

LA COULEUR, TRAIT D'UNION ENTRE LA SCIENCE ET L'ART

Emmanuel Durocher, Andrée Harari, Jean-Claude Bernier

D'après l'article *La chimie crée sa couleur... sur la palette du peintre* de Bernard Valeur publié dans l'ouvrage « La chimie et l'art » EDP Sciences, 2010, ISBN : 978-2-7598-0527-3

LA COULEUR D'UN OBJET

Qu'est ce qui entre en jeu dans la perception d'une couleur ? Pour bien le comprendre, il peut être utile de préciser ce qu'est la lumière blanche. C'est une lumière résultant de la superposition d'ondes électromagnétiques que nous pouvons détecter à l'aide de l'œil. Elle peut notamment être issue du Soleil, d'une lampe bien choisie ou encore de trois lampes de couleurs rouge, verte et bleu et d'égale intensité (voir la synthèse additive ci-après). Il s'agit d'une lumière polychromatique, c'est-à-dire composée de plusieurs couleurs correspondant à plusieurs ondes électromagnétiques périodiques. Il est possible de la disperser, c'est-à-dire de séparer les différentes lumières colorées monochromatiques qui la

composent. Cela peut se faire à l'aide d'un système dispersif tel qu'un prisme ou un réseau par exemple. Chacune des lumières colorées emprunte alors une direction différente (voir Figure 1).

La couleur d'une lumière est donc liée à la nature du champ électromagnétique et à la longueur d'onde associée. Elle est aussi une construction de notre cerveau (1). Lorsqu'une lumière de longueur d'onde donnée frappe la rétine, il se produit en effet une réaction par laquelle la molécule de rétinale change de conformation, entraînant une série de transformations biochimiques dont le résultat est une impulsion électrique qui est transmise au cerveau par le nerf optique. Pour la longueur d'onde 700 nm par exemple, l'interprétation par le cerveau conduit

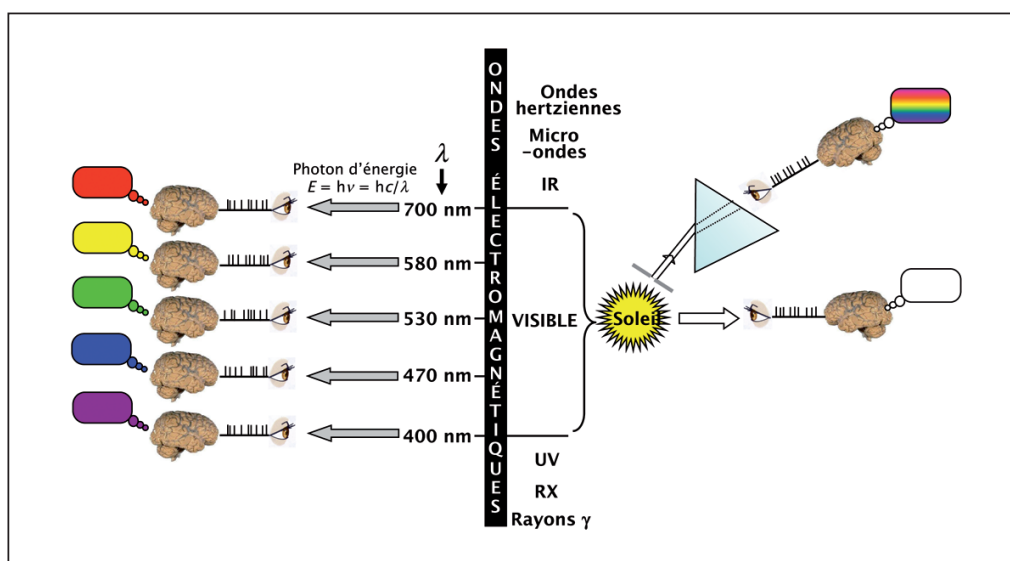


Figure 1. La lumière visible est constituée d'ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde s'étend de 400 à 700 nm. À chaque longueur d'onde correspond une sensation colorée différente. La superposition de plusieurs ondes du spectre visible (émises par le Soleil par exemple) conduit à la sensation de blanc. La lumière blanche est décomposable par un prisme qui permet de voir les couleurs composites.

