

## Vision et mesure de la couleur

### 1. INTRODUCTION

La couleur d'une couche picturale est sans doute sa caractéristique essentielle. C'est également la plus négligée. Bizarrerie peut-être, mais qui n'est en fait que l'un des aspects du désintérêt général que nous portons aux couleurs.

Nous vivons dans un monde coloré, et nous choisissons avec soin les couleurs dans lesquelles nous vivons, celles qui nous habillent. Notre éducation nous porte à n'y voir que la manifestation d'un sens artistique, par essence même, de nature irrationnelle. Rien ne nous prépare à aborder rationnellement le monde des couleurs. Malgré la qualité et le nombre des savants qui ont étudié la couleur, la physique couramment enseignée ne fait qu'effleurer ce domaine, dans lequel les progrès ont été, d'ailleurs, fort lents. Ceux-ci ne se sont accélérés que sous la pression des industries de la couleur, c'est-à-dire non seulement des industries chimiques fabriquant les colorants et les pigments, mais aussi des industries utilisatrices élaborant des peintures ou produisant des objets colorés. Pour toutes celles-ci, que l'on songe aux industries de l'automobile, des tissus (mode), de l'imprimerie ou de la photographie, il est vital de savoir non seulement réaliser matériellement une couleur indiquée par un coloriste ou un styliste mais encore de savoir la réaliser le plus économiquement possible.

Cela implique de savoir repérer une couleur et de savoir mesurer un écart entre deux couleurs. Comment y arriver en l'absence de modélisation du phénomène coloré mettant en évidence des paramètres pertinents ?

Ce sont les rudiments de ce domaine de la connaissance scientifique que nous allons exposer ici. Ils apporteront peu à l'artiste, dont les préoccupations relèvent du domaine de l'esthétique de la juxtaposition des couleurs. Nous verrons qu'ils permettent de mieux caractériser les couches picturales et les matériaux qui les composent.

## 2. LA VISION DES COULEURS

Une couleur n'existe pas en soi. Le cinabre n'est pas rouge s'il n'y a personne pour le regarder, ou bien s'il n'est pas éclairé par une lumière blanche. Seule existe la perception des couleurs, c'est-à-dire une sensation cérébrale due à la réception par l'œil de l'observateur d'une lumière modifiée par un objet.

La perception de la couleur d'un objet matériel nécessite donc :

- son éclairage par une source lumineuse ;
- la réémission de lumière par sa surface ;
- la détection de cette lumière par un récepteur (l'œil) ;
- l'interprétation du signal (cerveau).

Actuellement, les deux premiers points sont bien compris par la physique, le troisième est encore sujet à controverses, et le dernier est encore très mal connu.

Retenons que l'on ne peut décrire une couleur sans préciser — ou sous-entendre — la nature de la source de lumière et celle du récepteur. La phrase : « c'est un tissu cramoisi » sous-entend vraisemblablement vu par mon œil et à la lumière du jour.

Détaillons les trois premiers points.

Une *source lumineuse* est caractérisée par son spectre de puissance, c'est-à-dire la répartition de la puissance qu'elle émet en fonction de la longueur d'onde. La fenêtre des longueurs d'ondes retenues (400-700 nm) — cfr chapitre « La physique des couches picturales » — correspond évidemment à celles perceptibles par l'œil humain normal. La plus courante des sources lumineuses est la lumière solaire. Son spectre, continu, est représenté sur la figure 1. Différents types de sources artificielles l'imitent assez bien. Certaines d'entre elles sont normalisées et servent de sources étalons. Elles sont repérées par des lettres de l'alphabet. D'autres sources peuvent avoir des spectres discontinus.

*L'interaction lumière — matière* a fait l'objet d'un chapitre particulier (cfr chapitre « La physique des couches picturales »). Nous rappellerons ici simplement que le rapport de l'énergie globale réfléchiée par une surface à celle qu'elle reçoit est la *réflectance* ( $Y$ ) de la surface, qui s'exprime en pour cent. Une surface claire a donc une réflectance élevée.

Rappelons également qu'un matériau éclairé modifie le spectre de la puissance lumineuse reçue par absorption sélective de certaines longueurs d'ondes. Il réémet donc un spectre de puissance modifié dit *spectre de réflectance*, (spectre fort utilisé par les coloristes). Le physicien et le chimiste, eux, s'intéressent non à ce que le matériau émet, mais à ce qu'il absorbe. Ils savent que ces absorptions traduisent les transferts d'énergie entre la lumière et des entités identifiables (liaisons chimiques, groupes d'atomes), et sont

## 2. LA VISION DES COULEURS

Une couleur n'existe pas en soi. Le cinabre n'est pas rouge s'il n'y a personne pour le regarder, ou bien s'il n'est pas éclairé par une lumière blanche. Seule existe la perception des couleurs, c'est-à-dire une sensation cérébrale due à la réception par l'œil de l'observateur d'une lumière modifiée par un objet.

La perception de la couleur d'un objet matériel nécessite donc :

- son éclairage par une source lumineuse ;
- la réémission de lumière par sa surface ;
- la détection de cette lumière par un récepteur (l'œil) ;
- l'interprétation du signal (cerveau).

Actuellement, les deux premiers points sont bien compris par la physique, le troisième est encore sujet à controverses, et le dernier est encore très mal connu.

Retenons que l'on ne peut décrire une couleur sans préciser — ou sous-entendre — la nature de la source de lumière et celle du récepteur. La phrase : « c'est un tissu cramoisi » sous-entend vraisemblablement vu par mon œil et à la lumière du jour.

Détaillons les trois premiers points.

Une *source lumineuse* est caractérisée par son spectre de puissance, c'est-à-dire la répartition de la puissance qu'elle émet en fonction de la longueur d'onde. La fenêtre des longueurs d'ondes retenues (400-700 nm) — cfr chapitre « La physique des couches picturales » — correspond évidemment à celles perceptibles par l'œil humain normal. La plus courante des sources lumineuses est la lumière solaire. Son spectre, continu, est représenté sur la figure 1. Différents types de sources artificielles l'imitent assez bien. Certaines d'entre elles sont normalisées et servent de sources étalons. Elles sont repérées par des lettres de l'alphabet. D'autres sources peuvent avoir des spectres discontinus.

*L'interaction lumière — matière* a fait l'objet d'un chapitre particulier (cfr chapitre « La physique des couches picturales »). Nous rappellerons ici simplement que le rapport de l'énergie globale réfléchiée par une surface à celle qu'elle reçoit est la *réflectance* ( $Y$ ) de la surface, qui s'exprime en pour cent. Une surface claire a donc une réflectance élevée.

Rappelons également qu'un matériau éclairé modifie le spectre de la puissance lumineuse reçue par absorption sélective de certaines longueurs d'ondes. Il réémet donc un spectre de puissance modifié dit *spectre de réflectance*, (spectre fort utilisé par les coloristes). Le physicien et le chimiste, eux, s'intéressent non à ce que le matériau émet, mais à ce qu'il absorbe. Ils savent que ces absorptions traduisent les transferts d'énergie entre la lumière et des entités identifiables (liaisons chimiques, groupes d'atomes), et sont

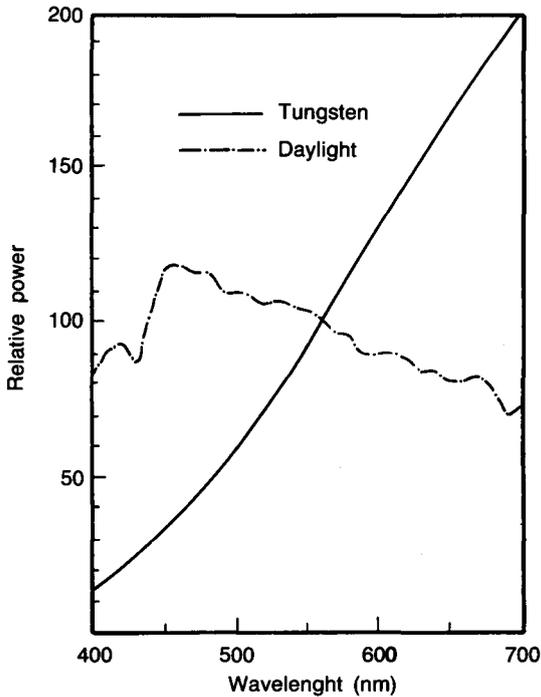


Fig. 1. Spectres de puissance (normalisés à 100 pour la longueur d'onde 560 nm) d'une lumière du jour (source C) et d'une lumière électrique à incandescence (source A). Cette dernière émet beaucoup plus de rouges que de bleus (cfr figure 10).

donc caractéristiques du matériau. Il y a là une possibilité très intéressante d'identification du matériau. Ils utilisent donc le spectre complémentaire du spectre de réflectance, dit *spectre d'absorption*.

Pour une longueur d'onde donnée, à une absorption de 30 % correspond une réflectance de 70 %.

Aux spectres ne comportant qu'une étroite bande de longueurs d'ondes, correspondent les couleurs dites « pures », c'est-à-dire des couleurs qui pourraient, à la limite, être composées d'une longueur d'onde unique (monochromatiques). Ainsi, le rouge, le bleu et le vert de la figure 2. À des bandes plus larges, correspondent des couleurs plus moyennes (orange et jaune de la figure 2). Elles aussi pourraient être remplacées par une longueur d'onde unique. À des bandes occupant toute la largeur du spectre, de 400 à 700 nm, correspondent les teintes achromatiques (blanc, gris, noir) selon que le niveau de réflectance est élevé ou faible. Certaines couleurs (violet et pourpre) ne peuvent être obtenues que par association de plusieurs bandes spectrales (rouge et bleu). En cela, elle se distinguent de couleurs comme le vert ou l'orange, qui peuvent être réalisées soit monochromatiquement avec un vert

