

La genèse des couleurs, un dialogue entre lumière et matière

Bernard Valeur

Résumé Les phénomènes à l'origine des couleurs que nous percevons sont très variés. Les couleurs résultent de divers types d'interaction de la lumière avec la matière ; dans certains cas, la matière elle-même se fait source de lumières colorées. Après un rappel sur la perception des couleurs, l'objectif de cet article est de dégager les éléments essentiels de ce dialogue entre lumière et matière en distinguant les couleurs qui sont intimement liées à la nature chimique des objets (pigments, colorants, matériaux luminescents) et celles qui ne le sont pas (couleurs par dispersion, diffusion, interférences, diffraction).

Mots-clés **Couleur, vision, pigments, colorants, luminescence, enseignement, JIREC 2014.**

Abstract **The genesis of colours: a dialogue between light and matter**
The phenomena responsible for the colours we perceive are very diverse. Colours arise from various types of interaction between light and matter; in some cases, matter itself is a source of coloured light. After recalling the basis of colour vision, the aim of the present paper is to identify the salient features of this dialogue between light and matter, distinguishing between the colours that are closely related to the chemical nature of the objects (pigments, dyes, luminescent materials) and those that are not (colours by dispersion, scattering, interferences, diffraction).

Keywords **Colour, vision, pigments, dyes, luminescence, teaching, JIREC 2014.**

Nous vivons dans un monde en couleurs [1]. Minéraux, végétaux, animaux sont d'une extraordinaire diversité de teintes et de nuances qui ne cessent de nous émerveiller. Arc-en-ciel et aurores polaires sont des spectacles hauts en couleurs que nous offre la Nature. Bien d'autres couleurs que nous côtoyons dans notre vie quotidienne sont intimement liées à l'essor des développements technologiques. Elles en sont au moins un outil quand ce n'est pas l'objet même. Prenons quelques exemples : les écrans couleurs (téléviseurs, ordinateurs, téléphones portables et tablettes), l'impression par quadrichromie de photos, de magazines et de livres, la photographie (argentique ou numérique), l'éclairage et la signalisation, les colorants et les procédés de teinture, les pigments et les techniques de peinture, les cosmétiques, etc. Les couleurs jouent également un rôle essentiel dans les arts.

Toutes ces couleurs, nous les percevons, nous les utilisons sans que nous connaissions toujours d'emblée la façon dont elles sont produites. Les phénomènes à l'origine des couleurs sont très variés [1-4] et l'objet de cet article est de les classer et de les expliciter en gardant à l'esprit qu'il n'y a pas de couleur sans lumière et que les couleurs n'existeraient pas non plus sans la matière : ces dernières résultent en effet de l'interaction des ondes lumineuses avec les objets, quand ce n'est pas la matière elle-même qui se fait source de lumière colorée.

Les couleurs naissent dans notre cerveau

Il est important de souligner que les couleurs n'existent que dans notre cerveau [5]. De fait, elles n'ont pas de réalité matérielle car la couleur est une sensation. Il n'y a pas de couleur sans lumière et il faut rappeler que la lumière visible par notre œil n'est qu'une toute petite partie des ondes

électromagnétiques, celles dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 700 nm environ. Que se passe-t-il lorsqu'un photon d'énergie correspondant à la longueur d'onde de 530 nm, par exemple, frappe la rétine de notre œil ? Le premier acte de la vision est photochimique. L'absorption de ce photon par un photorécepteur de la rétine provoque un changement de configuration du rétinale, molécule située dans une protéine appelée opsine, et cette photoisomérisation déclenche toute une série de réactions biochimiques dont le résultat final est la création d'une impulsion électrique, appelée potentiel d'action, qui est transmise au cerveau *via* le nerf optique. L'interprétation par le cerveau de la succession d'impulsions provenant des photorécepteurs de la rétine *via* les cellules ganglionnaires et bipolaires est une sensation de vert pour 530 nm. Aux diverses longueurs d'ondes du domaine visible correspondent différentes couleurs, celles que l'on perçoit lorsqu'on décompose la lumière blanche par un prisme (communément appelées couleurs de l'arc-en-ciel). Précisons que les sensations colorées que nous éprouvons sont propres à l'espèce humaine. Certains animaux voient dans l'ultraviolet ou dans l'infrarouge, contrairement à nous.

