation en fonction de la valeur de l'indice de proximité (c'est-à-dire une représentation de la valeur de la distance SAM entre le spectre de chaque pixel et la référence). La représentation en niveaux colorés permet de visualiser des zones présentant une correspondance très forte (en rouge-orange), moyenne (jaune-vert), faible (bleue-violet) et nulle (en noir, SAM > 0.23). Seules les peintures vertes de la seconde moitié du manuscrit (partie II) sont représentées en rouge/jaune. Elles sont donc les plus proches du spectre de référence de cette classe, tandis que les verts de la première moitié (partie I) leur sont différentiables (en vert dans la carte de distance), mais présentent tout de même une certaine proximité spectrale. Les bleus de la partie I (en bleu), puis certains de ceux de la partie II (en violet) présentent également une proximité spectrale, plus lointaine toutefois. Ces quatre peintures (les verts et bleus des deux parties du manuscrit) partagent donc une allure commune permettant de les distinguer du reste du document, bien qu'elles présentent également de légères différences entre elles.

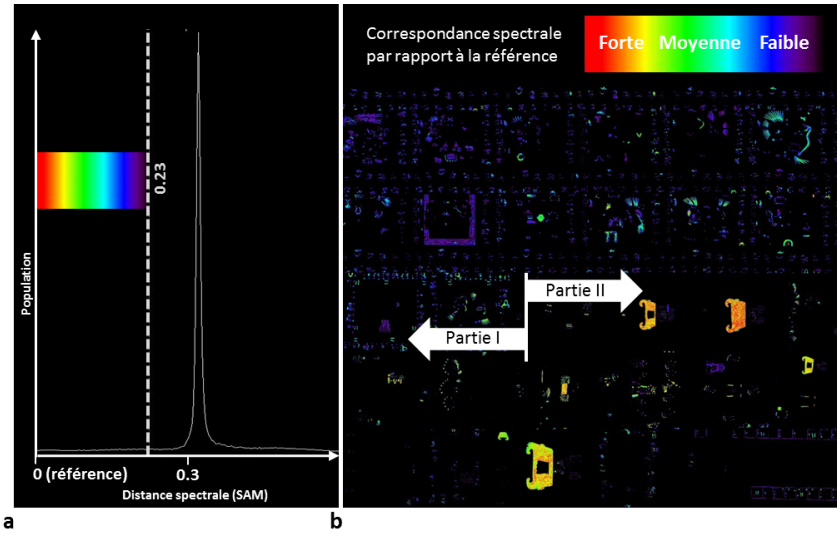


Figure 5 – Histogramme de distance SAM à la référence verte (courbe verte Figure 3) de l'image VNIR du Codex Borbonicus (a). Cartographie correspondante, l'échelle de couleurs représente les distances comprises entre 0 et 0.23 (b).

Ces observations confirment que toutes ces peintures partagent un profil spectral global commun, probablement lié à la présence de bleu Maya, caractérisé lors d'analyses ponctuelles [34]. Dans le détail toutefois, elles sont spectralement différentiables. *In fine*, cela montre que les deux parties du manuscrit ont été peintes avec des peintures

vertes et bleues aux propriétés spectrales différentes. Des analyses en laboratoire ont permis d'associer les variations spectrales des bleus des deux parties à des préparations différentes (temps et/ou température de fabrication du pigment différents).

La même procédure a été appliquée aux peintures rouges et ne permet en revanche pas de générer une cartographie des peintures d'une partie sans en inclure l'autre. Pour les peintures jaunes, les résultats indiquent également une proximité spectrale entre les deux parties à l'échelle du document et rendent donc compte de leur homogénéité spectrale. Cependant ce résultat doit être interprété de façon prudente, les jaunes d'origine organique ne présentant pas de caractéristique spécifique. On peut seulement dire qu'aucun indice d'utilisation de matériau différent n'est révélé par cette technique mais il sera difficile de conclure sur la similarité des matériaux dans ce cas précis.

Enfin, le substrat du document dans son ensemble est également homogène d'un point de vue spectral. Rien ne laisse donc penser que les deux parties du manuscrit ont été réalisées sur des supports séparés, mais bien sur un support unique préparé en une étape. Cette hypothèse est par ailleurs confirmée par les résultats obtenus en cartographiant le gypse utilisé dans une couche préparatoire à l'aide de l'imagerie hyperspectrale SWIR [34].

L'analyse des données hyperspectrales du *Codex Borbonicus* dans le domaine visible a montré l'homogénéité de son support probablement préparé en une étape unique. En revanche, l'utilisation de peintures spectralement distinctes entre les deux parties stylistiques du document (présence des profils bleu-gris et brun dans la deuxième partie uniquement, différence d'allure spectrale des peintures vertes et bleues entre les deux parties), confirme l'hypothèse de deux séquences de réalisation distinctes, probablement effectuées par au moins deux scribes différents, éventuellement à des moments différents.

