Des peintures des Primitifs flamands à l'impression 3D

Comment jouer avec des couches colorées translucides ?

Lionel Simonot (lionel.simonot@univ-poitiers.fr)

Institut Pprime (CNRS UPR 3346 et Université de Poitiers),
BP 30179, 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex

Avec l'invention de la peinture à l'huile au XV^e siècle, la couleur prend une autre dimension : elle se construit dans l'épaisseur de la matière picturale. En effet, le nombre de couches déposées module la clarté et la saturation de la couleur, tandis qu'un fond blanc diffusant donne l'impression d'une lumière provenant de l'arrière du tableau tel un rétro-éclairage.

Étudier la matière picturale comme un composant optique permet de simuler l'apparence d'un tableau, aide qui peut être précieuse lors d'une opération de restauration sur les couches picturales.

Cette approche est aussi à la source de procédés innovants d'impression 3D couleur s'inspirant de la technique des peintres de la Renaissance.

Les termes en gras suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire, p. 46.

© 2009 Musée du Louvre / Erich Lessing.

1. Jan van Eyck, *Le Chancelier Rolin en prière devant la Vierge* (1435, musée du Louvre). La technique de Van Eyck offre un grand réalisme dans le rendu des différents matériaux ou des carnations (couleur des chairs). Par exemple, la modulation des couleurs sur les drapés est obtenue en modifiant uniquement le nombre de couches de glacis déposées.

Une révolution technique et esthétique

L'invention de la **peinture à l'huile*** par les peintres flamands du début du XV^e siècle, tels que Van Eyck ou Van der Weyden, constitue une révolution à la fois technique et esthétique, et un

marqueur du passage à la Renaissance. Le secret technique est l'utilisation de l'huile de lin cuite comme **liant***, dans lequel les **pigments*** sont broyés. La peinture à l'huile ne « sèche » pas mais durcit au contact de l'air et de la lumière, ce qui peut parfois prendre plusieurs semaines. La technique de la peinture à

>>>

>>>

l'huile est ainsi réputée difficile. Pour la fabrication de la peinture, il faut obtenir la bonne **siccativité***, par exemple en ajoutant certaines résines comme le faisaient probablement les peintres flamands. Il faut également une maîtrise dans l'application de fines couches de peinture de plus en plus riches en huile (la règle du « gras sur maigre »), sinon il y a risque que la matière reste molle dans l'épaisseur et entraîne à terme la formation de cloques ou de craquelures. L'huile de lin a aussi eu un rôle important pour une autre innovation majeure du XV^e siècle : sans doute informé de la technique de Van Eyck mort quelques années auparavant, Gutenberg a perfectionné les encres d'impression. Comparées aux encres traditionnelles à base aqueuse, ces encres à base d'huile de lin adhèrent davantage aux caractères typographiques en métal.

D'un point de vue esthétique, la construction des couleurs est très différente des techniques utilisées auparavant comme la **tempera***, dont le liant est à base de jaune d'œuf. Des couches colorées pratiquement transparentes, appelées **glacis***, sont superposées. Ainsi, la couleur se forme dans l'épaisseur. Les couleurs les plus sombres ne sont pas obtenues en mélangeant le pigment coloré avec un pigment noir, mais en superposant un nombre plus important de couches d'un même glacis. Une analogie peut être

faite avec les vitraux. Les verriers, tout comme les peintres et les imprimeurs, appartenaient à la même confrérie de Saint-Luc. Mais si dans les vitraux la couleur se forme en transmission, les Primitifs flamands utilisaient comme **couche de préparation*** un fond blanc très diffusant pour renvoyer la lumière qui traverse ainsi au moins deux fois la couche colorée. Cette technique produit des couleurs très profondes.

La structure stratifiée la plus complexe se rencontre chez Van Eyck (fig. 1). La modulation d'une couleur est obtenue en modifiant uniquement le nombre de couches de glacis déposées. La technique se simplifie ensuite, d'une part par une réduction du nombre de couches de glacis, d'autre part par l'ajout plus important de blanc de plomb. Ce dernier peut être ajouté aux couleurs pour nuancer le modelé ou bien pour la réalisation de couches préparatoires de couleurs pâles. Par ce procédé, les modelés deviennent plus simples à réaliser mais perdent leur profondeur lumineuse. Ces simplifications s'expliquent par la nécessité pour les peintres de répondre à une demande plus importante et donc de s'affranchir de cette technique très contraignante. D'autre part, le développement des compositions narratives rendait moins nécessaire la construction par la lumière des tableaux des Primitifs flamands, représentant un univers immobile.