à la sensation de rouge. Plus généralement, à une longueur d'onde donnée correspond une sensation de couleur. La superposition des ondes visibles que produit le soleil donne quant à elle une impression de blanc. Notons que la sensation de couleur associée à une lumière monochromatique peut aussi venir de la superposition d'ondes colorées de couleurs différentes. Par exemple, la superposition d'une lumière verte et d'une lumière rouge donne une sensation de couleur jaune. L'œil peut donc être vu comme une palette qui mélange les couleurs, comme l'avaient déjà compris les égyptiens dans l'antiquité.

Pour comprendre la perception de la couleur d'un objet, un autre point est à prendre en considération : la nature de l'objet lui-même. Éclairé en lumière blanche, un objet renvoie une partie des ondes électromagnétiques qui constituent cette lumière, et en absorbe une autre. Le spectre de la lumière renvoyée est donc constitué de celui de la lumière blanche [2] moins celui de la lumière absorbée. Par exemple, un objet bleu absorbe la plupart des ondes électromagnétiques visibles, sauf celles qui conduisent à la sensation de bleu (Figure 2). Ceci pourrait expliquer l'origine du mot « couleur ». D'un point de vue étymologique, couleur vient en effet du latin *color*, probablement rattaché au groupe de

celare qui veut dire cacher. Effectivement, la couleur appliquée sur un objet le cache en quelque sorte et au XVIII^e siècle, le mot couleur avait, au sens figuré, la signification d'apparence trompeuse.

Ainsi, trois éléments entrent en jeu dans la perception de la couleur d'un objet : la source de lumière, l'observateur et l'objet lui-même.

SYNTHÈSE ADDITIVE D'UNE LUMIÈRE COLORÉE, SYNTHÈSE SOUSTRACTIVE PAR UNE MATIÈRE COLORANTE

Les cônes, des photorécepteurs de l'œil, sont principalement sensibles dans le bleu, le vert et le rouge. C'est cette propriété physiologique de la vision humaine qui est à la base de la trichromie. Ce procédé consiste à produire toutes les couleurs par synthèse, à partir de trois couleurs convenablement choisies dont aucune ne peut être synthétisée par combinaison des deux autres : ce sont les trois couleurs primaires [3].

Pour obtenir l'ensemble des lumière colorées, on peut procéder par **synthèse additive**, c'est-à-dire par émissions de trois lumières : rouge, verte et bleu. Les principaux résultats de cette synthèse peuvent être résumés par les combinaisons suivantes. La superpo-