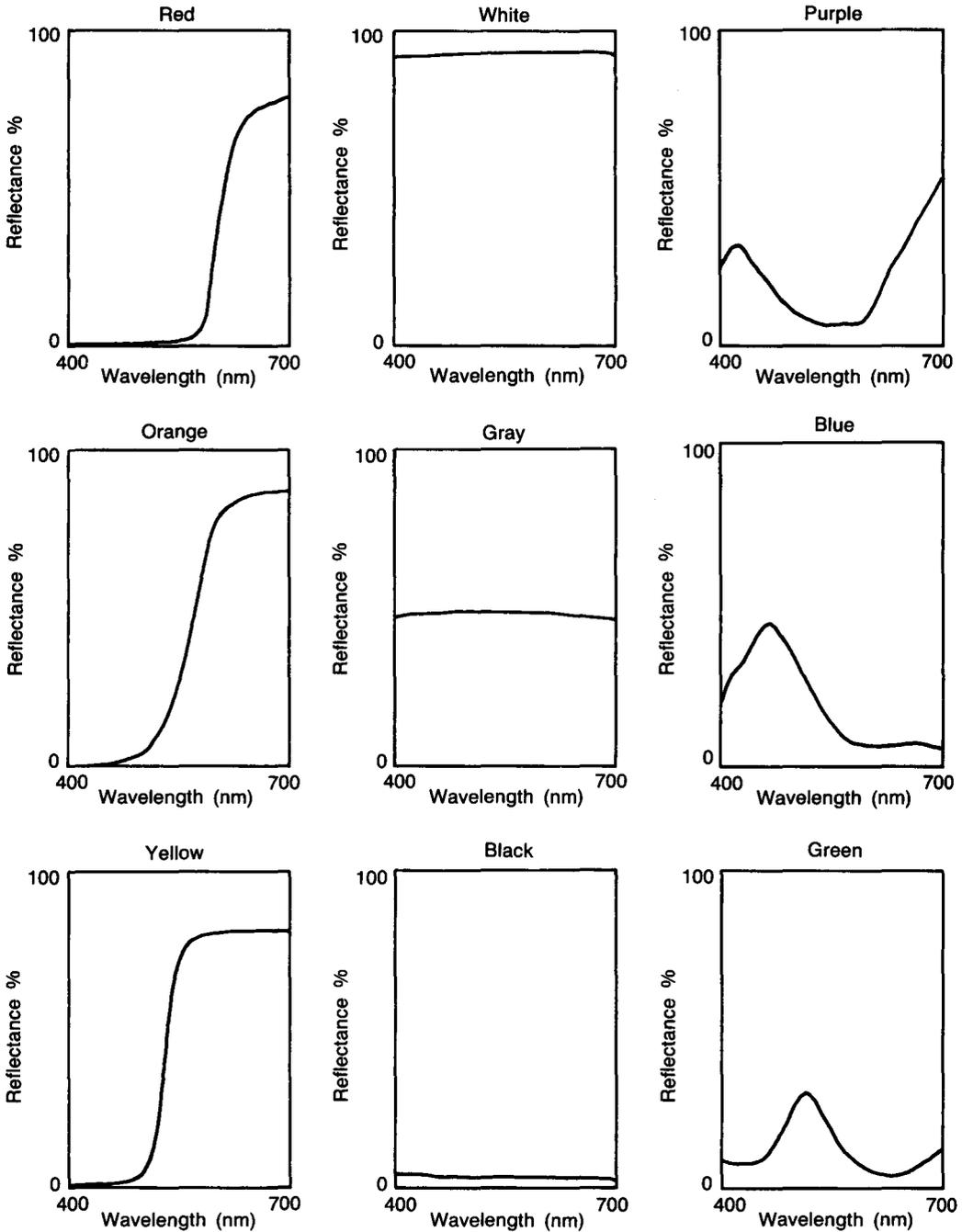


Fig. 2. Spectres théoriques de réflectance des principales couleurs (en abscisse, la longueur d'onde de la lumière). De haut en bas, et de gauche à droite : rouge - orange - jaune, blanc - gris - noir, violet - bleu et vert.

ou un orange, soit par mélanges (de bleu et de jaune pour le vert ; de jaune et de rouge pour l'orangé). C'est donc à tort que, au moins depuis Newton (1704) et sa nomenclature des couleurs de l'arc-en-ciel arbitrairement regroupées en sept couleurs (violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge), le violet est classé parmi les couleurs pures. Il s'ensuit qu'il n'y a pas de domaine « ultra-violet », mais un domaine « ultra-bleu ».

Le *récepteur*, lui, est caractérisé par sa courbe de réponse spectrale, c'est-à-dire son rendement en fonction de la longueur d'onde de la lumière reçue. La figure 3 permet de comparer celle de l'œil humain, centrée sur une bonne perception du jaune et détectant assez mal les bleus et les rouges, à celles de deux récepteurs artificiels.

En définitive, le signal perçu par le cerveau est le produit de ces trois courbes spectrales : à longueur d'onde donnée, c'est le produit de la puissance émise par la source par la puissance réémise par l'objet, et le rendement de l'œil (figure 4).

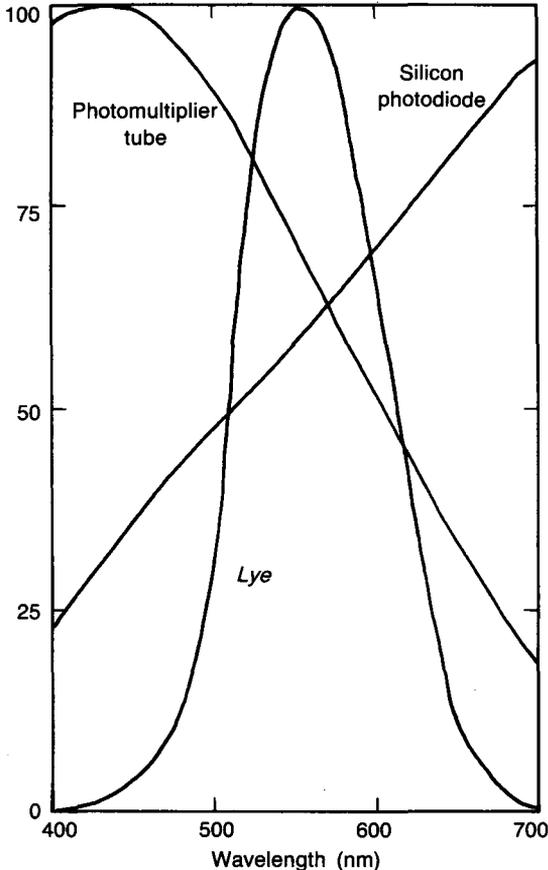


Fig. 3. Courbes de réponse spectrale de l'œil humain (*eye*), et de deux récepteurs artificiels. Chacun d'entre eux privilégie une région donnée du spectre.

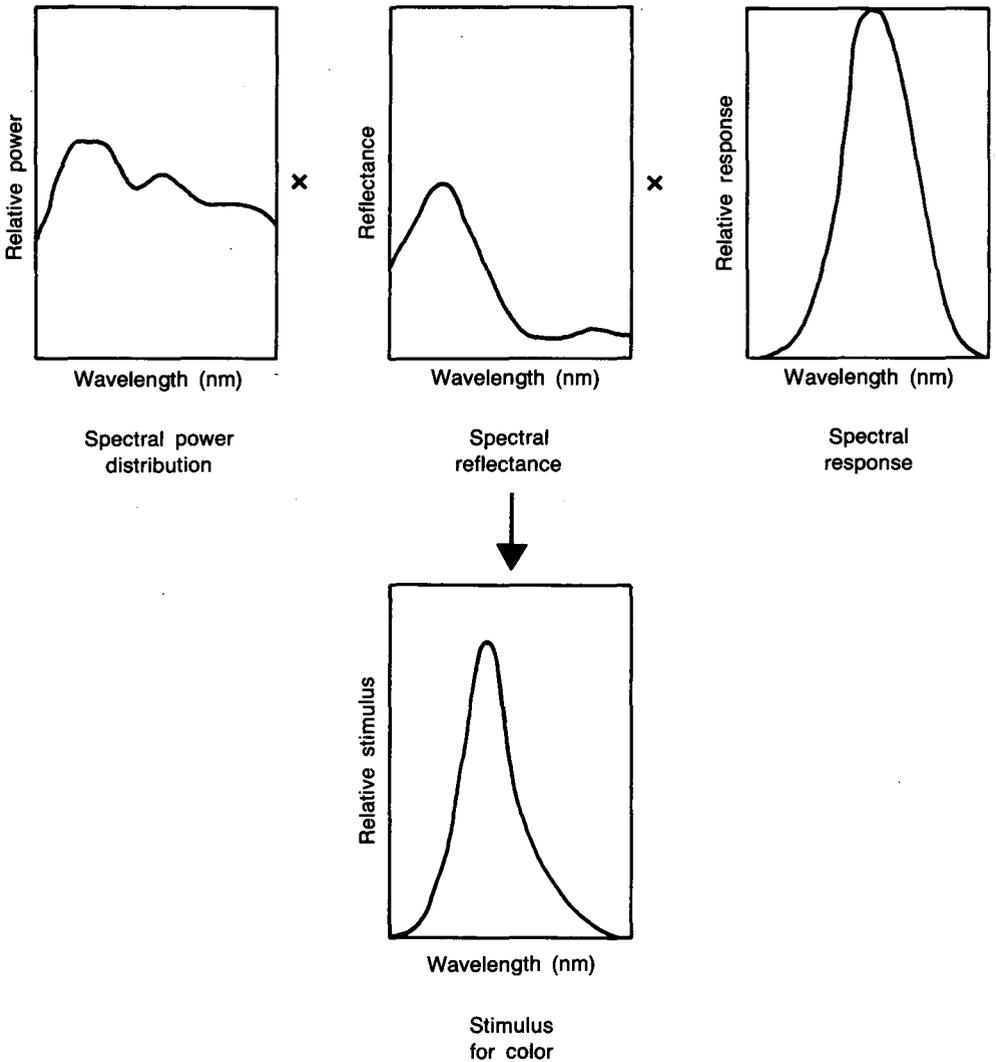


Fig. 4. Genèse du stimulus coloré reçu par le cerveau. Cas de la lumière du jour éclairant un matériau bleu observé par un œil humain normal.

### 3. LE MÉTAMÉRISME

Nous venons de voir que la couleur d'un objet dépend non seulement de sa nature, mais aussi de la lumière qui l'illumine.

Or, il est des cas où, par le jeu de ce triple produit de courbes spectrales, deux objets n'ayant pas le même spectre d'absorption peuvent cependant

avoir la même couleur pour une source lumineuse particulière. Cette identité de couleur disparaît si l'on change de source. Un tel phénomène est le *métamérisme*. Il est illustré par la figure 5. Son importance pratique est considérable, car, s'il facilite la réalisation matérielle des couleurs — prévues en général pour une source, la lumière du jour — en augmentant la gamme des colorants et pigments utilisables, il se révèle aussi fort dangereux puisqu'il suffit de changer de source (passer par exemple en éclairage par lampe à incandescence) pour qu'apparaissent des différences de couleur imprévues. Dans ces conditions, on n'est jamais sûr que des tons assortis pour une source lumineuse, le restent avec d'autres. Ce problème est bien connu de ceux qui veulent assortir des couleurs de tissus, ou bien des dentistes voulant assortir les tons de prothèses dentaires. Il est également exploité pour la détection des faux billets de banques : les faussaires ne connaissant pas la composition des encres utilisées par les Instituts d'Émission, emploient des encres métamères. La différence de couleurs apparaît à l'observation sous une source très différente, éclairant dans l'ultraviolet.

#### 4. LE MÉLANGE DES COULEURS

Le physicien distingue traditionnellement deux modes d'obtention d'une couleur par mélange : l'*addition* et la *soustraction*. Il les réalise en laboratoire à l'aide de lumières colorées.