Quand la lumière rencontre une couche picturale

Cette maîtrise de la lumière par les peintres comme Van Eyck fascine encore aujourd'hui. Les Primitifs flamands ont réussi à rendre compte, avec un réalisme peu courant, des reflets sur des objets métalliques lustrés, le soyeux des cheveux, les effets de plis sur un tissu, la translucidité des chairs... S'ils se sont attachés à reproduire avec autant de précision les interactions de la lumière avec la matière, il n'est pas illégitime pour le chercheur d'étudier ces tableaux comme des objets optiques. La première opération consiste à répertorier tous les événements élémentaires qui peuvent se produire (fig. 2).

Effet de surface

La lumière qui arrive sur la surface d'un tableau est en partie réfléchie et en partie transmise. Le reflet a la couleur de la source de lumière qui éclaire le tableau. Une des problématiques pour l'éclairage muséographique est que le reflet ne doit pas perturber l'observation d'un tableau. Il faut pour cela choisir une direction d'éclairage qui envoie le reflet dans les jambes des visiteurs, le cas échéant en inclinant le tableau par rapport au plan du mur.

L'interface supérieure se situe entre l'air et le liant de la peinture. L'indice optique de l'huile de lin est autour de 1,5, proche de celui du verre. On parle d'ailleurs de réflexion vitreuse : le reflet est relativement peu intense en incidence normale mais devient prépondérant en incidence rasante. Par conservation de l'énergie à l'interface, c'est l'inverse qui se produit pour la transmittance.

La technique des glacis impose d'avoir des interfaces très planes, ce qui résulte en un aspect très brillant. La différence avec les techniques à liant aqueux, qui permettent au contraire d'atteindre une certaine matité, est notable.

Effet de volume

La coloration d'une couche de peinture est pour l'essentiel due à l'absorption de la lumière par la matière picturale. Pour les **laques***, telle la laque de garance souvent utilisée pour les rouges, la lumière n'est pratiquement pas diffusée dans la couche de glacis : elle se propage en ligne droite jusqu'à atteindre le support diffusant. Le flux lumineux diminue par

2. Schéma des interactions élémentaires entre la lumière et une couche de peinture constituée d'une dispersion de pigments dans un liant. La lumière qui arrive sur l'interface (i.e. la discontinuité d'indice de réfraction entre l'air et la couche de peinture) est partiellement réfléchie (1) dans la direction miroir. L'interface plane assure la brillance de la peinture. Une partie de la lumière est transmise (2) et peut interagir avec un pigment (3). La lumière est alors colorée par absorption et diffusée selon une certaine dispersion angulaire par le pigment. Si la lumière diffusée rencontre un nouveau pigment, le même mécanisme se produit (4) : c'est la diffusion multiple qui enrichit de plus en plus la couleur. La lumière peut aussi être rediffusée par la couche de préparation blanche, très diffusante (5). Finalement, la lumière perçue provient de la collection des rayons franchissant l'interface supérieure (6).

absorption avec l'épaisseur de la couche selon une loi en exponentielle décroissante (loi de Beer-Lambert-Bouguer). D'autres couches picturales sont constituées par la dispersion dans le liant de pigments inorganiques, comme l'azurite pour le bleu. À chaque fois que la lumière rencontre un grain pigmentaire, elle est en partie absorbée (et donc colorée) et en partie diffusée. Cette lumière diffusée dans toutes les directions peut rencontrer un autre pigment et ainsi de suite. Les contributions successives des diffusions multiples diminuent en intensité mais offrent une couleur plus saturée.

Couche de préparation blanche

Lorsque la lumière atteint le fond blanc opaque, elle est pratiquement entièrement renvoyée à l'intérieur de la couche. Ce comportement optique est souvent modélisé par une loi de Lambert, c'est-à-dire que la lumière est supposée être diffusée de manière égale dans toutes les directions.

Caractérisation optique d'un matériau translucide

Pour saisir le comportement optique global de la couche de peinture, il est possible de traduire chaque comportement élémentaire précédent par une probabilité et de suivre au travers de la couche le chemin d'un rayon lumineux, subissant des événements/probabilités successives. En lançant un très grand nombre de rayons, on peut remonter à la réflectance de la peinture par la méthode dite de Monte Carlo^(a).