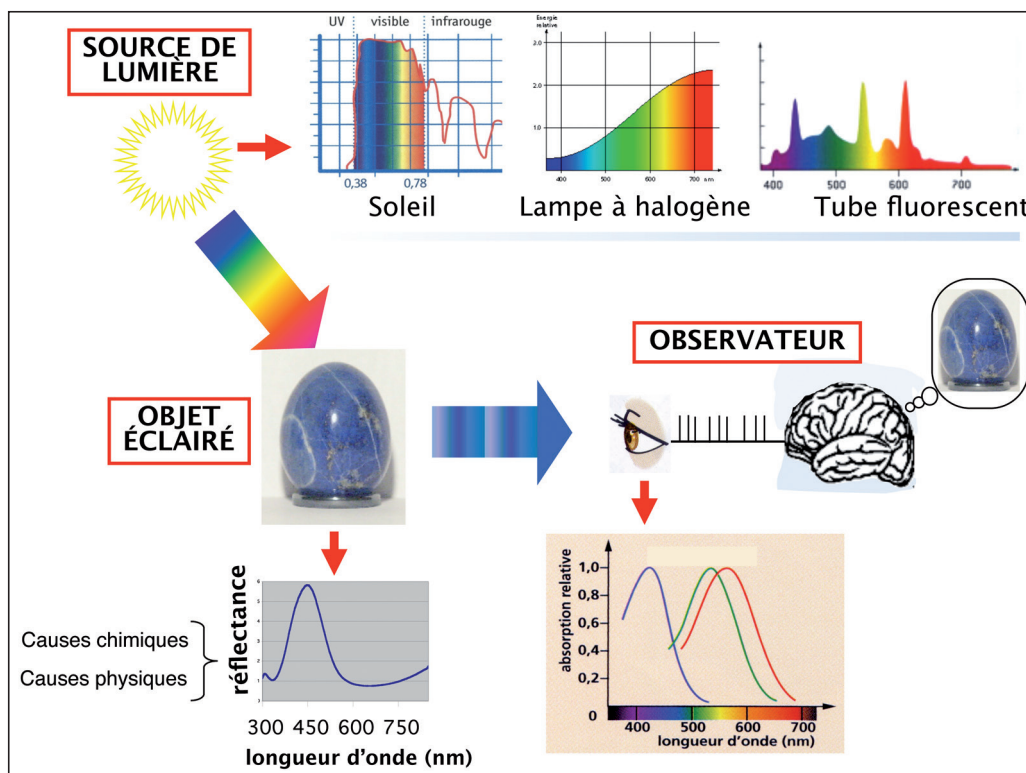


Figure 2 : Perception de la couleur d'un objet. Un objet renvoie la lumière qu'il reçoit en modifiant la composition spectrale de cette lumière pour des raisons chimiques (absorption sélective de la lumière par la matière à certaines longueurs d'onde) et physiques (réflexion et diffusion). Le cerveau reconstruit l'image avec ses couleurs à partir de la succession de potentiels d'actions déclenchés par l'impact de photons sur les photorécepteurs de la rétine qui sont de trois types [leurs domaines d'absorption sont indiqués par les courbes bleue, verte et rouge].

sition d'une lumière verte et d'une lumière rouge est perçue comme une lumière jaune par notre cerveau (vert + rouge → jaune), la superposition d'une lumière verte et d'une lumière bleue comme une lumière cyan (vert + bleu → cyan), celle d'une lumière rouge et d'une lumière bleue comme une lumière magenta (rouge + bleu → magenta). Des dosages adéquats de ces trois couleurs primaires permettent en fait de synthétiser plus de lumières colorées différentes que notre œil ne peut en distinguer.

Pour obtenir une matière d'une couleur donnée, on peut se servir de lumière blanche, celle du soleil ou d'une lampe, qui contient l'ensemble des couleurs. On utilise alors des matières colorantes, chargées d'absorber une partie de cette lumière et de n'en renvoyer qu'une autre. C'est pour cette raison que ce type de synthèse est appelé **synthèse soustractive**. Dans ce cas, trois couleurs primaires suffisent également pour obtenir toutes les couleurs, le bleu, le rouge et le jaune. Les principaux résultats de la synthèse soustractive se résument dans les équations suivantes :

bleu + rouge → violet,

bleu + jaune → vert,

rouge + jaune → orange.

Des dosages adéquats permettent d'obtenir les autres nuances.

En peinture, c'est principalement la synthèse soustractive qui est mise en œuvre par mélanges de pigments (Figure 3A). la technique du pointillisme constitue cependant une exception car elle relève plutôt de la synthèse additive : des taches



Figure 3. (A) Le tableau de Vermeer, *Jeune fille lisant une lettre* (1657-1659), illustre la synthèse soustractive de la couleur verte du rideau par mélange d'un pigment bleu (azurite) et d'un pigment jaune (jaune de plomb et d'étain). (B) Le tableau de Seurat, *Le cirque* (1891), donne un exemple de la technique du pointillisme ; la juxtaposition de taches colorées (voir détails à droite) conduit, dans une vision de loin, à une perception des couleurs par mélange optique dans l'œil. Source : (A) BPK, Berlin, Dist. RMN/Elke Estel/Hans-Peter Kluth, (B) Musée d'Orsay, Dist. RMN/Patrice Schmidt.

de couleurs sont juxtaposées, et leur taille est suffisamment petite pour que l'œil du spectateur ne puisse pas les distinguer de loin (Figure 3B). La couleur perçue résulte ainsi d'un mélange optique réalisé par l'œil.