La routine hybride présentée a montré sa capacité à classifier l'intégralité des spectres enregistrés sur le *Codex Borbonicus* et donc à conclure sur la variabilité des matières colorantes utilisées sur un document de plusieurs dizaines de pages. Elle a en outre permis de détecter la présence de profils spectraux peu représentés dans l'image étudiée. Il faut toutefois noter que cette première exploration est d'autant plus efficace que les spectres des matériaux sont très différents ou présentent des caractéristiques très spécifiques. C'est par exemple le cas de la peinture bleu-gris qui présente un spectre très différent des autres (correspondant très certainement à un extrait des pétales de la plante *Commelina coelestis*) [34]. Cependant il peut exister une grande variabilité spectrale (qui se traduit visuellement par une gamme de couleurs étendue) pour un même matériau en fonction de la préparation de la couche picturale ou de son application. Inversement, différents matériaux (comme les différents colorants jaunes extraits de plantes mésoaméricaines) peuvent présenter à la fois des couleurs et des spectres assez semblables. Dans ce cas, le couplage avec d'autres techniques comme la fluorescence sous rayonnement UV peuvent éventuellement aider à corroborer ou non ces résultats. Enfin, le choix de la représentation de la cartographie (avec seuil ou en faisant apparaître les valeurs de distance) peut grandement influencer l'interprétation des données.

2.3 Peinture à l'huile d'Andrea del Sarto

La *Sainte Famille de Barberini* (Figure 5) a été peinte par Andrea del Sarto entre 1520 et 1530, et est conservée depuis 1949 à la Galleria nazionale d'arte antica (GNAA) du palais Barberini à Rome. Des analyses par fluorescence et diffraction des rayons X ainsi que de l'imagerie hyperspectrale en proche et moyen infrarouge ont été menées en complément des techniques plus classiques de réflectographie infrarouge réalisées au préalable. L'étude n'a pu être réalisée que sur deux jours de fermeture du musée, à six mois d'intervalle : la première journée étant dédiée aux techniques ponctuelles par rayons X et la deuxième à l'imagerie hyperspectrale.

Les principaux résultats ont été présentés ailleurs [36], en soulignant les avancées sur la compréhension de l'œuvre et la technique picturale de l'artiste : ces analyses ont été interprétées en lien avec les écrits de Léonard et ceux de Vasari (qui a été élève d'Andrea del Sarto) et mises en relation avec les œuvres de l'artiste. Nous souhaitons ici mettre en avant l'apport de l'imagerie hyperspectrale et les possibilités sur ce type d'œuvres. Il s'agit d'un cas complexe d'une peinture multicouche et comportant un vernis. Nous soulignerons l'apport de l'imagerie hyperspectrale en tant qu'outil d'identification de la palette mais aussi comme une technique de « réflectographie améliorée ».

Dans le cas présenté précédemment du *Codex Borbonicus*, l'aspect imagerie a pu être complètement exploité par une approche statistique sur l'ensemble des pages du manuscrit. L'identification et l'étude des matériaux avaient été préalablement réalisées sur certaines pages choisies par des spectroscopies ponctuelles. Dans le cas présent, la problématique était différente puisque les analyses ponctuelles correspondantes n'ont pu être réalisées au préalable. L'image hyperspectrale a donc aussi été exploitée du point de vue de l'identification des matériaux. L'approche statistique qui pourrait permettre la cartographie des pigments sur l'œuvre s'est par contre révélée difficile à mettre en œuvre pour des raisons instrumentales et dues à la nature même de l'œuvre, multicouche et vernie.

2.3.1 Identification de la palette

Les principaux pigments ont été identifiés par fluorescence et diffraction des rayons X. L'interprétation de spectres extraits des images hyperspectrales nous a permis de confirmer certaines identifications voire même de préciser la nature de pigments non détectables par rayons X. C'est notamment le cas des pigments laqués, à base de colorants organiques. Ici, dans la draperie rouge du vêtement de la Vierge, les spectres de réflexion dans le domaine visible présentent des minima caractéristiques de laques à anthraquinone rouges. Le tracé du $\log(1/R)$ permet de mettre en évidence ces bandes d'absorption correspondant à des transitions électroniques entre les orbitales moléculaires délocalisées des colorants rouges naturels. Les colorants à structure anthraquinonique (d'origine végétale ou animale) peuvent être reconnus grâce à leur bande d'absorption structurée en deux sous bandes dans la région 500–580 nm : à 510–515 et 540–545 nm pour les colorants d'origine végétale (laque de garance), et à 520–525 et 550–565 nm pour les laques de colorants d'origine animale (kermès, cochenille,



Figure 6 – *Sainte Famille de Barberini* d'Andrea del Sarto. Photographie et réflectographie infrarouge.

gomme-laque) d'après [3]. D'après la Figure 6, la position des bandes indique une laque rouge d'origine animale.