Les photorécepteurs de la rétine humaine sont d'une part les bâtonnets qui fonctionnent à faible luminosité mais ne produisent aucune sensation colorée, et les cônes qui sont de trois types et dont les domaines de sensibilité sont larges et se chevauchent (voir *figure 1*). Le cerveau procède donc par comparaison des signaux provenant des trois types de cônes pour reconstruire une image en couleur de ce qui se trouve dans le champ visuel. Les cônes ne fonctionnent qu'à luminosité suffisamment élevée, à la lumière du jour typiquement. Dans la pénombre, les bâtonnets prennent le relais mais ne donnent qu'une image en niveaux de gris, d'où l'expression « *La nuit, tous les chats sont gris* ». Preuve que les couleurs ne sont pas des propriétés des objets. Pas

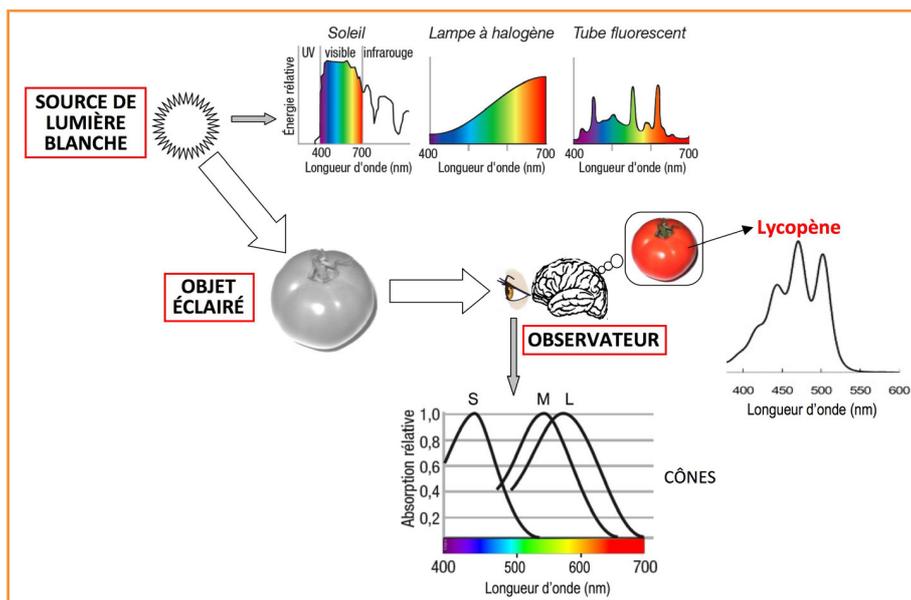


Figure 1 - La perception de la couleur d'un objet fait intervenir trois éléments : la source de lumière, l'objet, et l'observateur. La rétine de l'œil possède trois types de cônes S, M et L responsables de la sensation colorée. La vision humaine est donc trichromatique.

plus que les couleurs ne sont des propriétés des ondes électromagnétiques.

À une longueur d'onde donnée, correspond une couleur, mais cette relation n'est pas biunivoque. Prenons l'exemple de la sensation de jaune. Elle peut provenir d'une lumière aux environs de 580 nm, mais elle peut également résulter de la perception simultanée d'une lumière à 700 nm et d'une lumière à 530 nm qui donneraient séparément des sensations de rouge et de vert. C'est ainsi que le jaune est produit sur un écran couleur, par exemple. Nous avons également une sensation de jaune quand le spectre de la lumière visible est amputé des longueurs d'onde correspondant au violet et au bleu. Lorsque toutes les longueurs d'onde du spectre visible sont présentes (c'est le cas de la lumière du Soleil par exemple), nous avons une sensation de blanc. Mais il ne faut pas s'y tromper, en regardant à travers un prisme, on voit toutes les couleurs de l'arc-en-ciel. L'œil est donc la palette qui mélange les couleurs, comme l'avaient déjà compris les Égyptiens.