LES PIGMENTS DU PEINTRE

En peinture, un pigment désigne une substance colorante insoluble dans le milieu qu'elle colore. Sa dispersion dans un liant donne une peinture qui peut être appliquée sur un support. Le peintre utilise des pigments depuis l'Antiquité. Le XIX^e siècle constitue cependant un tournant décisif en raison des progrès de la chimie. Les pigments peuvent être naturels ou issus de la synthèse, d'origine minérale, animale ou organique. Leur liste est longue, comme le montre le tableau de la figure 4. En voici cependant quelques-uns montrant bien le lien qui existe entre la chimie et l'art.

Les premiers pigments utilisés dès l'ère paléolithique (4) étaient issus du charbon, qu'il soit d'origine minérale, animale ou végétale (obtenu par calcination du bois ou des os par exemple). La couleur noire pouvait aussi provenir du dioxyde de manganèse. La palette des jaunes, orangés et rouges était obtenue grâce aux ocres, roches dont l'élément essentiel est le fer (Figure 5).

En Égypte antique, de nombreux pigments étaient d'origine naturelle, tel l'orpiment, un sulfure d'arsenic (As₂S₃) (5) au jaune vif imitant l'or (hautement toxique) ou le vermillon, sulfure de mercure (HgS) d'un rouge éclatant. Mais c'est sûrement dans cette région que sont nés les premiers pigments synthétiques : les fameux bleu et vert égyptiens apparus vers 2 500 av. J.-C. (Figure 6), et exportés par la suite dans tout l'empire romain.

Une propriété recherchée d'un pigment est sa capacité à renvoyer la lumière. Dans cette perspective et aussi pour imiter l'or, du XIV^e siècle au XVIII^e siècle, les peintres employaient le jaune de plomb et

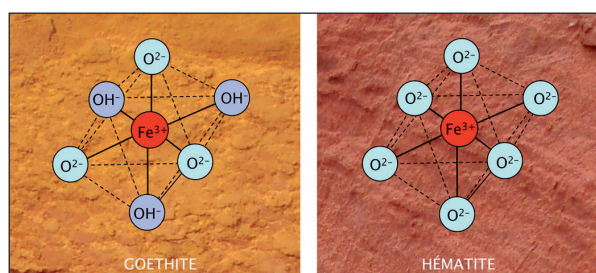


Figure 5. Les peintures pariétales découvertes dans la grotte de Lascaux I révèlent une grande richesse de pigments : charbon, oxyde de manganèse, ocres de diverses teintes (composés à base de fer).