Dans un cas idéal, par exemple pour un manuscrit, il est possible de réaliser une cartographie de ce type de colorant dans l'œuvre. Cela est cependant plus complexe pour les peintures de chevalet pour lesquelles la présence de vernis ainsi que les mélanges de pigments ou les superpositions de couches modifient notablement les spectres. La prise en compte de ces différents paramètres pour le traitement de ce type d'œuvres est un sujet actif de recherche. Dans le cas présenté ici, la qualité des données est un facteur limitant supplémentaire : disposant d'un temps d'accès à l'œuvre très restreint, des conditions optimales d'acquisition n'ont pas pu être atteintes. La présence d'un épais vernis entraîne une très forte réflexion spéculaire de notre éclairage qui altère les données sur certaines zones.

Ainsi seule l'identification du colorant a été possible ici ; et cela même n'est pas toujours le cas suivant la formulation de la matière picturale. Les conditions de préparation du pigment laqué, telles que la nature de la charge minérale ou les conditions de pH, peuvent modifier les bandes d'absorption et rendre l'identification plus délicate. De plus la présence de mélanges de différents pigments est aussi souvent un obstacle à leur caractérisation.

L'objectif de l'approche analytique mise en œuvre ne se limite pas à l'identification des matériaux mais tente de comprendre leur utilisation par l'artiste. L'identification des pigments bleus utilisés constitue un deuxième exemple de l'apport de l'imagerie hyperspectrale sur cette œuvre. Il s'agit cependant d'un cas où la nature du pigment utilisé est clairement identifiée par fluorescence et diffraction des rayons X mais pour

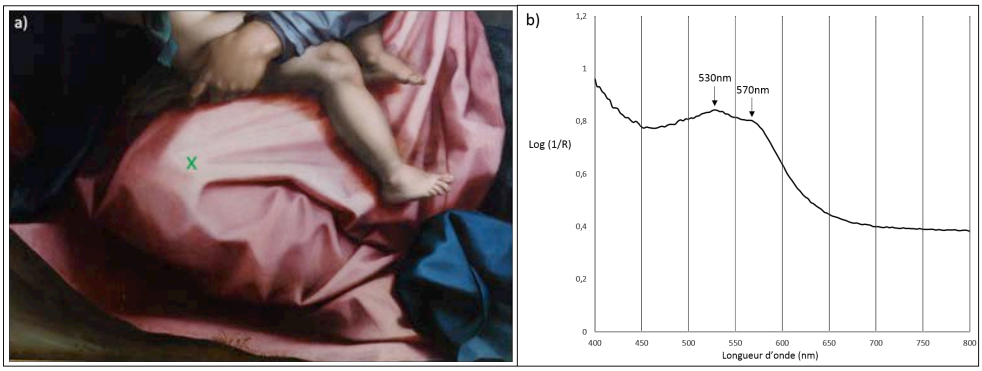


FIGURE 7 – (a) détail montrant le drapé rouge de la Vierge ainsi que la position du spectre extrait de l'image hyperspectrale dans le domaine visible ; (b) spectre VNIR log(1/R) correspondant.

lequel le spectre de réflexion permet de mieux comprendre la technique picturale et l'intention de l'artiste.

Ce tableau présente une grande variété de tons bleus : le ciel, la manche de la Vierge très légèrement mauve, le bleu-vert de la draperie portée par le Christ, ou enfin le bleu plus sombre d'une draperie sur laquelle est assise la Vierge. Les analyses par fluorescence et diffraction des rayons X ont cependant montré que tous ont été obtenus par utilisation de l'azurite, pigment bleu composé de carbonate de cuivre. Les tonalités différentes sont donc obtenues par l'application d'un seul pigment, en juxtaposition, mélange, et/ou superposition avec d'autres. Dans ce contexte il est intéressant de constater que le spectre de réflexion dans le domaine visible associé à la manche de la Vierge est très proche de celui du lapis-lazuli (Figure 7) avec une remontée dans les rouges, à la différence du spectre de l'azurite. Ce bord d'absorption vers 700 nm ne peut s'expliquer par la présence du vernis qui provoquerait une remontée dans les bleus [37]. Le spectre SWIR correspondant (1 000 à 2 500 nm) confirme pourtant bien la présence d'azurite grâce aux bandes d'absorption très caractéristiques de ce pigment, en particulier liées aux vibrations des carbonates, à 2 285 et 2 355 nm. Le spectre de réflexion obtenu pourrait donc être expliqué par un mélange ou une superposition de l'azurite avec un pigment rouge. Une macrophotographie de la zone pointe vers la deuxième hypothèse : une sous-couche rose est visible notamment dans les craquelures de cette zone. Les analyses par fluorescence X n'ayant pas révélé de présence de mercure (ni de fer), il ne s'agit donc pas de la chair de la Vierge mais plus probablement d'une sous-couche contenant de la laque rouge appliquée pour donner une tonalité mauve. Cette laque étant présente en sous-couche, elle n'a pas pu être mise en évidence par nos analyses.