Dans le premier mode, il éclaire simultanément une surface blanche avec plusieurs lumières colorées différentes. La surface renvoie la quasi totalité des lumières incidentes dont les spectres s'ajoutent. On obtient ainsi une couleur de réflectance élevée. L'addition d'une lumière rouge et d'une lumière bleue donne un violet assez lumineux. Un effet équivalent peut être obtenu par *mélange optique* ou *fusion optique*, en utilisant une imperfection de l'œil humain qui est l'existence d'une certaine persistance des images rétinienne dans le temps. Ainsi, l'observateur d'un disque tournant comportant des secteurs colorés ne perçoit qu'une teinte unie moyenne.

Dans le second mode de mélange, dit *soustractif*, on place devant la même source lumineuse, successivement, plusieurs filtres colorés ayant chacun leur spectre d'absorption. Chaque filtre éliminant une partie du spectre lumineux, on obtient des teintes de faible réflectance. La superposition d'un filtre rouge et d'un filtre bleu conduit à l'obtention d'un violet.

Ces deux modes de mélange sont utilisés par les coloristes et les artistes.

Le mélange de couleurs matérielles par le peintre sur sa palette ou dans un seau correspond au mode soustractif : chacun des composants absorbe la lumière pour son propre compte, et leurs effets s'ajoutent. Une approximation de ces phénomènes est donnée par la modélisation de Kubelka et Monk (cfr chapitre « La physique des couleurs picturales »).

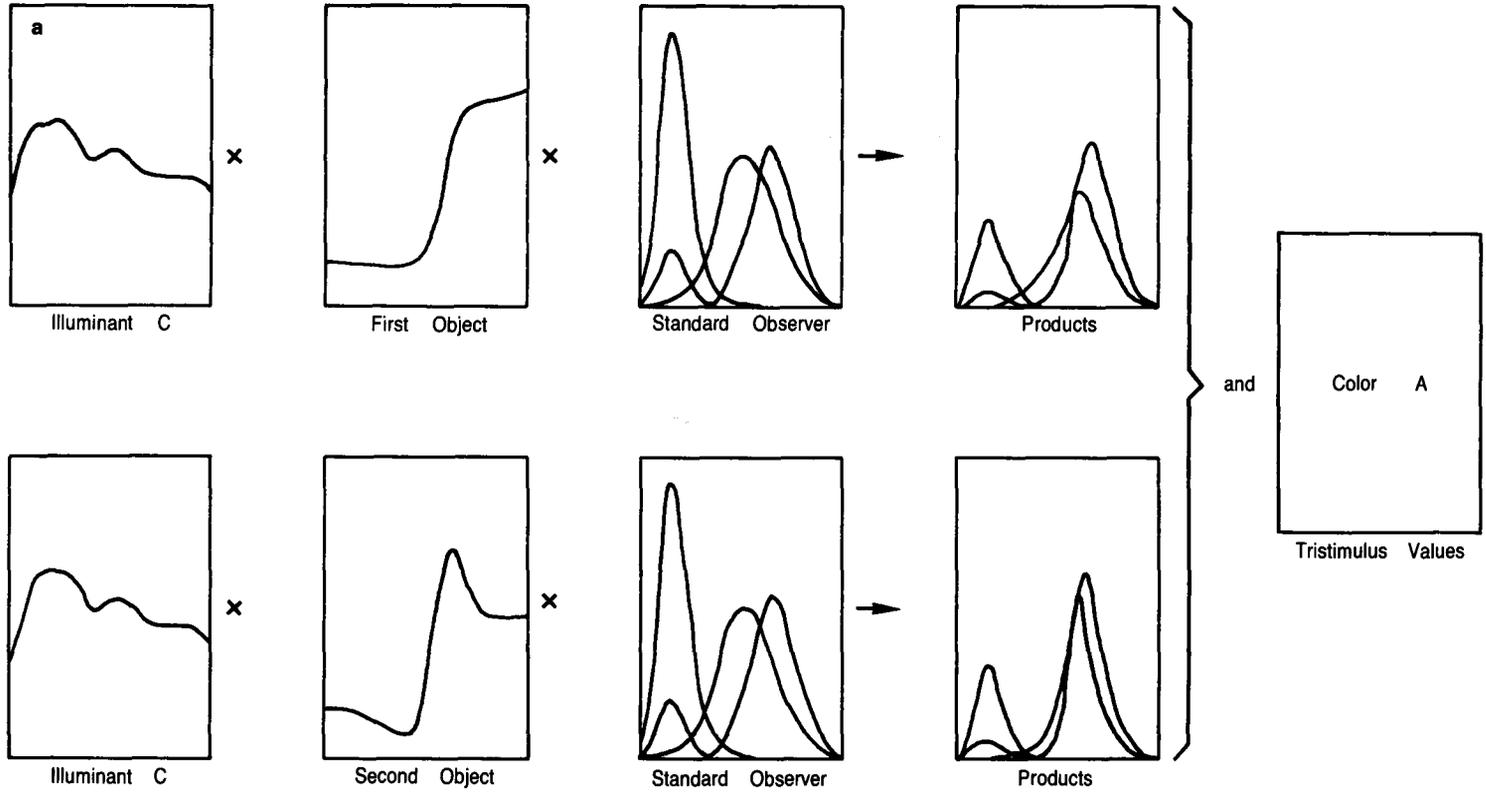


Fig. 5a. Le métamérisme.

Deux matériaux oranges, de spectres de réflectance différents sont éclairés par la même lumière du jour (source C), et observés par le même observateur standard CIE (1931). Les courbes de stimuli (products) sont légèrement différentes, mais les aires sous-jacentes (cfr figure 8) sont respectivement égales dans les deux cas. Le colorimètre mesure les mêmes coordonnées trichromatiques CIE. L'observateur perçoit la même couleur.

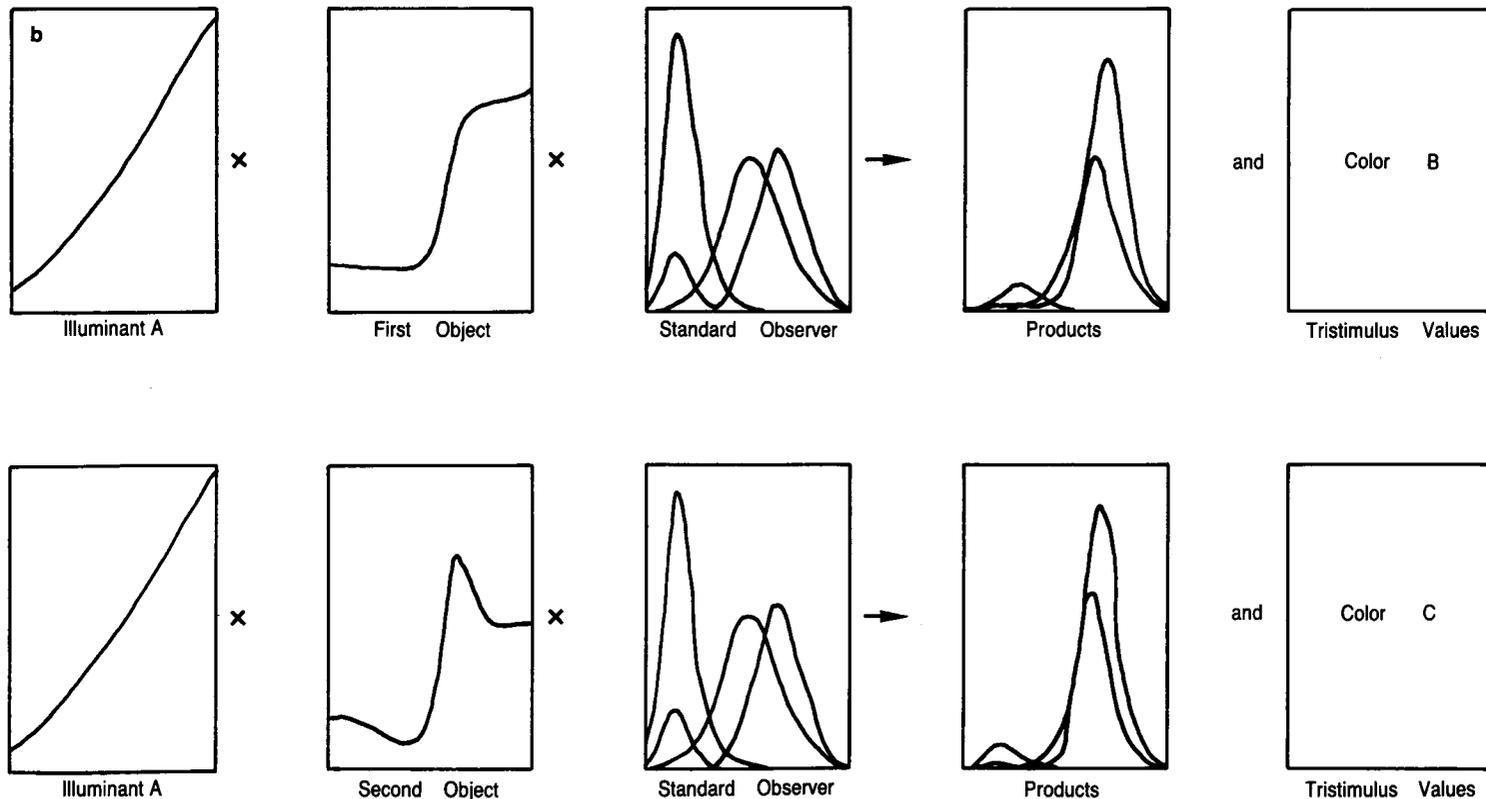


Fig. 5b. Le métamérisme.

Les mêmes objets sont cette fois-ci éclairés par une autre source (tungstène, A). Les courbes des stimuli sont différentes, mais, cette fois, les aires sous-jacentes ne sont plus les mêmes. Les coordonnées trichromatiques CIE sont différentes, et l'observateur perçoit deux nuances différentes.

Diverses techniques utilisent le mode additif grâce à une forme particulière de fusion optique fondée sur une autre imperfection de l'œil humain : sa résolution angulaire limitée. On juxtapose des éléments colorés qui, vus à une certaine distance, se fondent optiquement les uns dans les autres. Tel est le principe de l'art de la mosaïque, du pointillisme en peinture (Seurat), et de la restitution des couleurs par un tube vidéo. C'est aussi celui du tissage des tissus dont la couleur résulte de la juxtaposition de brins de textiles de couleurs différentes.

## 5. REPÉRER ET NOMMER LES COULEURS

Repérer et nommer les couleurs constitue un problème difficile, qui n'a été résolu que récemment, grâce à l'emploi de moyens assez sophistiqués. Quoiqu'il en soit, il continue à se poser quotidiennement à chacun et personne ne songerait à acheter un objet pour lequel la couleur joue un rôle important sur la foi d'une simple description de la couleur.