Une autre solution est de considérer une épaisseur infinitésimale de la couche et d'y effectuer un bilan des flux lumineux (pertes par absorption et par diffusion et gain par diffusion provenant d'autres directions). Ce bilan de flux constitue l'équation de transfert radiatif dont la résolution nécessite d'imposer des conditions aux limites : la réflexion/réfraction à l'interface supérieure et la diffusion de la lumière par le fond blanc. Il existe une littérature abondante sur les façons de résoudre cette équation [1]. Comme les distributions de formes et de tailles des centres diffusants ne sont généralement pas connues, des hypothèses simplificatrices sont émises pour décrire le comportement moyen en diffusion. Souvent la diffusion latérale de la lumière à l'intérieur de la couche est négligée.

Cela permet de simuler correctement la couleur et la distribution angulaire de la lumière diffusée. Nous avons par exemple montré comment la couleur était modulée en fonction du nombre de couches de glacis déposées, atteignant pour une certaine épaisseur un maximum de saturation [2].

En revanche, sans la prise en compte de la diffusion latérale, la translucidité des

glacis ne peut être traduite. Dans ce cas, d'autres approches (associées à d'autres hypothèses) doivent être mises en place. La prise en compte de cette diffusion « sous-surfacique » a révolutionné le rendu des matériaux translucides dans les films d'animation ou les jeux vidéos [3].

La caractérisation des matériaux translucides comme les glacis pose des problèmes finalement moins de modélisation

>>>

Allègement virtuel de vernis

Le **verniss*** est la couche finale appliquée sur la plupart des peintures à l'huile. Cette couche non pigmentaire a pour rôle de protéger la matière picturale, mais aussi de raviver les couleurs d'un tableau. En effet, l'application d'un vernis offre très souvent une interface plus lisse avec l'extérieur, ce qui rend le tableau plus brillant et les couleurs plus saturées. Or, en vieillissant, des transformations physico-chimiques donnent au vernis une teinte jaune. Cette opacification peut être telle que la lisibilité du tableau devient problématique. Ainsi, l'allègement du vernis est l'une des opérations de restauration les plus fréquentes sur les peintures à l'huile. Cette opération très minutieuse, parfois accomplie à la loupe binoculaire, consiste à retirer, à l'aide de différents solvants, le vernis dans son épaisseur avant d'atteindre la matière picturale.

Dans une étude menée à la National Gallery de Washington [7], nous avons acquis des images hyperspectrales avant et après une opération d'allègement de vernis (fig. E1). Contrairement à l'imagerie couleur traditionnelle qui se décompose en trois canaux rouge, vert et bleu, l'imagerie hyperspectrale livre le spectre de réflectance en chaque pixel. Nous avons ainsi pu appliquer un modèle spectral et simuler une restauration virtuelle à partir de l'image hyperspectrale initiale. Une approche simpliste consiste à considérer la couche de vernis comme un filtre coloré jaune. Nous montrons qu'il faut prendre en compte, outre les effets d'interface, la diffusion de la lumière par le vernis. Cette dernière étant très variable selon la nature du vernis et les conditions de vieillissement, la restauration virtuelle d'un tableau ne peut être proposée sans une connaissance précise des propriétés optiques du vernis vieilli.

E1. Détail du tableau *Flowers in an urn* de J. Van Huysum (1721, National Gallery of Art de Washington).

(a) Avant restauration.

(b) Après allègement de vernis et pose d'un nouveau vernis.

(c) Après restauration « virtuelle ». Dans ce dernier cas, le modèle de prédiction est appliqué à l'image hyperspectrale du tableau, enregistrée avant restauration.

>>>

que de mesure, encore peu résolus aujourd'hui. Ainsi, la réflectance totale d'un matériau translucide est souvent sous-évaluée par les dispositifs de mesure qui, en général, ne détectent pas toute la lumière diffusée latéralement à l'intérieur du matériau. Une caractérisation plus générale de la lumière diffusée doit tenir compte de la longueur d'onde, de la polarisation, des directions d'incidence et de diffusion, mais aussi du décalage entre le point d'impact du rayon lumineux incident et le point de sortie. Il n'existe pas à ce jour de dispositif expérimental favorisant l'acquisition de cette grandeur multidimensionnelle.

Ces questions de mesure et de modélisation se posent de manière identique pour tous les matériaux translucides : le marbre, certains papiers ou plastiques, les tissus, les feuilles, des liquides comme le lait, etc. Mais c'est probablement la peau humaine qui suscite le plus d'intérêt pour les applications en dermatologie et en cosmétologie. Comment traduire avec réalisme l'effet d'un fond de teint ou d'un rouge à lèvres si l'aspect translucide de la peau et du produit cosmétique est mal pris en compte ?