L'étude de ces pigments bleus a permis de souligner l'habileté de l'artiste qui a réussi à recréer la teinte légèrement mauve du lapis-lazuli, tout en préservant la tonalité générale de la peinture par l'usage d'un seul pigment bleu.

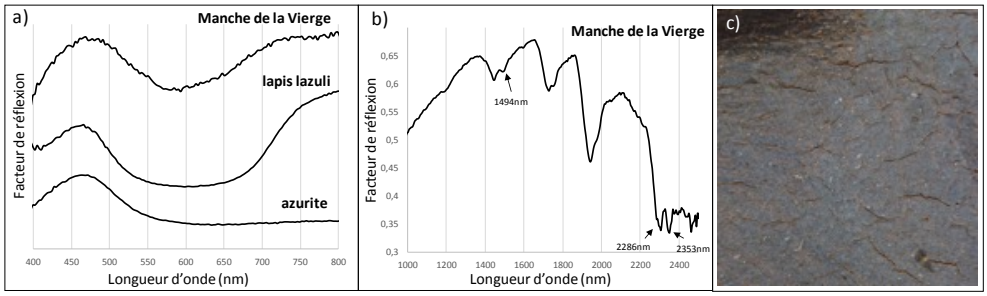


FIGURE 8 – (a) spectres de réflectance (de haut en bas) : d'une zone sur la manche de la Vierge, du lapis-lazuli et de l'azurite (pigments purs en pastille) ; (b) spectre SWIR de la manche de la Vierge montrant les bandes d'absorption spécifiques de l'azurite (1494, 2286 et 2353 nm) ; (c) macrophotographie de la manche de la Vierge (champ 17,3 * 13 mm).

Un traitement statistique global des images VNIR obtenues, identique à celui pratiqué sur le codex et présenté Figure 1 n'a pas été jugé pertinent. En effet des zones très différentes en composition présentent dans ce cas précis de fortes similarités spectrales, soit qu'elles soient très sombres ou au contraire présentant une forte réflexion spéculaire. Au-delà de ces limites instrumentales qui peuvent être dépassées dans des conditions d'acquisition optimisées, une autre raison est cette fois intrinsèque aux peintures de chevalet de cette époque. Les artistes utilisent des mélanges de pigments et des superpositions de couches translucides afin de moduler les ombres et les lumières, de créer des nuances très fines sans altérer l'homogénéité tonale de l'œuvre : une grande variété spectrale peut ainsi exister pour un même pigment comme cela est illustré par les différentes tonalités bleues obtenues à partir d'azurite.

Il est par contre possible de réaliser des images de type cartographie sur des zones restreintes et à partir d'un traitement sur une gamme limitée de longueurs d'onde. La Figure 9 montre ainsi, à titre d'exemple, une image de la répartition du vermillon et de la laque rouge d'une zone de l'œuvre. Il n'est cependant pas possible de relier directement le contraste de l'image à la quantité de pigments présents : un pigment utilisé en mélange ne présentera pas le même spectre que s'il est utilisé seul (avec par exemple le décalage du front d'absorption) et l'image de sa répartition en sera donc modifiée. De plus les pigments présents en sous couche ne sont pas directement visibles : comme mentionné précédemment, il est probable que la manche de la Vierge présente une sous couche de laque qui n'apparaît pas sur la Figure 9.

2.3.2 Réflectographie améliorée

L'imagerie hyperspectrale dans le proche infrarouge peut permettre de révéler des étapes cachées de la vie de la peinture : des dessins sous-jacents, des repentirs de la main de l'artiste ou des restaurations postérieures à l'artiste [7]. Delaney *et al.* ont ainsi donné l'exemple d'une peinture de Picasso, *La Tragédie*, pour laquelle de nombreux dessins sous-jacents difficilement discernables par réflectographie classique ont été découverts grâce à des réflectogrammes infrarouge fausses couleurs obtenus par combinaison de trois bandes spectrales étroites [38]. Le choix de ces bandes est fait afin de révéler au mieux certains détails, en fonction de l'épaisseur et des propriétés