Repérer une couleur nécessite chez l'observateur l'existence d'un référentiel personnel. Communiquer cette couleur repérée nécessite l'usage d'un référentiel commun.

On peut noter que ce référentiel commun semble exister dans nos pays pour les couleurs de base les mieux individualisées, mais qu'il manque lorsqu'il s'agit de nuances.

Défrichant récemment le champ de l'anthropologie des couleurs, Pastoureau a montré combien fut lente l'individualisation des couleurs types, celles qui nous sont les plus familières, et qui constituent les premières boîtes de crayons de couleurs, comme le rouge ou le bleu (Pastoureau, 1987). L'homme de l'Antiquité ou du Haut Moyen Âge ne voyait — ne pouvait voir, ou nommer — dans l'arc-en-ciel que trois couleurs, du *rouge*, du *blanc-jaune* et du *sombre*. La différenciation du *bleu* du *sombre* ne sera effective qu'à partir du XII<sup>e</sup> siècle en Europe occidentale (Pastoureau, 1983 et 1986). Ce n'est, bien sûr, qu'alors que pourront se poser le problème de la définition des nuances, qui permettent de repérer, parmi l'infinité de couleurs bleues imaginables, celles que l'on savait réaliser ou qui plaisaient à la clientèle. Le texte présenté en figure 6 illustre la tentative faite par Colbert en 1669 pour normaliser l'appellation des nuances bleues de tissus produits par les manufactures françaises, c'est-à-dire pour établir un référentiel. Certaines nous évoquent clairement des couleurs (*bleu céleste*, *bleu clair*). La plupart ont perdu leur pouvoir d'évocation (*bleu mignon*, *bleu d'enfer*) : le référentiel a changé.

Il en va, hélas, de même dans tous les domaines de la couleur : les teintes *alize*, *aurora fin*, *gingeolin*, *nacarat*, *ponceau*, *ratine* ou *sylvie*, citées parmi bien d'autres à l'article « Teinture » de l'Encyclopédie (1765) n'évoquent plus rien pour la plupart d'entre nous. Il en est d'ailleurs de même pour des appellations contemporaines et normalisées comme *cyan* et *magenta*.

C'est un ancien usage parmi les teinturiers, de compter treize nuances de bleu, depuis la plus foncée jusqu'à la plus claire. Quoique leurs dénominations soient un peu arbitraires, & qu'il ne soit pas possible de fixer au juste le passage de l'une à l'autre, il en faut du moins donner les noms, tels qu'ils se trouvent dans l'Instruction pour les teintures, publiée en 1669, par ordre de M. Colbert. Les voici, à commencer par la plus claire.

Fig. 6. *Les bleus : le nuancier des teinturiers français au XVII<sup>e</sup> s.* (J. HELLOT, « L'art de la teinture des laines et des étoffes de laine en grand et petit teint », Paris, V<sup>o</sup>e Pissot, 1772, p. 112).

*Bleu blanc, bleu naissant, bleu pâle, bleu mourant, bleu mignon, bleu célestre, bleu de reine, bleu turquin, bleu de roy, fleur de guesde, bleu pers, bleu aldego, & bleu d'enfer.*

Pour pallier cette difficulté, plusieurs types de démarche furent adoptés.

Les hommes de lettres essayèrent de définir les couleurs et les nuances par des mots. Ainsi, du *vert céladon* mis à la mode par le succès du roman « l'Astrée » d'Honoré d'Urfé (1610), dans lequel le berger Céladon porte un habit orné de rubans verts. Ce succès de librairie coïncide avec la vogue des porcelaines chinoises d'un gris-vert pâle délicat, qui sont rapidement baptisées « céladons ». Cette couleur est ainsi définie par quelques dictionnaires :

- « couleur verte, blafarde, mêlée de blanc », Furetière, Dictionnaire, 1690 ;
- « couleur verte, feuille de pêcher naissante », Dictionnaire de l'Académie, 1694 ;
- « couleur vert tendre, légèrement grise », Dictionnaire Encyclopédique Quillet, 1968 ;
- « couleur vert tendre, pâle et bleuté », Trésor de la Langue Française, CNRS, 1977.

Ces définitions sont relativement évocatrices, bien que la nuance y soit respectivement caractérisée par des ajouts de blanc, de gris ou de bleu.

Les organisations professionnelles et, en particulier, le monde de l'imprimerie choisirent une voie plus technique et codèrent arbitrairement les nuances disponibles à un catalogue donné. On utilise alors le bleu 318 de la maison x. Il y a alors pluralité de référentiels arbitraires.

Les physiciens, eux, en arrivèrent à caractériser une couleur par son spectre d'absorption. Nous avons dit la richesse de ce type de caractérisation. Il nous faut souligner la difficulté de l'utiliser pour les besoins courants. Si la vue d'un spectre suggère le type de couleur (bleu, rouge), il est extrêmement difficile d'y reconnaître les nuances.

Aucune de ces solutions ne répondant vraiment aux besoins des coloristes, nombreux sont ceux qui ont cherché à disposer graphiquement dans un *espace colorimétrique*, les points représentatifs de l'ensemble des couleurs de façon à exprimer les relations existant entre les couleurs. Une telle démarche de classement fonctionnel est proche de celles qui ont présidé à l'élaboration de la classification périodique des éléments en chimie, et des diagrammes de phases. Avec un tel classement, il devrait *enfin* être possible de répondre à une question comme : peut-on transformer un stock de peinture magenta en peinture kaki ? Quelles sont les voies les plus rationnelles pour y parvenir ?

## 6. LES ESPACES COLORIMÉTRIQUES

Un espace colorimétrique est un espace mathématique dans lequel l'ensemble des couleurs imaginables peut être représenté par un ensemble de points de telle manière que la proximité de deux points traduise une réelle parenté des couleurs.

L'idée de base est qu'il semble exister un classement naturel des couleurs dans l'ordre de l'arc-en-ciel (bleu - vert - jaune - orangé - rouge). De plus, on peut relier harmonieusement le rouge au bleu, grâce au violet, formant ainsi un cercle. À ce *cercle des couleurs*, on sent bien qu'il faudrait ajouter quelques paramètres supplémentaires, sans savoir très bien leur nombre ou leur nature. Le problème fondamental est donc : quel est le nombre minimum de paramètres nécessaires pour décrire une couleur ? Quels sont ces paramètres ?

L'expérience de Judd (1975) montre très simplement qu'il suffit de trois paramètres, et précise leur nature.

Imaginons que nous ayons à classer systématiquement des pierres de toutes couleurs et nuances. On commence par mettre de côté les pierres achromatiques (blanches, noires et grises) que l'on classe par exemple du blanc au noir en passant par des gris de plus en plus foncés. Ces pierres sont donc classées par *réflectance* décroissante. Il reste les pierres chromatiques ; on commence par les séparer par couleur dominante (bleu, vert, rouge). Dans le groupe des pierres vertes, on trouvera ainsi les verts clairs et foncés, les verts tirant sur le bleu, et ceux tirant sur le jaune. Le classement se fera alors dans deux directions :

— pour un vert donné, on classera ensemble toutes les pierres dont la couleur semble issue de ce vert, au prix d'une addition de blanc. Classées en allant du vert le plus tendre au vert le plus intense, on a ainsi un classement à *saturation* croissante. Ce classement est celui adopté dans le texte de la figure 6.

— pour une saturation donnée, on compose la succession des tons qui contiennent de plus en plus de jaune et, symétriquement, ceux qui tirent de plus en plus vers le bleu. On classe alors par *teinte* ou par *longueur d'onde*.

Toutes les pierres sont ainsi classées.

Trois paramètres seulement sont donc suffisants pour caractériser une couleur :

- la *teinte*, qui différencie le rouge du bleu  
synonymes : longueur d'onde dominante, gamme  
anglais : hue ;
- la *saturation*, qui différencie le rouge du rose  
synonymes : intensité, pureté, pureté d'excitation  
anglais : saturation, chroma ;
- la *réflectance* (Y), qui différencie un rouge sombre d'un rouge vif  
synonymes : luminance, valeur  
anglais : lightness, value.

Les espaces colorimétriques auront donc trois dimensions.

On remarquera au passage que ces paramètres, qui traduisent l'impression globale de l'observateur, peuvent se calculer à partir d'un spectre de réflectance.

La réflectance Y est la moyenne des valeurs des réflectances du spectre.

La teinte, ou longueur d'onde dominante, correspond à la longueur d'onde moyenne des bandes de haute réflectance.

La saturation se calcule en remarquant qu'on peut séparer le spectre de réflectance en deux régions par une droite horizontale :

- une région basse correspondant à un spectre plat fictif tangent aux portions basses de la courbe, qui représente la quantité de blanc présente dans la couleur ;
- une région contenant les bandes de haute réflectance.

Si R et r sont les valeurs des réflectances maximum et minimum, la saturation est :

$$R - r / R.$$

Si le passage d'un spectre de réflectance aux coordonnées trichromatiques est possible, en revanche, la détermination inverse est impossible. À un jeu de coordonnées trichromatiques données correspond une infinité de spectres de réflectance. Autrement dit, *une couleur n'est pas spécifique d'un matériau*. De nombreux matériaux différents peuvent avoir la même couleur.

Revenons aux espaces colorimétriques. De Lambert (1770) à Richter (1962), nombreux sont les inventeurs d'espaces colorimétriques. Nous nous bornerons à la présentation des trois les plus utilisés. Le premier, proposé par

un artiste peintre, est issu d'une démarche toute empirique : c'est le système Munsell. Le second, proposé par le physicien Mac Adam découle au contraire d'une démarche théorique. C'est le système CIE. Le troisième, dit  $L^* a^* b^*$ , est, en quelque sorte, intermédiaire.

### 6.1. Le système Munsell

L'idée de Munsell consiste à comparer visuellement la couleur à déterminer à des couches picturales étalons. Ces étalons devront couvrir toute la gamme des couleurs réalisables matériellement, réalisant une sorte de réseau dont les mailles seront suffisamment petites pour que la détermination soit précise. Il s'agit donc de déterminer empiriquement ces mailles, c'est-à-dire des écarts de couleur (ou de sensations colorées) aussi égaux que possible.

Le code Munsell (1929) se présente comme un livre dont chaque page contient des échantillons colorés. Le classement adopté suit les trois paramètres déjà décrits : teinte, réflectance et saturation.

Chaque page du livre est consacrée à une teinte. On en distingue cinq principales : rouge (R pour « red »), jaune (Y), vert (G), bleu (B) et violet (P). On les complète par cinq teintes intermédiaires (PR, YR, GY, BG, et PB). Dans chacune de ces dix catégories, on distingue 10 teintes, notées, par exemple, 1R, 2R, etc. Décrire la totalité du cercle des couleurs revient donc à tourner 100 pages.

Dans une page, les échantillons colorés sont rangés par colonnes et par lignes. Les colonnes correspondent à la variation de la réflectance, codée de 1, pour les plus faibles en bas de la page, à 10. Les lignes traduisent la variation de saturation, notée de 1 pour les plus faibles, côté reliure, à 10.