NOM	FORMULE CHIMIQUE	Nat.	Synth.	COMMENTAIRES
Ocre jaune*	Fe_2O_3	X		Oxyde ferrique ou g�ethite.
Orpiment (jaune) *	As_2S_3	X	X	Employé par les �gyptiens. Fabriqué au Moyen âge en fondant du réalgar (AsS) et du soufre.
Jaune de plomb d'étain	Pb_2SnO_4		X	Préparé en chauffant un mélange de PbO et SnO_2 . Deux variétés cristallines différentes : type I et II.
Jaune de Naples*	$\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$		X	Employé par les verriers �gyptiens. Préparé en chauffant un mélange de PbO et Sb_2O_3 .
Jaune de cadmium	$\text{CdS} \cdot \text{ZnS}$		X	Existe en quatre nuances : citron, clair, moyen, foncé.
Ocre rouge*	FeOOH	X	X	Oxyhydroxyde de fer ou hématite. Naturel ou préparé par chauffage de la g�ethite.
Vermillon (rouge) *	HgS	X	X	Nom du minéral : cinabre. Synthétisé dès le VIII� siècle en Perse.
Minium (rouge orangé) *	Pb_3O_4		X	Obtenu dans l'Antiquité (appelé rouge de saturne) en chauffant du blanc de plomb.
Rouge de cadmium	$\text{CdS} \cdot \text{CdSe}$		X	Surtout employé pour la peinture sur porcelaine.
Laque de garance*	Colorant organique : alizarine	X	X	Extrait des racines de la garance. Fixation sur une poudre minérale blanche : pigment laqué.
Carmin de cochenille*	Colorant organique : acide carminique	X	X	Extrait d'un insecte. Pigment laqué. Passe à la lumière.
Malachite *	$\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot \text{CuCO}_3$	X	X	Pierre semi précieuse. Ne pas confondre avec le vert de malachite qui est un composé organique.
Vert-de-gris*	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot [\text{Cu}(\text{OH})_2]_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		X	Acétate basique de cuivre. Ne pas confondre avec le carbonate hydraté de cuivre qui se forme sur le cuivre en milieu humide.
Vert Véronèse	$3 \text{Cu}(\text{AsO}_2) \cdot \text{Cu}(\text{CH}_3\text{CO}_2)_2$		X	Du nom du peintre italien Véronèse (Paolo Caliari) n� à Vérone en 1528.
Vert oxyde de chrome	Cr_2O_3	X	X	Préparé par réaction de l'acide borique avec le bichromate de potassium. Diff�rent du vert de chrome.
Vert �meraude	$\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$		X	Obtenu par hydratation du vert oxyde de chrome.
Vert de chrome	$\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3 + \text{PbCrO}_4 \cdot \text{PbSO}_4$		X	Mélange de bleu de Prusse et de jaune de chrome. Principe des verts anglais.

Figure 4. Principaux pigments d'origine naturelle et/ou synthétique employés en peinture. Les pigments contenant de l'arsenic, du plomb, du cadmium ou du chrome présentent une toxicité plus ou moins grande.

d'étain. Ce pigment est plus précisément du stannate de plomb (Pb_2SnO_4) et il est par exemple mis en œuvre dans le tableau « Le baptême du Christ » (Figure 7), du Greco. Il est employé pour des effets de lumière dans le ciel, en association avec du lapis-lazuli et du blanc de plomb pour le fond. Ce pigment jaune a la particularité de posséder un indice de réfraction élevé (2,3 – très proche du diamant). Ainsi, un rayon lumineux pénétrant dans un cristal de ce pigment a de fortes chances de subir une réflexion totale. C'est cette propriété optique qui confère au tableau son aspect lumineux. Dans le tableau de Greco, cet aspect est de plus renforcé par l'utilisation d'une sous couche de blanc de plomb (6), chargée de

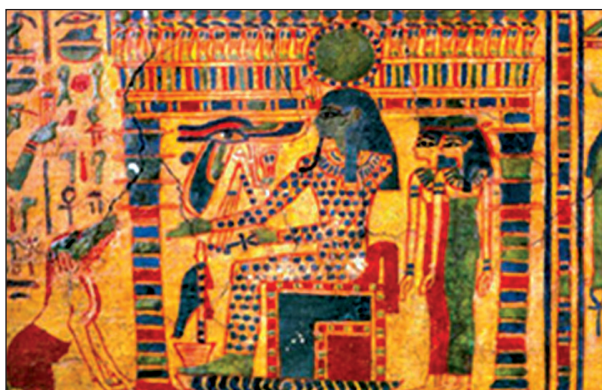


Figure 6. Les pigments bleu et vert égyptiens sont très présents sur la tombe de Tanéthéréret (18^e dynastie, 1552-1306 av. J.-C.).



Figure 7. Le Baptême du Christ, Le Greco, 1567. Parmi les pigments employés, figure le jaune de plomb et d'étain. Source : Springer Science + Business edia : Applied Physics A, Daniilia S. (2008) 90(3).