Les couleurs résultant des interactions lumière-matière

La trilogie de la couleur des objets

Si un objet éclairé en lumière blanche nous apparaît coloré, c'est parce que certaines longueurs d'onde de la lumière incidente ne sont plus présentes dans la lumière renvoyée par l'objet du fait des interactions de la lumière avec la matière de cet objet. C'est le cas d'un objet qui contient des molécules (colorants ou pigments) absorbant la lumière dans un certain domaine de longueurs d'onde, ou bien d'un objet qui possède une structure telle que des phénomènes physiques renforcent l'intensité lumineuse à certaines longueurs d'onde au détriment d'autres (comme dans le phénomène d'interférences).

Trois éléments entrent en jeu dans la perception de la couleur d'un objet : la source de lumière, l'objet et l'observateur (figure 1). Toute source de lumière est caractérisée par son spectre qui représente les variations de l'intensité

lumineuse en fonction de la longueur d'onde. Ce spectre est différent selon qu'il s'agit du Soleil, d'une lampe à halogène ou d'un tube fluorescent. C'est pourquoi les couleurs des objets n'apparaissent pas exactement les mêmes selon la lumière blanche qui l'éclaire. L'objet renvoie cette lumière incidente en modifiant le spectre de celle-ci. La lumière renvoyée est caractérisée par le spectre de réflectance. Le troisième élément est l'observateur (son œil et son cerveau).

Les couleurs liées à la nature chimique

Prenons par exemple une tomate. Elle apparaît rouge à un observateur parce qu'elle absorbe toutes les longueurs d'onde de la lumière incidente sauf celles qui correspondent au rouge. C'est un pigment, le lycopène, qui est responsable de cette absorption (voir son spectre sur la figure 1). Et ce sont les chlorophylles qui sont responsables de la couleur verte des feuilles

car elles absorbent très peu la lumière dans un domaine de longueurs d'onde correspondant au vert. Comme ce sont des composés chimiques qui sont ici à l'origine de la couleur, on parle de *couleur chimique*, dénomination qu'il faut considérer comme un raccourci de *couleur liée à la nature chimique*. Nous reviendrons plus loin sur cette question de dénomination.

Les composés organiques qui apparaissent colorés comportent des doubles liaisons conjuguées ou des cycles aromatiques, ou encore des hétérocycles. La délocalisation des électrons π est à l'origine de transitions électroniques se situant dans le domaine du visible (transitions $\pi-\pi^*$). Les électrons n de paires non liantes (sur des atomes d'azote en particulier) peuvent être également impliqués (transitions $n-\pi^*$). Ces transitions sont mises en jeu dans l'absorption de la lumière à certaines longueurs d'onde, ce qui confère des couleurs. Ainsi, les spectroscopistes donnent à ces composés le nom de *chromophore* (du grec *chroma*, « la

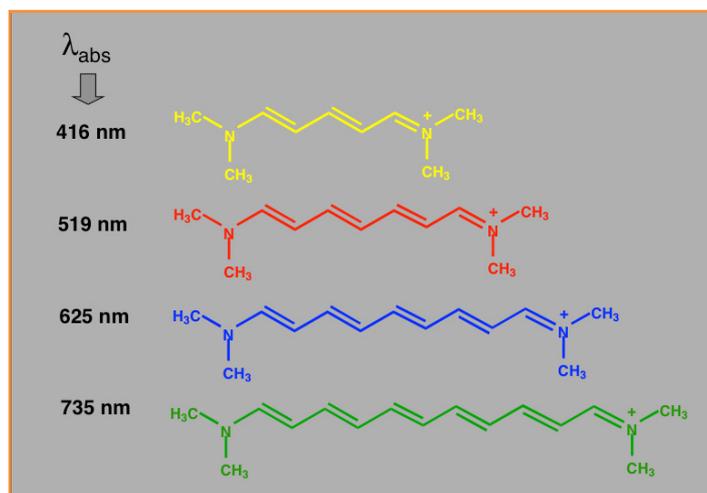


Figure 2 - Formules chimiques et couleurs des cyanines. La longueur d'onde du maximum d'absorption (indiquée à gauche) augmente avec le nombre de doubles liaisons conjuguées, d'où une variation importante de la couleur du composé.