Une couleur se code 7GY 3/6. Celle-ci est un vert-jaune (GY) assez sombre (réflectance 3) et assez saturée, donc vive (6).

Coder une couleur par comparaison avec des étalons est extrêmement commode, en particulier sur un terrain, loin des sources d'énergie. Mais la méthode a un certain nombre de désavantages, dont le moins important n'est pas le prix du code lui-même, dû au soin extrême qui doit présider à sa réalisation. Il faut, de plus, que les couleurs n'aient pas été altérées par vieillissement, que l'observateur ait une vue normale, et que la source lumineuse soit convenable (les environnements avec dominante colorée sont à proscrire : sous-bois, etc).

À ce code s'associe tout naturellement un espace colorimétrique en forme d'orange. L'axe polaire est celui des réflectances, avec le noir au Sud et le blanc au Nord. Les axes perpendiculaires sont ceux de la saturation, qui croît du centre vers l'extérieur. L'équateur correspond au cercle des couleurs, c'est-à-dire aux teintes. À chacune des 100 teintes est dévolu un des quartiers de l'orange. À chacune des portions de l'orange est attribué un nom de couleur normalisé Munsell (figure 7).

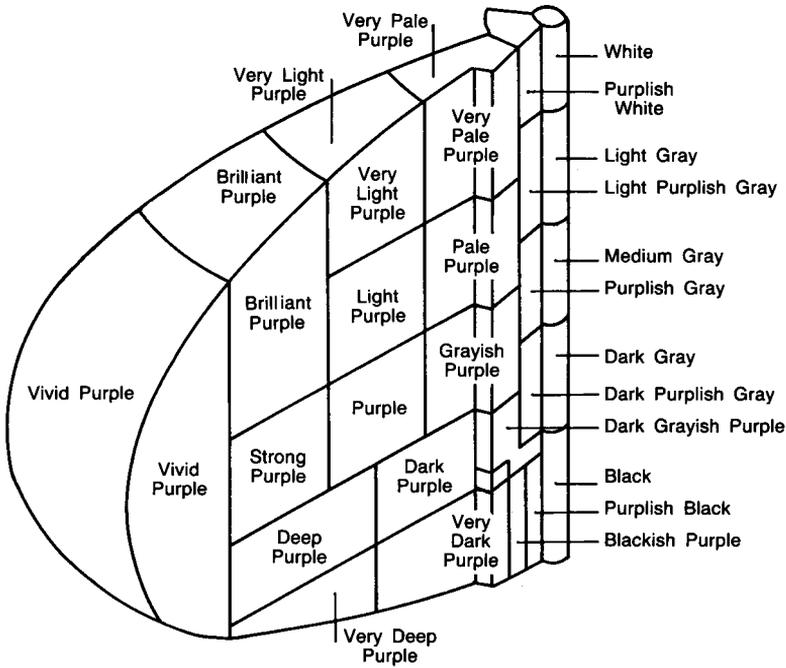


Fig. 7. Portion de l'espace colorimétrique associé au code Munsell. Normalisation du nom des couleurs.

### 6.2. L'espace colorimétrique CIE 1931

Il a été proposé par Mac Adam, et adopté en 1931 par la Commission Internationale de l'Éclairage. Bien qu'il ait été modifié à plusieurs reprises et, en particulier, en 1964, c'est la version 1931 qui reste la plus utilisée.

C'est un système de physicien, qui part du fait que la sensation colorée est le produit de la puissance spectrale de la source lumineuse, par le spectre de réflectance de l'objet et par la réponse spectrale du récepteur.

Pour déterminer une couleur par ses trois paramètres, réflectance, teinte et saturation, on choisit d'utiliser une source lumineuse normalisée — un certain nombre d'entre elles sont définies, imitant les différents environnements lumineux usuels — et un « observateur standard » défini par trois courbes de réponses spectrales. Parmi l'infinité de jeux de trois réponses spectrales que l'on pourrait adopter, on choisit l'un d'entre eux, dont les courbes ( $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  et  $\bar{z}$ ) présentent deux avantages :

- la courbe  $\bar{y}$  ou réponse spectrale dans les jaunes, semblable à celle de l'œil humain, donne directement la réflectance ;
- l'ensemble répartit les points représentatifs des couleurs dans un espace colorimétrique qui, s'il n'est pas simple, présente de nombreux avantages sur les autres.

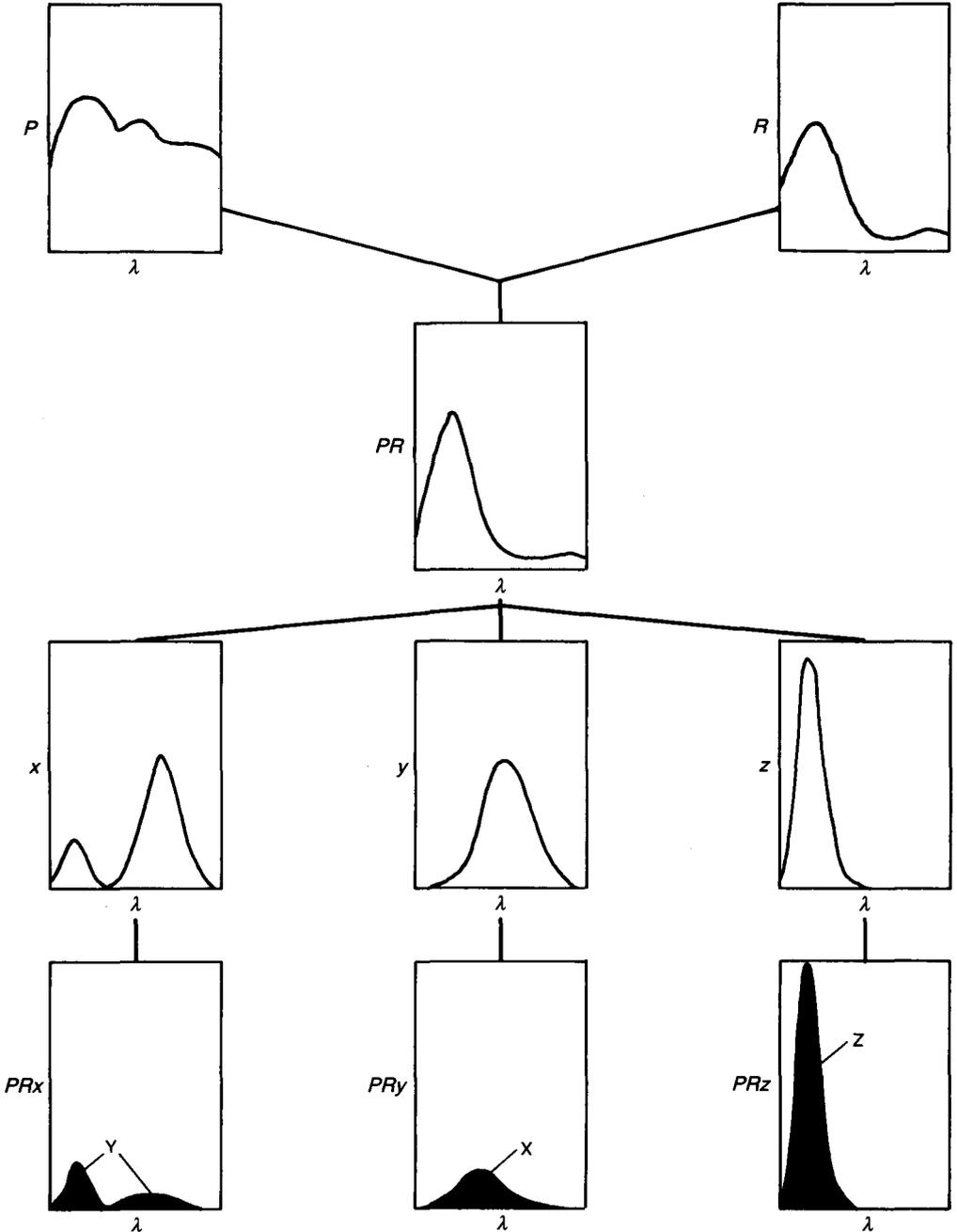


Fig. 8. Genèse du stimulus coloré chez l'observateur standard CIE 1931 regardant un objet bleu —  $R(\lambda)$  — éclairé par une source type lumière du jour —  $P(\lambda)$ . C'est à partir des aires en noir que sont calculées les coordonnées trichromatiques.

La figure 8 explique comment se déroule le calcul des coordonnées trichromatiques : on calcule les produits  $P \times R \times \bar{x}$ , puis, l'aire comprise sous la courbe obtenue, notée respectivement X, Y et Z. Y est la réflectance de la surface (en pour cent). Deux autres coordonnées sont calculées :

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Elles servent à situer le point représentatif de la couleur dans un *diagramme de chromaticité* qui, associé à la troisième dimension, la réflectance, constitue l'espace trichromatique CIE 1931.

La figure 9 montre la forme particulière de cet espace. Par commodité, l'habitude prévaut de représenter les couleurs par leur projection dans le plan x o y. Elles y occupent une région limitée par une sorte de parabole et un segment de droite.

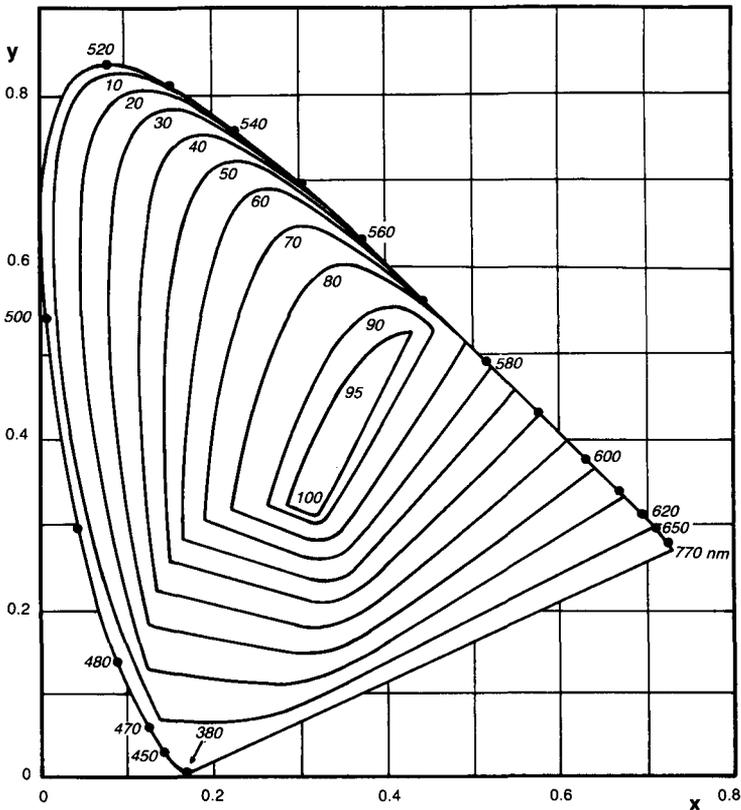


Fig. 9. Espace colorimétrique CIE 1931 représenté par ses coupes par des plans de réflectances diverses. La coupe au niveau 0 est le diagramme de chromaticité, limité par le « spectrum locus » et la « droite des pourpres ».