Figure 9 – Image issue de traitements SAM réalisés à partir des spectres préenregistrés de zones comportant du vermillon (bleu) et de la laque (rouge). Il s'agit de la combinaison de deux images : les zones bleues indiquent la présence d'un maximum de la dérivée à 585 nm (traitement de 520 à 630 nm) ; et les zones rouges celles d'un maximum autour de 610 nm (traitement de 550 à 700 nm). Il est intéressant de noter que le maximum de la dérivée dans les zones comportant du vermillon est à 585 nm, et non 590 comme attendu ; l'image obtenue correspond donc à une image du mélange contenant du vermillon.

des matériaux à traverser : cette méthodologie permet de mettre en évidence spécifiquement un dessin ou un repentir d'intérêt au contraire de la méthodologie classique « large bande » pour laquelle un seul réflectogramme est obtenu sur une large gamme spectrale.

Dans le cas de la *Sainte Famille de Barberini*, une image à 1 700 nm permet de mettre en évidence la croix tenue par St Joseph dans une version antérieure de l'œuvre (Figure 10c), alors que celle-ci se devinait à peine par réflectographie (Figure 10b). Cette longueur d'onde (1 700 nm) a été choisie car elle correspond à un maximum de différence de réflectance entre les deux spectres de l'intérieur de la croix et du drapé de St Joseph (Figure 10d).

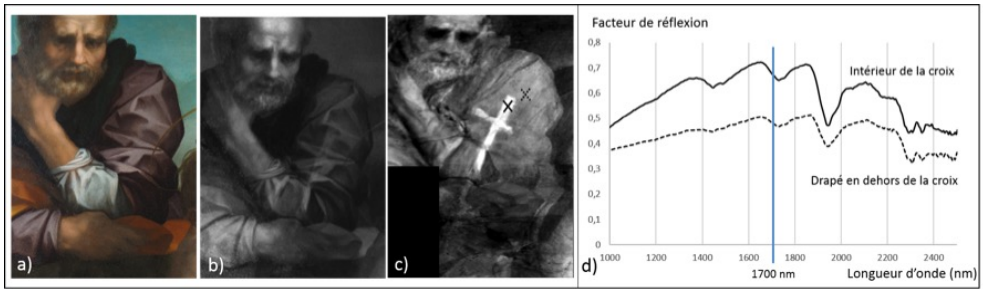


Figure 10 – (a) photographie visible d'un détail de l'œuvre montrant saint Joseph ; (b) réflectographie infrarouge de la même zone ; (c) image hyperspectrale SWIR à 1700 nm avec les deux points où sont extraits les spectres de réflectance. Le support en rotation utilisé pour réaliser le scan de l'image, induit des distorsions spatiales visibles ici ; (d) spectres de réflectance SWIR de l'intérieur de la croix et du drapé de saint Joseph en dehors de la croix.

Un traitement statistique des images hyperspectrales SWIR de la *Sainte Famille Barberini* a permis de révéler un dessin sous-jacent peu ou non visible par réflectographie classique. Une autre possibilité est en effet d'utiliser les images obtenues par réduction de la dimensionnalité des données : comme expliqué dans le 1.3, la variabilité des images est concentrée en un nombre minimal d'images composites. Les images obtenues peuvent révéler de façon très nette des modifications antérieures de la composition de l'œuvre. Il n'est par contre pas possible de relier les contrastes obtenus à la composition chimique des différentes zones de l'image.

L'une des images obtenues du visage de la Vierge, présentée Figure 11c, confirme l'existence de plusieurs versions antérieures avec plus de deux contours différents. Le visage de la Vierge a ainsi subi de nombreuses modifications : non seulement la position exacte du nez et des oreilles mais aussi, sans doute dans une version antérieure, l'orientation globale du visage. Il est d'ailleurs possible de comparer ces versions à des dessins ou œuvres connus de l'artiste : l'une des versions devait s'apparenter à la Vierge de la *Fries Madonna*, peinte quelques années plus tôt, qui regarde directement l'observateur [36].



Figure 11 – (a) photographie visible d'un détail de l'œuvre montrant le visage de la Vierge ; (b) réflectographie infrarouge de la même zone ; (c) image de la même zone issue d'un traitement par MNF (« *Minium Noise Fraction* ») des données hyperspectrales SWIR.