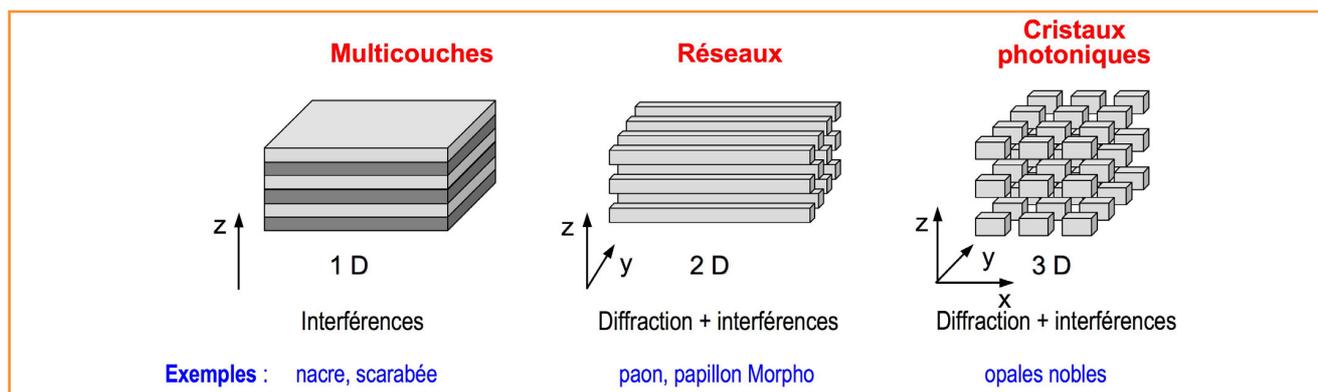


Figure 3 - Structures périodiques à une dimension (multicouches), deux dimensions (réseaux) et trois dimensions (cristaux photoniques) donnant lieu à des couleurs interférentielles. Dans le cas des structures périodiques à deux et trois dimensions, il y a diffraction de la lumière.

couleur », et *phorein*, « porter »). La famille des cyanines illustre bien le fait que plus la conjugaison est importante, plus le spectre d'absorption est déplacé vers les grandes longueurs d'onde (figure 2).

Les composés inorganiques offrent également des couleurs très variées [6]. On peut les classer en quatre catégories selon les phénomènes mis en jeu : l'absorption par des ions métalliques (principalement les métaux de transition), les transferts de charge (oxygène – ion métallique) et ion métallique – ion métallique), les centres colorés (anomalies de l'arrangement cristallin) et l'absorption de la lumière par le cristal dans son ensemble (théorie des bandes).

Parmi les matières colorantes [7-11], on distingue les colorants et les pigments. Les colorants sont des composés organiques qui présentent une affinité pour le substrat sur lequel ils sont appliqués. Souvent solubles dans l'eau, ils sont employés sous forme de solution aqueuse. Les pigments sont, quant à eux, des composés minéraux ou organiques insolubles dans le milieu où ils sont dispersés. Ils ne sont pas affectés physiquement ou chimiquement par ce milieu.

Les couleurs dites « physiques »

Lorsque les couleurs d'un objet ne sont pas dues à l'absorption de la lumière par des pigments ou des colorants, mais résultent de phénomènes physiques, elles sont généralement qualifiées de *couleurs physiques*. Ces phénomènes [2] sont les suivants :

- la *dispersion* de la lumière par réfraction (ex. : dispersion par un prisme, arc-en-ciel) ;
- la *diffusion* de la lumière par un ensemble de particules de petite taille : diffusion Rayleigh si la taille des particules est inférieure au dixième de la longueur d'onde (ex. : couleur bleue du ciel), et diffusion de Mie pour des particules plus grosses (ex. : couleur blanche du lait et des nuages) ;
- les *interférences* (avec ou sans *diffraction*) lorsqu'un objet présente une structure dont au moins une dimension est de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde de la lumière.