La courbe, ou *spectrum locus*, représente les couleurs pures (c'est-à-dire monochromatiques) réalisables avec des sources lumineuses. Ce sont les couleurs les plus saturées que l'on puisse obtenir. Les couleurs réalisées matériellement avec des colorants ou des pigments sont toujours moins saturées. Le *spectrum locus* est graduable en longueurs d'ondes (figure 10). On constate que la graduation n'est pas uniforme, ce qui est caractéristique de cet espace. Elle est dilatée dans la zone de plus grande sensibilité de l'œil (vert-jaune).

Le segment de droite, dit *droite des pourpres* relie les bleus aux rouges, et referme ainsi cette région. La courbe ainsi fermée équivaut au cercle des couleurs.

Un point singulier est celui qui représente la source lumineuse (souvent appelé W, pour white). Assez central pour une lumière pseudo-solaire (sources C ou D<sub>65</sub> - figure 10), il tire vers le jaune, l'orange et le rouge avec les lumières à incandescence de plus basse température (A). Une fois choisie la source, C par exemple, de ce point partent des courbes, quasi rayonnantes

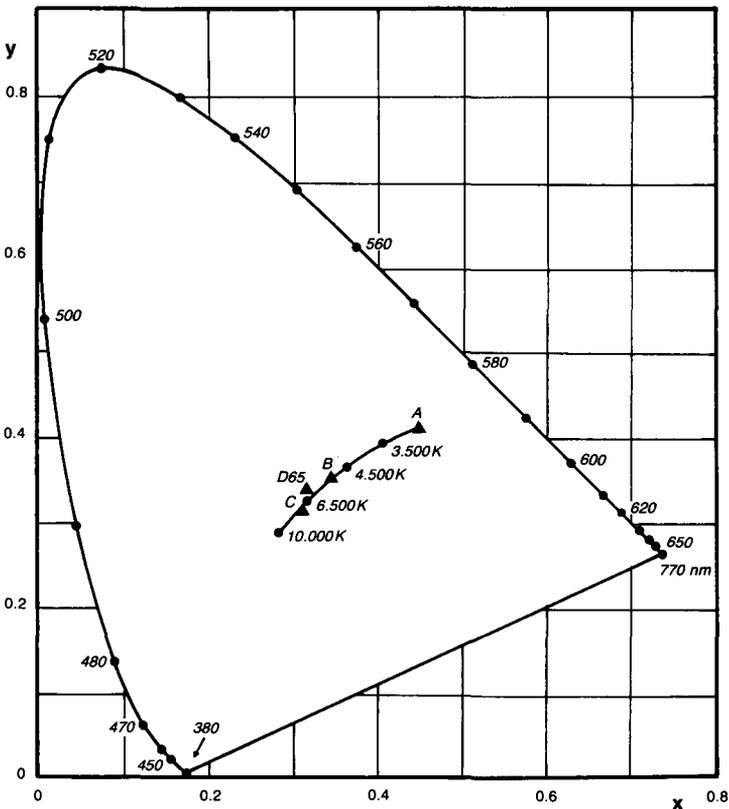


Fig. 10. Diagramme de chromaticité CIE 1931 montrant la graduation du spectrum locus en longueurs d'ondes, et les points représentatifs des sources lumineuses normalisées les plus courantes.

vers les divers points du *spectrum locus*. Ces *géodésiques*<sup>1</sup> regroupent les points représentatifs de la désaturation d'une teinte : s'y retrouvent toutes les couleurs obtenues par ajout de quantités de blanc variables à cette teinte.

Une norme détermine celles des géodésiques qui servent de limites à des régions de couleur donnée, et fixe leurs noms (figure 11).

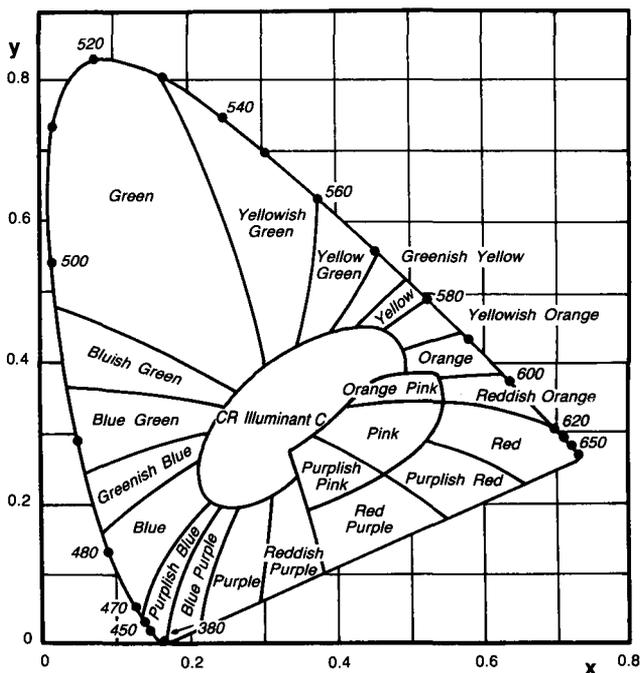


Fig. 11. Normalisation des noms de couleurs dans le diagramme de chromaticité CIE 1931.

L'utilisation de cette représentation nécessite la détermination préalable des coordonnées  $x$   $y$   $Y$  de la couleur, soit par comparaison avec des étalons, soit par spectrophotométrie. Bien qu'utilisé en deux dimensions, le diagramme de chromaticité se révèle très utile pour visualiser le rapport des couleurs entre elles et prévoir l'effet de mélanges. On voit, par exemple, qu'il est impossible d'obtenir un bleu saturé par mélange. On prévoit très bien que le résultat de l'addition de jaune à un bleu donnera un vert (le point représentant le mélange est situé à l'intérieur du segment reliant les points représentant les couleurs jaune et bleue). On constate également que la couleur obtenue est toujours moins saturée que les couleurs de départ, puisque le segment passe plus près du point W. On comprend aussi que le choix du rouge, du vert et du bleu comme couleurs « primaires » permette de réaliser le plus grand choix de couleurs par mélange : situées aux sommets de ce domaine quasi-triangulaire, elles permettent de couvrir la surface la plus grande.

1. Chemin le plus court permettant d'aller d'un point à un autre dans un espace donné.

On peut même effectuer des calculs approximatifs de quantités, comme dans les diagrammes de phases, en chimie. Malheureusement, nous l'avons dit, du fait de la complexité des phénomènes représentés et de la formulation mathématique choisie, cet espace n'est pas uniforme : l'unité de longueur n'y est pas la même partout comme dans un espace ordinaire (dit *euclydien*), mais elle varie avec le lieu. Cet espace est *riemannien*. Cela complique beaucoup les calculs, en particulier celui des géodésiques, qui sont souvent approximées par des segments de droite, comme dans la norme française AFNOR. La figure 12 représente la répartition des couleurs étalons Munsell de réflectance 5 dans le diagramme de chromaticité. La non-uniformité de l'espace CIE se traduit par une distorsion de la toile d'araignée Munsell. Ainsi, les lignes concentriques fermées représentant les couleurs isosaturées ne sont pas des cercles.

Mais le plus grand inconvénient de ce système est la difficulté que l'on éprouve à y calculer les différences de couleur et, du fait de l'usage d'une projection sur le plan  $x$  o  $y$ , à visualiser.

C'est la raison pour laquelle nombre d'industriels se sont tournés vers des systèmes simplifiés.

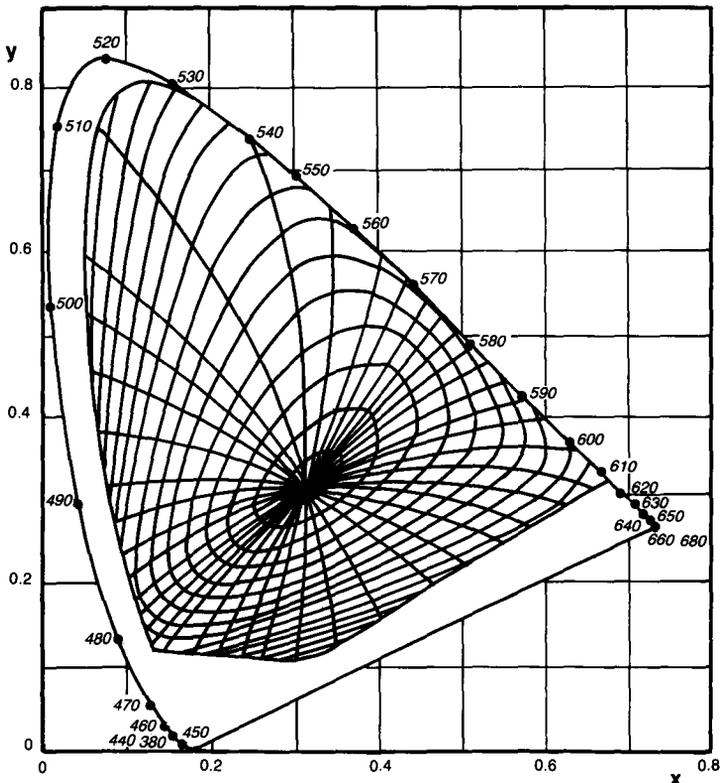


Fig. 12. Répartition des couleurs étalons Munsell de réflectance 5 dans le diagramme de chromaticité CIE 1931. Aux perceptions égales Munsell correspondent des mailles inégales dans l'espace CIE : l'espace CIE n'est pas uniforme.

6.3. Le système  $L^* a^* b^*$

Le système  $L^* a^* b^*$  repose sur la remarque un peu simplificatrice qu'une même couleur ne peut être à la fois rouge et verte, ou bien bleue et jaune. On note le caractère rouge ou vert sur un axe, par un nombre ( $a$ ) compris entre  $\pm 150$  ; le caractère jaune ou bleu sera noté sur un axe perpendiculaire au premier par un autre paramètre ( $b$ ) compris entre  $\pm 100$ . Ceci revient donc à remplacer le cercle des couleurs par un carré et à distinguer quatre couleurs primaires opposées deux à deux. Un axe perpendiculaire à ce plan portera la réflectance  $Y$  appelée ici  $L$ , pour lightness (figure 13).