Plus globalement, ces problématiques autour de l'apparence des matériaux ont donné naissance au GDR APPAMAT [4], groupement de recherche du CNRS, qui a pour vocation d'organiser et de développer la communauté scientifique, y compris des acteurs industriels, sur ce sujet pluridisciplinaire.

Références

- 1• S. Chandrasekhar, *Radiative transfer* (Dover, New York, 1960)
- 2• L. Simonot et al., "Special visual effect of art-glazes explained by the radiative transfer equation", *Appl. Opt.* **43** (2004) 2580-2587.
- 3• H.W. Jensen et al., "A Practical Model for Subsurface Light Transport" dans *Proceedings of SIGGRAPH* (2001) 511-518.
- 4• <http://gdr-appamat.cnrs.fr/>
- 5• www.nextrembrandt.com
- 6• V. Babaei et al., "Color contoning for 3D printing", *ACM Transactions on graphics* **36** (2017) 124: 1-15.
- 7• G. Trumpy et al., "Experimental study on merits of virtual cleaning of paintings with aged varnish", *Optics Express* **23** (2015) 33836-33848.

Une source d'inspiration

La reproduction en couleurs d'une peinture à l'huile est souvent décevante. Certes, une très grande résolution livre des détails parfois difficiles à distinguer lorsque l'on observe l'œuvre dans un musée. Mais là encore, c'est la translucidité qu'il est difficile d'atteindre. Cet obstacle commence à être surmonté avec le développement de l'impression 3D, ou plus exactement ici de l'impression en relief, parfois appelée 2,5D. Sur une surface plane, la tête d'impression vient, passage après passage, donner une troisième dimension à une impression classique. Des premières tentatives, assez saisissantes de réalisme, ont été effectuées. On peut citer par exemple le projet *The next Rembrandt* [5] qui a abouti, à partir

d'algorithmes, à la réalisation d'un tableau inédit à la façon de Rembrandt. La texture et la topographie ont été obtenues en impression 3D, mais avec des encres plutôt opaques. Une autre approche d'impression en relief [6], qui utilise des encres translucides mais de couleur (cyan, magenta, jaune et noir), est encore trop influencée par l'impression 2D traditionnelle. Toutefois, la technique des peintres flamands est sans aucun doute une source d'inspiration pour la réalisation de tableaux ou d'objets translucides par impression 3D. Après Rembrandt, on peut très bien imaginer qu'une machine à peindre puisse créer, tel un faussaire numérique, le prochain Van Eyck. ■

(a) Les méthodes dites de Monte-Carlo utilisent le hasard pour la résolution numérique de problèmes déterministes.

Glossaire : TECHNIQUES PICTURALES

Couche de préparation

Couche d'enduit à base de plâtre et de colle animale, utilisée pour préparer les panneaux de bois destinés à être peints. Les Primitifs flamands utilisaient une couche de préparation blanche, très diffusante et soigneusement polie.

Glacis

Fine couche colorée translucide déposée sur une précédente couche déjà sèche. Il s'agit d'une technique propre à la peinture à l'huile.

Laque

Couche de peinture colorée et transparente, constituée d'une substance organique fixée sur un matériau inorganique comme l'alun ou le sel de cobalt. Les peintres de la Renaissance utilisaient des laques rouges d'origine végétale (garance) ou animale (kermès).

Liant

Constituant de la matière picturale qui permet d'agglomérer les pigments afin de faciliter la dépose puis le séchage d'une couche de peinture.

Peinture à l'huile

Peinture dont le liant est une huile siccative dans laquelle sont dispersés les pigments.

Pigment

Constituant, organique ou inorganique, de la matière picturale qui, sous forme de poudre, est insoluble dans le liant qu'il colore.

Siccativité

Aptitude d'une couche de peinture à l'huile ou de vernis à durcir sous exposition à l'air. La siccation est un processus chimique complexe d'oxydation, différent du séchage par évaporation d'un solvant.

Tempera

Technique de peinture basée sur une émulsion. Initialement à base d'œuf, la tempera peut aussi être réalisée à partir de colle animale.

Vernis

Couche initialement incolore et transparente, appliquée sur un tableau à des fins protectrices mais aussi esthétiques. Il est généralement constitué d'une résine et d'une huile siccative.