La Nature foisonne de ce dernier type de couleurs appelées *couleurs interférentielles* ou *couleurs structurales* [2, 12], dont la caractéristique importante est de dépendre de l'angle d'incidence de la lumière et de l'angle d'observation : on parle dans ce cas d'iridescence. Il convient de distinguer les couches minces (ex. : bulle de savon, film d'huile sur l'eau) et les objets qui possèdent une périodicité structurale

à une, deux ou trois dimensions à l'échelle de la longueur d'onde (figure 3).

Les verres dopés avec des nanoparticules métalliques : couleur physique et/ou chimique ?

Examinons maintenant un cas particulier très intéressant : le verre rubis qui doit son nom à sa couleur rouge due à l'inclusion de nanoparticules d'or qui absorbent la lumière sauf dans le rouge [13]. Le phénomène responsable de l'absorption est physique : les ondes électromagnétiques qui constituent la lumière provoquent une oscillation collective des électrons à la surface du métal ; il s'agit de *plasmons de surface*. Il est toutefois difficile de parler ici strictement de couleur physique car la couleur observée dépend de la nature chimique du métal. En effet, elle n'est pas la même pour des nanoparticules d'or, d'argent ou de cuivre. Peut-on dire alors qu'il s'agit à la fois d'une couleur physique et d'une couleur chimique ? Ce vocabulaire n'est guère satisfaisant. Comment résoudre cette difficulté ?

Il convient de remarquer que l'absorption de la lumière par un pigment ou un colorant n'est pas un phénomène chimique : il s'agit de l'absorption d'un photon qui fait passer une molécule de l'état fondamental à un état excité par promotion d'un électron dans une orbitale d'énergie supérieure [14]. Ce phénomène relève de la physique quantique. Aussi est-il préférable de parler de *couleurs par absorption* (figure 4). De même que, au lieu de parler de couleurs physiques, il serait préférable d'employer les termes de *couleurs par dispersion*, *couleurs par diffusion* et *couleurs interférentielles*.

Les émissions de lumières colorées : l'incandescence et la luminescence

L'autre grande classe de couleurs concerne les émissions de lumières que nous percevons colorées. Deux types de phénomènes en sont responsables : l'*incandescence* et la *luminescence* [15]. L'incandescence est l'émission de lumière par les corps portés à haute température. Les couleurs observées dépendent très peu de la nature du corps, mais essentiellement de la température. Au contraire, les divers types de luminescence sont des émissions de lumière qui ne résultent pas d'une augmentation de température, d'où l'appellation fréquente de *lumière froide* par opposition à l'incandescence, qualifiée de *lumière chaude*. Contrairement à l'incandescence, la luminescence dépend de la nature de la substance émettrice.



Figure 4 - Les couleurs proviennent soit d'une interaction de la lumière avec la matière (couleurs par absorption, couleurs physiques), soit d'une émission de lumière colorée (incandescence, luminescence). Certaines couleurs sont liées à la nature chimique (partie droite), d'autres non (partie gauche).

Les couleurs de l'incandescence

Les couleurs des corps incandescents vont du rouge au bleu en passant par l'orangé, le jaune et le blanc selon la température (voir les photos d'illustrations sur la figure 4) : vers 700 °C, la couleur est rouge, puis devient jaune-orangé vers 1 500 °C ; à partir de 2 000 °C, le corps produit une lumière presque blanche, et au-delà de 7 000 °C, la couleur est d'un blanc de plus en plus bleuté (figure 5).