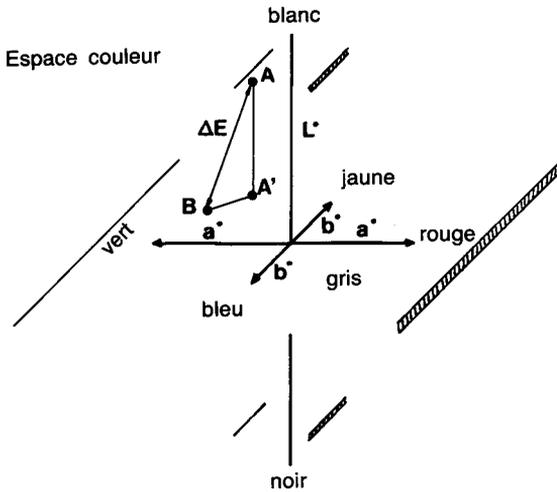


Fig. 13. Espace colorimétrique  $L^* a^* b^*$ . Il a été imaginé pour permettre de calculer simplement la distance  $\Delta E$  séparant deux couleurs ( $A, B$ ). Il ne permet pas de prévoir les mélanges.

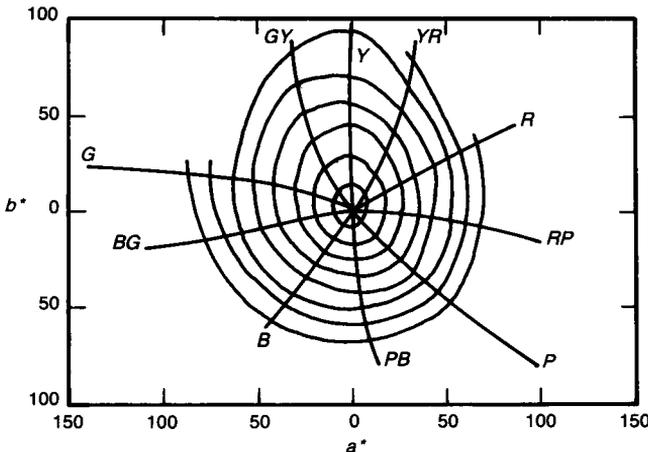


Fig. 14. Répartition des couleurs étalons Munsell de réflectance 5 dans le plan  $a^* b^*$  de l'espace  $L^* a^* b^*$ . Cet espace est plus uniforme que l'espace CIE 1931 (cfr figure 12).

Ce type d'espace, assez rudimentaire, a été proposé par Hunter en 1942 avec les coordonnées L a b. Parmi les nombreuses variantes proposées depuis, c'est celle adoptée par la CIE, dite CIELAB 1976, qui est la plus largement répandue. Les coordonnées trichromatiques, notées L\* a\* b\* (L star, a star et b star) peuvent être soit obtenues directement sur les spectrophotomètres munis de calculateurs, soit calculées à partir des valeurs X, Y, Z de la couleur, et X<sub>0</sub> Y<sub>0</sub> Z<sub>0</sub> de la source lumineuse dans le système CIE 1931, par les formules :

$$L^* = 116 (Y/Y_0)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 [(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}]$$

$$b^* = 200 [(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}]$$

L'uniformité de l'espace colorimétrique obtenue est bien meilleure : la comparaison des figures 12 et 14 en fournit la preuve. Cet espace est donc particulièrement adapté à la mesure des écarts de distances locaux, c'est-à-dire à la mesure des écarts de couleurs. Une différence de couleur  $\Delta E$  s'y exprime aisément en fonction des différences relevées sur chacun des trois paramètres :

$$\Delta E^2 = \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2}$$

En revanche, cet espace simplifié ne permet pas de prévoir les mélanges de couleurs.

## 7. APPLICATION DE LA COLORIMÉTRIE À L'ÉTUDE DES COUCHES PICTURALES

L'utilisation de la colorimétrie pour l'étude ou la restauration des couches picturales n'en est encore qu'à ses débuts. C'est donc, *a priori*, un domaine prometteur.

Nous donnerons ici un aperçu de ce qui a été fait et de ce qui est déjà envisageable. Nous invitons fermement le lecteur à imaginer lui-même des applications originales.

La plupart de ces études ne nécessitent qu'une simple mesure des coordonnées trichromatiques. Certaines d'entre elles sont profondément enrichies par l'usage des spectres de réflectance. Pour la plupart, elles consistent à *stocker l'information*, à effectuer des *comparaisons* dans l'espace et dans le temps — c'est-à-dire à détecter des *évolutions* — à *visualiser* en couleurs les résultats précédents, et à participer à *l'analyse* des composés colorés ou à leur *choix*.

### 7.1. Comparer les couleurs

#### Exemple 1

En peinture murale romaine, les fonds de panneaux de couleur unie sont réalisés avec un très petit nombre de couleurs (rouge, violet, noir, jaune, etc.).

Leur examen dans les différents lieux où on les conserve laisse l'impression d'une certaine monotonie des couleurs employées. Dans quelle mesure y a-t-il identité de tous ces rouges (jaunes ...) employés en Gaule à une époque donnée ? Si oui, la caractérisation du matériau de la couche picturale permet-elle d'interpréter ce résultat comme traduisant une mode, ou bien un simple impératif technique lié à la fabrication du pigment ?

Exemple 2

Peut-on se faire une idée de la richesse chromatique des matériaux naturels utilisables comme pigments ?

La figure 7 du chapitre « Les terres vertes et leur utilisation en peinture murale romaine » permet de juger de la distribution des couleurs de cette famille de pigments dans l'espace colorimétrique. On constate que seuls des verts pâles sont disponibles, soit bleutés (céladonites), soit jaunâtres (glaucosies). Compte tenu du fait qu'un minéral de couleur très saturée (ex. la malachite, verte) voit sa saturation diminuer par broyage (du fait de l'augmentation de la quantité de lumière blanche diffusée — cfr chapitre « La physique des couches picturales ») on peut dire que l'Antiquité ne disposait pas de pigments minéraux vert saturé.

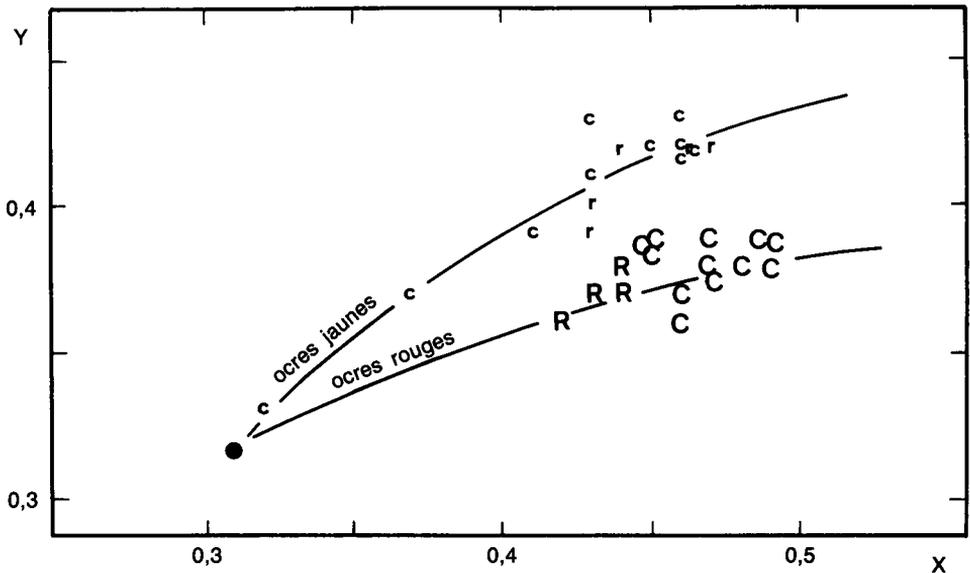


Fig. 15. Richesse chromatique des carrières de sables ocreux d'Apt (diagramme de chromaticité CIE 1931). Sables jaunes provenant du Colorado de Rustrel (c) ou de Roussillon (r). Sables rouge orangé provenant des mêmes carrières (respectivement C et R). On constate que pour chacune de ces couleurs, il n'y a qu'une teinte, et les couleurs qui en dérivent par désaturation.

La figure 15 traite du cas des sables ocreux d'Apt (cfr article « Les pigments à base d'oxydes de fer »). On constate que nonobstant l'impression visuelle d'une grande diversité de couleurs que l'on retire de la visite de ces carrières, on n'y rencontre que deux teintes (c'est-à-dire en fait, deux pigments de nature différente avec une seule granulométrie chacun), et les couleurs qui résultent de leur désaturation.

On peut alors aborder deux types de problèmes :

- étude des raisons des choix opérés par le fabricant de pigments ;
- proposition de provenance ou, *a contrario*, de non provenance d'un pigment utilisé dans une couche picturale.

Ainsi, la figure 16 permet de comparer les couleurs disponibles dans les sables ocreux d'Apt, et celles des fonds de panneaux gallo-romains de Léro. Les rouges ne peuvent provenir tels quels d'Apt, mais les jaunes pourraient en provenir (Delamare, 1983).

### Exemple 3

Les traitements de conservation des couches picturales ne modifient-ils pas leur couleur ?

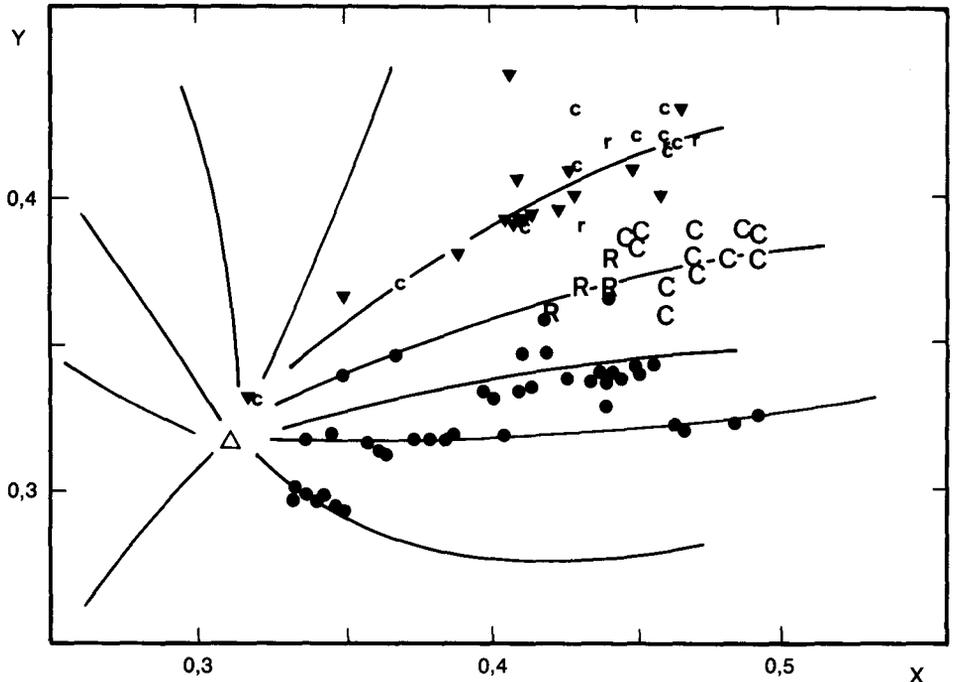


Fig. 16. Comparaison des couleurs des sables ocreux d'Apt et des couleurs des couches picturales formant des fonds unis réalisés aux oxydes de fer à Léro (Alpes-Maritimes). Les jaunes ont les mêmes couleurs. Les rouges diffèrent grandement. Il n'y a pas de violets à Apt (cfr figure 15).