renvoyer les rayons lumineux ayant éventuellement traversé le pigment jaune. Ce pigment blanc est un carbonate basique de plomb ($[(\text{PbCO}_3)_2, \text{Pb}(\text{OH})_2]$) qui possède lui aussi un indice de réfraction élevé (2,1). Cela lui donne un aspect lumineux et lui confère un fort pouvoir couvrant. C'est pour cette raison qu'il fut le principal pigment blanc employé depuis l'Antiquité jusqu'au milieu du XIX^e siècle (Figure 8). Son procédé de fabrication remonte à l'époque romaine : des feuilles de plomb étaient exposées pendant plusieurs semaines à des vapeurs de vinaigre (acide acétique) dans un récipient en argile. L'acétate de plomb ainsi obtenu était transformé en carbonate par réaction avec du dioxyde de carbone (CO_2) provenant par exemple du fumier. La croûte de blanc de plomb était séparée du métal non réagi, puis broyée et lavée. Il a cependant l'inconvénient de noircir en présence de polluants industriels, car il se transforme en sulfure de plomb noir. Il est de plus extrêmement toxique. Il fut donc remplacé à partir de la fin du XVIII^e siècle par le blanc de zinc, constitué d'oxyde de zinc (ZnO) et très utilisé par Van Gogh, puis par le blanc de titane, constitué d'oxyde de titane TiO_2 apparu en 1919. En raison de son indice de réfraction exceptionnellement élevé (environ 2,6), ce dernier est le plus diffusant de tous les pigments blancs et c'est donc lui qui donne le blanc le plus lumineux.

La famille des pigments bleus est peut-être celle qui a le plus bénéficié des apports de la chimie. Le cas



Figure 8. Dans le tableau de Watteau, Pierrot (1718-1719), le blanc de plomb est présent en abondance. Source : RMN/Jean-Gilles Berizzi.

du bleu outremer est particulièrement intéressant. Il a en effet fallu attendre 1828 pour qu'il soit enfin synthétisé et les années 1960-70 pour que son origine soit parfaitement comprise. Auparavant, il était extrait d'une pierre semi-précieuse importée d'Afghanistan : le lapis-lazuli. Le procédé d'extraction était long, difficile et d'un coût exorbitant : plus élevé que l'or ! On dit même que Michel-Ange n'avait pas les moyens de se le procurer. Un tel coût explique pourquoi ce pigment était principalement réservé à la peinture de scènes religieuses dans les enluminures du Moyen Âge (Figure 9). C'est grâce aux progrès de la chimie de la fin du XVIII^e siècle en matière d'analyse et de synthèse qu'il a enfin pu être synthétisé à moindre coût. D'autres pigments bleus synthétiques (7) sont très utilisés, comme



Figure 9. Le bleu outremer, extrait du lapis-lazuli, figurait en bonne place sur la palette du peintre du Moyen Âge pour la réalisation des enluminures comme sur ce missel à l'usage de Nantes [milieu du XV^e siècle].

le bleu de cobalt et le bleu de Prusse, employés par Pablo Picasso lors de sa « période bleue ». Le français Yves Klein peignit quant à lui des œuvres monochromes dans les années 1950-60 avec son pigment IKB (International Klein Blue) qui l'a rendu célèbre (Figure 10). La formule de ce bleu Klein, a été mise au point avec un jeune chimiste, Édouard Adam : le liant n'est ni de l'huile, ni de l'eau, mais une résine appelée Rhodopas, qui se rétracte en séchant et laisse apparaître le pigment sans lui donner un aspect jauni comme le ferait l'huile de lin.

Les pigments évoqués jusqu'ici sont des pigments minéraux, qui tirent leur couleur de la présence d'impuretés sous forme d'ions de métaux de transition (Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu...). Ces derniers sont responsables de l'absorption d'ondes électromagnétiques dans le domaine du visible. Les colorants organiques tirent quant à eux leur couleur de la présence de liaisons conjuguées dans leur structure chimique, c'est-à-dire de l'alternance de liaisons simples et de liaisons doubles, comme il en existe dans les cycles carbonés ou noyaux aromatiques.



Figure 10. Anthropométrie de l'époque bleue (1960), Yves Klein. Source : ADAGP. Paris, musée national d'Art moderne – Centre Georges Pompidou, Dist. RMN/A. Rzepka.