Cette évolution de la couleur avec la température s'explique grâce au concept de « corps noir » dont les lois de l'émission ont été établies à la fin du XIX^e siècle. Quand la température augmente, le maximum du spectre de la lumière émise – qui est continu – se déplace vers le bleu et l'intensité lumineuse croît. La relation entre la couleur perçue et la température a conduit à la notion de *température de couleur* qui caractérise la *chromaticité* du rayonnement émis par une source. La température de couleur est importante dans le domaine de l'éclairage car elle permet de distinguer les diverses sources de lumière blanche. Attention, un blanc dit « chaud » (lampe à incandescence par exemple) correspond à une température de couleur inférieure à celle d'un blanc dit « froid » ! Rien à voir avec les couleurs chaudes et les couleurs froides qui sont des notions purement subjectives non quantifiables !

Les couleurs de la luminescence

Quand les atomes ou les molécules constitutives d'une substance ont absorbé de l'énergie (on dit qu'ils sont portés

dans un état « excité »), le surplus d'énergie ainsi acquis est dans certains cas rétrocedé sous forme de lumière appelée *luminescence*. Il existe divers types de luminescence qui se distinguent par la façon dont l'énergie est fournie aux atomes ou aux molécules [15] : photoluminescence, électroluminescence, chimiluminescence, bioluminescence, cathodoluminescence, etc. Nous nous limiterons aux deux premières qui sont les formes de luminescence les plus importantes au plan pratique.

La photoluminescence est une émission de lumière consécutive à une absorption de lumière. On distingue deux types : la *fluorescence* et la *phosphorescence* [16-17]. Dans le cas de la fluorescence, les espèces excitées reviennent très rapidement à leur état d'énergie original, tandis que dans celui de la phosphorescence, les espèces excitées transitent par un état d'énergie intermédiaire (état triplet pour les molécules organiques), où elles restent un certain temps avant de retourner à leur état fondamental.

La très grande majorité des substances fluorescentes employées dans la pratique sont des composés organiques dont les plus connus sont la fluoescéine, les rhodamines, les coumarines et les acridines. Une substance fluorescente éclairée par une lumière blanche apparaît d'une couleur particulièrement lumineuse car la couleur de la lumière émise par fluorescence se superpose à la couleur par absorption. On parle couramment de « couleurs fluo ». La fluorescence intervient bien souvent dans la vie quotidienne : les surligneurs, les vêtements fluo, les gilets de sécurité, les peintures fluorescentes pour la décoration, les cosmétiques fluo et divers objets [1, 15].

En biologie, une des applications importantes de la fluorescence est l'imagerie multicolore du vivant qui a



Figure 6 - Photoluminescence de nanocristaux semi-conducteurs (quantum dots) éclairés par une lampe ultraviolette. Ils sont constitués de sélénure de cadmium de différentes tailles allant de 1 nm (violet) à 4 nm (rouge) avec une coque protectrice en sulfure de zinc (Aldrich).



Figure 5 - La couleur d'un corps incandescent est directement liée à la température, que l'on dénomme, de ce fait, *température de couleur*. Il s'agit d'une température absolue exprimée en kelvins (K).



Figure 7 - Les LED produisent des lumières colorées qui dépendent de la nature du semi-conducteur (www.minioneon.com).

connu deux révolutions vers la fin du XX^e siècle avec l'avènement des protéines fluorescentes [18] et des nanocristaux semi-conducteurs [19] (figure 6).

Quant à l'électroluminescence, ce phénomène est une émission de lumière résultant de l'application d'un champ électrique à un gaz ou un solide [20]. Cette émission est mise en œuvre dans la pratique pour créer des sources lumineuses, à des fins d'éclairage ou de visualisation. En particulier, les LED (diodes électroluminescentes) ont envahi notre quotidien. La couleur de la lumière émise dépend de la nature du semi-conducteur employé (figure 7).

Certains composés organiques peuvent avoir également un comportement de semi-conducteur et donner ainsi lieu au phénomène d'électroluminescence. Ils entrent dans la constitution des OLED (« organic light emitting diodes ») qui offrent notamment la possibilité de fabriquer des écrans très lumineux car émissifs par eux-mêmes, tandis que les écrans à cristaux liquides (LCD) nécessitent, quant à eux, un éclairage par l'arrière.