## Exemple 4

Les couleurs des couches picturales sont-elles stables dans le temps ?

On peut mettre en évidence la modification chimique des minéraux colorés dans leur environnement, sur des durées importantes (cfr article « Les terres vertes et leur utilisation en peinture murale romaine », figure 8). Qu'en est-il lorsque le pigment ou le colorant est inclu dans une couche picturale ? La figure 17 montre l'effet d'un vieillissement de 500 ans sur un bleu outremer véritable (lapis-lazuli). La saturation diminue ; l'allure du spectre de réflectance reste à peu près la même. La couleur pâlit donc en verdissant légèrement. L'effet constaté est global. Il peut avoir pour causes soit une évolution du pigment lui-même, soit une modification de son environnement (liant et charges). Le même phénomène s'observe pour l'azurite (Staniforth, 1985).

## Exemple 5

La détermination de la loi colorimétrique de vieillissement d'un pigment ou d'un colorant, conjuguée à l'établissement de sa cartographie dans la couche picturale devrait permettre de simuler sur ordinateur le rajeunissement progressif de la couche, et de la faire apparaître dans ses couleurs initiales.

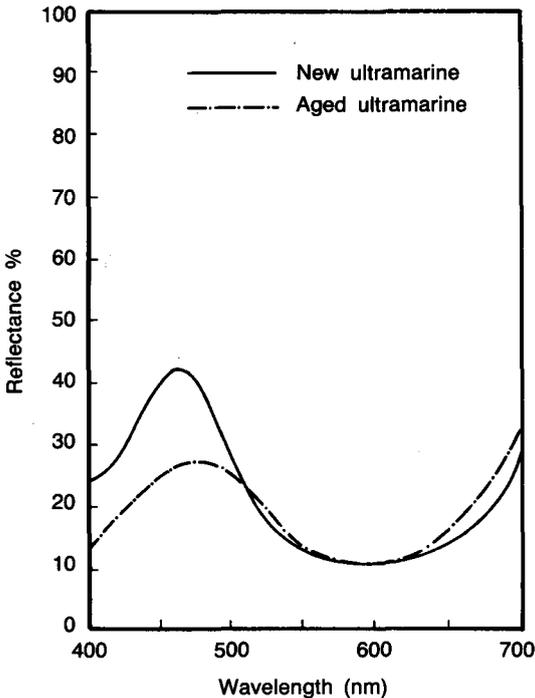
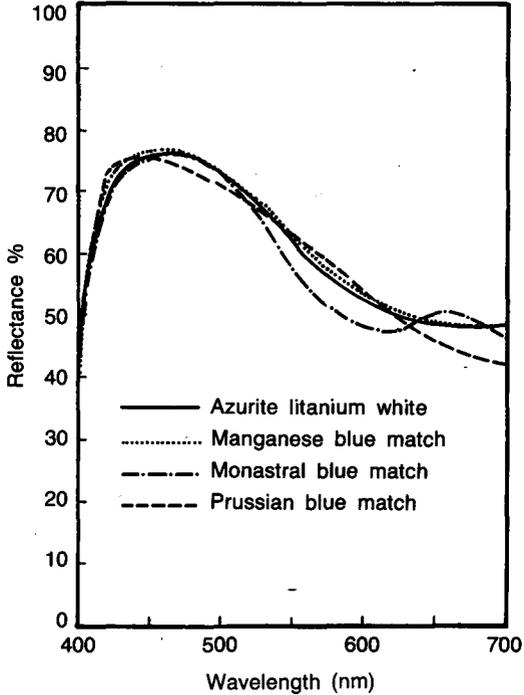
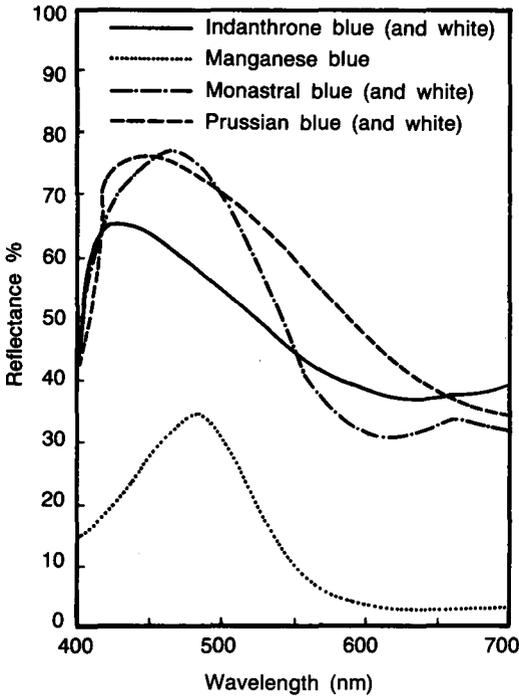
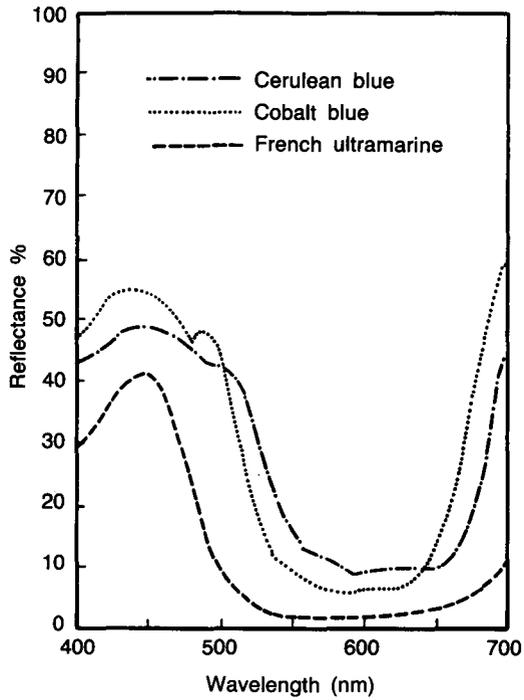
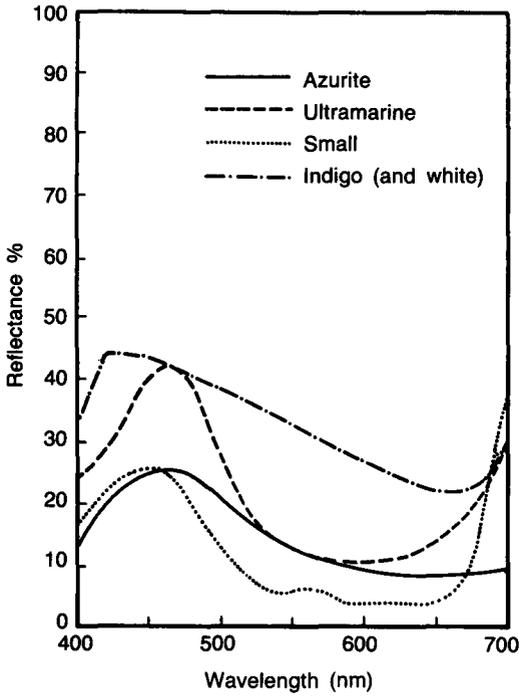


Fig. 17. Effet d'un vieillissement de 500 ans sur le spectre de réflectance d'un bleu outremer naturel (lapis-lazuli). La saturation de la couleur diminue. Le bleu pâlit en tirant un peu sur le vert. D'après Staniforth, 1985.



## Exemple 6

Supposons qu'on ait identifié dans une couche picturale un pigment, que la teinte de celui-ci varie avec sa granulométrie, et que la loi de variation soit connue :

- si le pigment est employé pur, la mesure de sa teinte permet de calculer sa granulométrie moyenne ;
- si sa teinte correspond à sa granulométrie, il n'y a pas d'autre colorant ou pigment ;
- si sa teinte ne correspond pas à sa granulométrie, il faut rechercher un autre composé coloré.

## Exemple 7

Comment choisir pour les restaurations le pigment qui posera le moins de problème de métamérisme ? Il faut choisir le pigment — ou le mélange de pigments — qui a la courbe de réflectance la plus semblable à celle du pigment à remplacer. La figure 18 (a, b, c) montre des spectres de réflectance de bleus anciens et modernes. On constate qu'ils se répartissent en deux familles, les uns réfléchissant dans le rouge, et les autres non (Staniforth, 1985). La figure 18d montre que, dans le cas de l'azurite, on y arrive avec les pigments dont le spectre est pauvre en rouge.

## 8. CONCLUSION

La couleur est un domaine inhabituel et difficile, mais extrêmement riche en possibilités. L'étude des couches picturales ne peut que gagner à l'aborder plus sérieusement.

F. DELAMARE

École Nationale Supérieure des Mines de Paris.



*Fig. 18. Spectres de réflectance de pigments et colorants bleus fraîchement préparés :*  
*a. utilisés par les anciens ;*  
*b. modernes, à faible réflectance dans les rouges ;*  
*c. modernes, à forte réflectance dans les rouges ;*  
*d. choix de pigments modernes pouvant remplacer (lors d'une restauration) un mélange azurite - oxyde de titane sans risquer le phénomène de métamérisme. D'après Staniforth, 1985.*

## BIBLIOGRAPHIE

*Ouvrage généraux sur la colorimétrie :*

## • d'un coloriste :

FILLACIER, J., 1986, *La pratique de la couleur*, Dunod, Paris.

## • de physiciens :

BILLMEYER Jr., F.W., SALTZMAN, M., 1981, *Principles of Color Technology*, John Wiley and sons, New-York, 2<sup>e</sup> ed.

ROIRE, J., 1987, *La couleur*, Erec, Paris.

*Sur des points particuliers cités :*

DELAMARE, F., 1983, *Étude physico-chimique et colorimétrique des rouges et des violets de Léro*, dans *Revue d'archéométrie*, 7, p. 85-98.

PASTOUREAU, M., 1987, *Vers une histoire de la couleur bleue*, dans *Sublime Indigo*, Office du Livre, Fribourg, p. 18-27.

PASTOUREAU, M., 1983, *Et puis vint le bleu*, dans *Europe*, 654, p. 43-50.

PASTOUREAU, M., 1986, *Les couleurs aussi ont une histoire*, dans *L'histoire*, 92, p. 46-54.

STANIFORTH, S., 1985, *Retouching and Color Matching, the Restorer and Metamerism*, dans *Studies in Conservation*, 30, p. 101-111.