Conclusion

L'imagerie hyperspectrale est une technique relativement simple et rapide à mettre en œuvre. L'instrument peut être transporté pour des mesures *in situ*, ce qui est important pour étudier des œuvres difficilement déplaçables. Lors de l'analyse, l'objet d'étude est exposé à un simple éclairage halogène qui n'est pas néfaste du point de vue de sa conservation (l'analyste prenant soin de limiter l'exposition au minimum). La possibilité de scanner la totalité de la surface d'un document (ou de toute surface plane) représente un complément nécessaire aux analyses ponctuelles dont la représentativité réelle est par définition limitée. L'acquisition des données se fait en un temps court et permet d'obtenir rapidement les premières images qui peuvent servir de point de départ de discussion avec les responsables de l'œuvre. De par la rapidité d'acquisition des données, cette technique permet aussi d'analyser un corpus important d'œuvres ce qui rend possible des études comparatives d'envergure.

Devant la grande quantité de données ainsi générée, l'utilisation d'outils de statistique exploratoire permet de comprendre la composition spectrale d'une image et de la

segmenter spatialement en fonction de sa composition. Le choix de la représentation de la cartographie (avec seuil ou en faisant apparaître les valeurs de distance) peut alors influencer l'interprétation des résultats, comme on l'a vu dans le cas du Codex. Le choix du spectre de référence et de la distance mathématique utilisés est aussi un paramètre essentiel dans l'interprétation des données et ce choix, souvent subjectif, peut fortement influencer les résultats. Ce champ de recherche, en particulier pour les matériaux du patrimoine, est encore à approfondir. Il faut donc rester prudent dans notre interprétation des résultats statistiques.

L'approche statistique peut aussi se révéler non pertinente, par exemple lorsque l'œuvre présente des mélanges de couleur complexes ou des superpositions : c'est le cas de nombreuses peintures de chevalet pour lesquelles une segmentation de l'œuvre ne serait pas représentative du travail de l'artiste. Dans ces cas on cherchera plus à cartographier des matériaux spécifiques, pigments ou liants afin de faire ressortir leur répartition dans l'œuvre : l'identification préalable des motifs spectraux, à partir de base de données ou de méthodes complémentaires sera donc nécessaire. L'utilisation du domaine spectral en proche IR peut aussi permettre d'accéder à des informations sous-jacentes en faisant ressortir dessins et *pentimenti* particulièrement intéressantes pour la compréhension de ces œuvres. Pour ce type de problématique, la bonne résolution spectrale de l'imagerie hyperspectrale est un avantage par rapport à d'autres techniques d'imagerie dans l'infrarouge car elle permet de sélectionner la gamme spectrale optimale pour visualiser les différentes couches picturales superposées. Cependant les caméras dites SWIR sont moins transportables et d'un coût bien plus élevé que les caméras VNIR, ce qui en limite les applications. L'interprétation des spectres est aussi délicate en raison du peu de données publiées dans ce domaine spectral sur les matériaux du patrimoine, que ce soit en termes de spectres de références mais aussi d'études plus théoriques sur les phénomènes physiques à l'origine des spectres dans ces systèmes multicouches.

Les potentialités de ces techniques ont donc été démontrées sur plusieurs cas d'étude mais il reste un vaste champ d'exploration pour mieux maîtriser à la fois les conditions d'acquisition, les modalités de traitement de données et leur interprétation.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier M^{me} Éliane Fighiera et M. Patrick Montambault qui ont autorisés l'accès au *Codex Borbonicus* et permis la mise en œuvre des mesures. Ils remercient également la Fondation des sciences du patrimoine (ANR-10-LABX-0094-01) et l'Assemblée nationale qui ont financé le projet d'étude du *Codex*. L'ANR est également remerciée pour le soutien financier apporté au projet Labcom Lab4Art (ANR-16-LCV1-0005-01) permettant l'analyse de la *Sainte Famille* d'Andrea del Sarto. Le palais Barberini (Gallerie Nazionali di Arte Antica di Roma) ainsi que le laboratoire de restauration associé (Laboratorio di restauro della soprintendenza special PSAE e polo museale della città di Roma) sont aussi chaleureusement remercié pour l'accès à la *Sainte Famille* ; en particulier l'aide de Chiara Merucci et son expertise ont été précieuses pour l'analyse de l'œuvre.

Les auteurs remercient également le D^{r} John Delaney pour son aide à la mise en place des mesures et des traitements de données hyperspectrales.

Références

[1] C. Miliani, F. Rosi, B.G. Brunetti, A. Sgamellotti, In situ Non invasive study of artworks : the MOLAB multitechnique approach. Accounts of Chemical Research. 43, 6, 728-738, 2010.

[2] M. Alfeld, L. de Viguerie, Recent developments in spectroscopic imaging techniques for historical paintings - A review, Spectrochimica Acta Part B : Atomic Spectroscopy. 2017.

[3] M. Aceto, A. Agostino, G. Fenoglio, A. Idone, M. Gulmini, M. Picollo, P. Riciardi, J. K. Delaney, Characterisation of colourants on illuminated manuscripts by portable fibre optic UV-visible-NIR reflectance spectrophotometry. Analytical Methods. 6, 1488-1500, 2014.