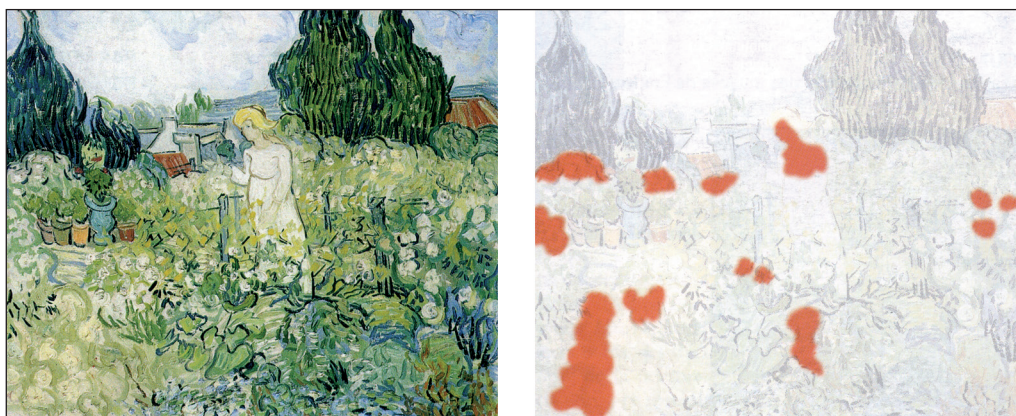


Figure 11. [A] Tableau de Van Gogh, Mademoiselle Gachet au jardin (1890). [B] L'analyse chimique de micro-prélèvements a permis de repérer les zones qui se sont décolorées au cours du temps, en raison de la mauvaise stabilité à la lumière de la laque géranium (Travaux de Jean-Paul Rioux réalisés au C2RMF).

Ces liaisons forment des nuages électroniques particuliers, susceptibles d'absorber des ondes électromagnétiques dans le domaine du visible, là où les autres liaisons chimiques organiques absorbent plutôt dans l'infrarouge. Pour transformer les colorants organiques en pigments et ainsi faciliter leur application sur un support, on peut les fixer sur une poudre minérale blanche. Ils sont d'origine animale, végétale ou synthétique (8) et servent à la fabrication de laques comme la laque de garance rouge ou rose, employée dès l'antiquité, le carmin de cochenille extrait de l'insecte du même nom et utilisé par Michel-Ange. Mais la plupart des colorants organiques sont instables à la lumière : c'est notamment le cas de la laque « géranium » employée par Vincent Van Gogh au début des années 1890. La figure 11 montre la décoloration de certaines zones de son tableau Mademoiselle Gachet au jardin : la couleur de la robe, du visage et des fleurs s'est affadie. La peinture est donc affaire de pigments. Le peintre utilise cependant d'autres ingrédients :

de l'eau ou de l'huile comme liant, un diluant ou un dispersant... Il devient alors un véritable alchimiste de la lumière (cf. fiche « Le peintre, alchimiste de la couleur »).

POUR EN SAVOIR PLUS

- (1) Le cerveau et les neurones (vidéo)
<http://www.mediachimie.org/node/2011>
- (2) Lumière et couleurs
<http://www.mediachimie.org/node/968>
- (3) La chimie s'invite dans la guerre des télévisions
<http://www.mediachimie.org/node/1689>
- (4) Peintures rupestres à conserver (vidéo)
<http://www.mediachimie.org/node/615>
- (5) Chimie et poisons
<http://www.mediachimie.org/node/671>
- (6) Même les pharaons se maquillaient
<http://www.mediachimie.org/node/2019>
- (7) La synthèse de l'indigo (vidéo)
<http://www.mediachimie.org/node/1944>
- (8) Les additifs alimentaires
<http://www.mediachimie.org/node/1004>

Jean-Claude Bernier, professeur émérite de l'Université de Strasbourg, ancien directeur scientifique des sciences chimiques du CNRS

Emmanuel Durocher, professeur de physique-chimie, formateur dans l'académie de Créteil

Andrée Harari, ingénieur ENSCP, directeur de recherches honoraire au CNRS, spécialité de recherches : science des matériaux

Grégory Syoën, professeur agrégé, chef de projet Mediachimie-Fondation de la maison de la chimie