En résumé, la figure 4 rassemble tous les phénomènes à l'origine des couleurs en distinguant d'une part les couleurs qui résultent d'une interaction lumière-matière et les

émissions de lumières colorées, et d'autre part les couleurs qui sont liées à la nature chimique et celles qui ne le sont pas.

Références

- [1] Valeur B., *La couleur dans tous ses éclats*, Belin, 2011.
- [2] Elias M., Lafait J. (dir.), *La Couleur. Lumière, vision et matériaux*, Belin, 2006.
- [3] Zuppiroli L., Bussac M.-N., *Traité des couleurs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011 (nouvelle éd.).
- [4] Nassau K., *The physics and chemistry of color. The fifteen causes of color*, John Wiley & Sons, 2001.
- [5] Imbert M., *ibid* [2], p. 18-34.
- [6] Maccaudière P., Demourgues A., La couleur dans les solides minéraux, *L'Act. Chim.*, 2002, 251, p. 91.
- [7] Wyart D., Colorants et pigments, *Techniques de l'Ingénieur*, 2010, AM 3 234v2.
- [8] Delamare F., Guineau B., *Les matériaux de la couleur*, Découvertes Gallimard, Sciences et Techniques, Gallimard, 1999.
- [9] Cardon D., *Le monde des teintures naturelles*, Belin, 2003.
- [10] Perego F., *Dictionnaire des matériaux du peintre*, Belin, 2005.
- [11] Valeur B., La chimie crée sa couleur... sur la palette du peintre, dans *La chimie et l'art : le génie au service de l'homme*, M.-T. Dinh-Audouin, R.A. Jacquesy, D. Olivier, P. Rigny (coord.), EDP Sciences, Collection L'Actualité Chimique-Livres, 2010, p. 129-167.
- [12] Berthier S., *Iridescences*, Springer, 2003.
- [13] Terrien C., Approche théorique de la coloration du verre rubis à l'or, *Le Bup*, 2008, 902, p. 317.
- [14] Jacquemin D., Daniel C., Molécules et lumière : une histoire d'électrons, *L'Act. Chim.*, 2014, 382-383, p. 93.
- [15] Valeur B., *Lumière et luminescence*, Belin, 2005.
- [16] Valeur B., *Invitation à la fluorescence moléculaire*, De Boeck, 2004.
- [17] Valeur B., Berberan-Santos M.N., *Molecular Fluorescence. Principles and Applications*, Wiley-VCH, 2012 (2nd ed.).
- [18] Tsieng R.Y., Constructing and exploiting the fluorescent protein paintbox (Nobel Lecture), *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2009, 48, p. 5612.
- [19] Resch-Genger U., Grabolle M., Cavaliere-Jaricot S., Nitschke R., Nann T., Quantum dots versus organic dyes as fluorescent labels, *Nat. Methods*, 2008, 5, p. 763.
- [20] Le Barny P., L'électroluminescence, *L'Act. Chim.*, 2002, 251, p. 102.

Bibliographie complémentaire

- La couleur, *Dossier Pour la Science* n° 27, avril 2000.
- La science des couleurs, *TDC* n° 922, oct. 2006.
- *Lumière sur la couleur* (collectif), Éditions de Monza, 2010.



Bernard Valeur

est professeur émérite au Conservatoire national des arts et métiers*.

* Département CASER, CNAM, 292 rue Saint-Martin, F-75141 Paris Cedex 03.

Courriel : bernard.valeur@cnam.fr

<http://culturesciences.chimie.ens.fr>

Le site CultureSciences-Chimie est conçu pour assurer une formation scientifique de haut niveau, accessible à tout utilisateur, en particulier aux enseignants.

Ce site constitue un centre de ressources pour enseigner la chimie, en lien direct avec l'avancement des connaissances au sein des laboratoires de recherche.

Alors vite à vos souris !