[4] J.M. Fernandez Rodriguez, J.A. Fernandez Fernandez, Application of the Second Derivative of the Kubelka–Munk Function to the Semiquantitative Analysis of Roman Paintings. COLOR research and application. 30 (6), 448-456, 2005.

[5] P. Ricciardi, J. K. Delaney, M. Facini, J. G. Zeibel, M. Picollo, S. Lomax, M. Loew, Near Infrared Reflectance Imaging Spectroscopy to Map Paint Binders In Situ on Illuminated Manuscripts. Angewandte Chemie International Edition. 51, 5607-5610, 2012.

[6] C. Cucci, J. K. Delaney, M. Picollo, Reflectance Hyperspectral Imaging for Investigation of Works of Art : Old Master Paintings and Illuminated Manuscripts. Accounts of Chemical Research. 49, 2070-2079, 2016.

[7] J. K. Delaney, J. G. Zeibel, M. Thoury, R. Littleton, K. M. Morales, M. Palmer, E.R. de la Rie, « Visible and infrared reflectance imaging spectroscopy of paintings : pigment mapping and improved infrared reflectography », Proc. SPIE 7391, ed. L. Pezzati and R. Salimbeni, Munich, p. 739103-8, 2009.

[8] K. A. Dooley, J. Coddington, J. Krueger, D. M. Conover, M. Loew, J. K. Delaney, Standoff chemical imaging finds evidence for Jackson Pollock's selective use of alkyd and oil binding media in a famous "drip" painting. Analytical Methods. 9, 28-37, 2017.

[9] C. Daffara, D. Ambrosini, L. Pezzati, P. I. Mariotti, Mid-infrared reflectography for the analysis of pictorial surface layers in artworks. AIP Conference Proceedings, 1537, 68-75, 2013.

[10] F. Rosi, C. Miliani, R. Braun, R. Harig, D. Sali, B. G. Brunetti, A. Sgamellotti, Noninvasive Analysis of Paintings by Mid-infrared Hyperspectral Imaging. Angewandte Chemie. 125, 5366-5369, 2013.

[11] S. Legrand, M. Alfeld, F. Vanmeert, W De Nolf, K. Janssens, Macroscopic Fourier transform infrared scanning in reflection mode (MA-rFTIR), a new tool for chemical imaging of cultural heritage artefacts in the mid-infrared range. The Analyst. 139, 2489-2498, 2014.

[12] http ://www.microimages.com/documentation/Tutorials/hyprspec.pdf site consulté en juillet 2017.

[13] L. Cséfalvayoá, M. Strlič, H. Karjalainen, Quantitative NIR Chemical Imaging in Heritage Science. Analytical Chemistry. 83, 5101-5106, 2011.

[14] J. K. Delaney, J. G. Zeibel, M. Thoury, R. O. Y. Littleton, M. Palmer, K. M. Morales, E. Rene, A. N. N. Hoenigswald, Visible and Infrared Imaging Spectroscopy of Picasso's Harlequin Musician : Mapping and Identification of Artist Materials in Situ. Applied spectroscopy. 64, 584-594, 2010.

[15] A. Mounier, G. Le Bourdon, C. Aupetit, C. Belin, L. Servant, S. Lazare, Y. Lefrais, F. Daniel, Hyperspectral imaging, spectrofluorimetry, FORS and XRF for the non-invasive study of medieval miniatures materials. Heritage Science. 2, 24, 2014.

[16] J. K. Delaney, P. Ricciardi, L. D. Glinsman, M. Facini, M. Thoury, M. Palmer, E. R. de la Rie, Use of imaging spectroscopy, fiber optic reflectance spectroscopy, and X-ray fluorescence to map and identify pigments in illuminated manuscripts. Studies in Conservation, 59, 91-101, 2014.

[17] J. Boardman, F. Kruse, R. Green, Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data, in : Summaries of the Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop. Volume 1 : AVIRIS Workshop, 23–26, 1995.

[18] K. A. Dooley, S. Lomax, J. G. Zeibel, C. Miliani, P. Ricciardi, A. Hoenigswald, M. Loew, J. K. Delaney, Mapping of egg yolk and animal skin glue paint binders in Early Renaissance paintings using near infrared reflectance imaging spectroscopy. The Analyst, 138, 4838-4848, 2013.

[19] G. Sciutto, P. Oliveri, S. Prati, M. Quaranta, S. Bersani, R. Mazzeo, An advanced multivariate approach for processing X-ray fluorescence spectral and hyperspectral data from non-invasive in situ analyses on painted surfaces. Analytica Chimica Acta, 75, 30-38, 2012.

[20] F. Daniel, A. Mounier, J. Pérez-Arantegui, C. Pardos, N. Prieto-Taboada, S. Fdez-Ortiz de Vallejuelo, K. Castro, Hyperspectral imaging applied to the analysis of Goya paintings in the Museum of Zaragoza (Spain). Microchemical Journal, 12, 113-120, 2015.

[21] M. Attas, E. Cloutis, C. Collins, D. Goltz, C. Majzels, J. R. Mansfield, H. H. Mantsch, Near-infrared spectroscopic imaging in art conservation : Investigation of drawing constituents. Journal of Cultural Heritage. 4, 127-136, 2003.

[22] P. Ricciardi, J. K. Delaney, L. Glinsman, M. Thoury, M. Facini, E. R. de la Rie, « Use of visible and infrared reflectance and luminescence imaging spectroscopy to study illuminated manuscripts : pigment identification and visualization of underdrawings », Proc. SPIE 7391, ed. L. Pezzati and R. Salimbeni, 2009.

[23] R. Padoan, M. E. Klein, B. J. Aalderink, G. de Bruin, T. A. G. Steemers, The Hyperspectral Imaging Project at the Nationaal Archief of the Netherlands, 2004.

[24] M. E. Klein, B. J. Aalderink, R. Padoan, G. de Bruin, Quantitative hyperspectral reflectance imaging. Sensors. 6, 1-42, 2007.

[25] F. G. France, M. B. Toth, R. B. Toth Associates, E. F. Hansen, Advanced spectral imaging for interdisciplinary cultural heritage preservation. ICOM-CC 16th triennial conference Lisbon, 1-9, 2010.

[26] S. Joo Kim, F. Deng, M. S. Brown, Visual enhancement of old documents with hyperspectral imaging. Pattern Recognition. 44, 1461-1469, 2011.

[27] J. R. Mansfield, M. Attas, C. Majzels, E. Cloutis, C. Collins, H. H. Mantsch, Near infrared spectroscopic reflectance imaging : a new tool in art conservation. Vibrational Spectroscopy. 28, 59-66, 2002.

[28] L. Snijders, T. Zaman, D. Howell, Using hyperspectral imaging to reveal a hidden precolonial Mesoamerican codex. Journal of Archaeological Science : Reports. 9, 143-149, 2016.

[29] A. Cesaratto, A. Nevin, G. Valentini, L. Brambilla, C. Castiglioni, L. Toniolo, M. Fratelli, D. Comelli, A Novel Classification Method for Multispectral Imaging Combined with Portable Raman Spectroscopy for the Analysis of a Painting by Vincent Van Gogh. Applied Spectroscopy. 67, 1234-1241, 2013.

[30] H. Deborah, S. George, J. Y. Hardeberg, Pigment Mapping of the Scream (1893) Based on Hyperspectral Imaging. International Conference on Image and Signal Processing, 247-256, 2014.

[31] A. Moutsatsou, A. Alexopoulou, A note on the construction of test panels for the spectral imaging of paintings. Studies in Conservation. 59, 3-9, 2014.

[32] http ://fors.ifac.cnr.it/ site consulté en Aout 2017.

[33] F. Pottier, « Etude des matières picturales du Codex Borbonicus - Apport des spectroscopies non invasives à la codicologie », thèse de doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise, 314 pages, 2017.

[34] F. Pottier, S. Kwimang, A. Michelin, C. Andraud, F. Goubard, B. Lavédrine, Independent macroscopic chemical mappings of cultural heritage materials with reflectance imaging spectroscopy : the case study of a 16th century Aztec manuscript. Analytical Methods. 9, 5997-6008, 2017.

[35] F. Pottier, A. Michelin, S. Kwimang, C. Andraud, F. Goubard, B. Lavédrine, Macroscopic reflectance spectral imaging to reveal multiple and complementary types of information for the non-invasive study of an entire polychromatic manuscript. Journal of Cultural Heritage, Journal of Cultural Heritage 35, 1-15, 2019.

[36] A. Daveri, A. G. De Marchi, L. de Viguerie, H. Glanville, C. Merucci, S. Pedetti, M. Radepont, M. Vagnini, P. Walter, Andrea del Sarto in the Galleria Nazionale d'Arte Antica in Palazzo Barberini, Rome. Kermes. Restauro, conservazione e tutela del patrimonio culturale", n.105/106, Turin, Eds Helen Glanville and Claudio Seccaroni, 2017.

[37] H. Liang, Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation. Applied Physics A. 106, 309-323, 2012

[38] J. K. Delaney, M. Thoury, J. G. Zeibel, P. Ricciardi, K. M. Morales, K. A. Dooley, Visible and infrared imaging of paintings and improved reflectography. Heritage Science. 4, 6, 2016.