

CHAPITRE 9 À propos de la couleur

Je sais que le secret le plus profond et le plus essentiel de l'action des couleurs demeure invisible même pour l'œil et ne peut être contemplé que par le cœur. L'essentiel se dérobe aux formules.

JOHANNES ITTEN*

IL n'existe pas aujourd'hui de théorie définitive de la couleur. L'approche du phénomène de la vision chromatique hésite entre des systèmes physiques et des systèmes psychologiques ; elle en appelle aujourd'hui à l'optique, science qu'elle avait tenue à l'écart pendant des siècles. La couleur tient de l'art et de la science, de la physique et de la psychologie, elle est à la limite de deux cultures ; pour la comprendre, nous devons connaître les différents domaines où elle s'établit. C'est à ISAAC NEWTON que l'on doit la première théorie de la couleur des corps. Dans une publication de 1671 il expose les résultats d'expériences effectuées à l'aide d'un prisme. La lumière « blanche » est un mélange de lumières « homogènes » (nous dirions aujourd'hui monochromatiques). Il distingue sept teintes dans les couleurs du spectre : rouge, orangé, jaune, vert, bleu, indigo, violet. Mais l'« indigo » est une couleur inventée car cette classification est totalement arbitraire et surtout due au fait que, NEWTON étant franc-maçon, « 7 » était pour lui un chiffre symbolique. Il voulait aussi faire un parallèle avec la musique : il y a aussi 7 notes dans la gamme chromatique.

L'influence de NEWTON a été considérable, elle s'est étendue à la psychologie des couleurs et se fait sentir encore de nos jours ; le blanc se décomposant en sept couleurs, ces sept couleurs mélangées redonnant du blanc, cette couleur est donc la reine des couleurs, à elle se rapportent toutes les autres ; elle est devenu le symbole de la complétude, de la pureté.

En opposition radicale avec NEWTON, s'élevant contre l'aveugle axiomaticisme de la méthode scientifique, les catégories proposées par GOETHE en 1810 dans son livre sur la théorie des couleurs (couleurs physiologiques, physiques, chimiques), complétées par celles de l'harmonie, du contraste et de la différence chromatique, font du discours sur la couleur un discours issu de l'observation des « objets-dans-la-lumière » en même temps qu'une réflexion sur les natures respectives de la couleur et de la lumière.

La couleur est un phénomène trop complexe pour que ce chapitre puisse être exhaustif ; j'espère qu'il pourra cependant être un guide permettant de s'y retrouver dans la littérature abondante et complexe qui traite du sujet.

**Art de la couleur, Dessain et Tolra (1985).*

9.1 Première expérience

Celle de Helmholtz-Beuham

Dekany acta technica 1961 ou 62 No 1-2 pp 47-71

9.2 Deuxième expérience

gélatine Wratten bleu C5 No 47, vert B, no 58, rouge A No 25 d'après glafkidès
ou 47B +2B, 15+57,29

Celle des trois filtres colorés + Une quatrième lumière blanche

9.3 La couleur du point de vue physique

C'est le point de vue le plus simple.

9.3.1 La lumière

Les physiciens considèrent la lumière comme un phénomène périodique transportant de l'énergie. Pour une lumière monochromatique de longueur d'onde λ et donc de fréquence $\nu = c/\lambda$, le quantum d'énergie est, comme l'a montré EINSTEIN en 1905, $E = h\nu$, h étant la constante de PLANCK. Les longueurs d'onde sont interprétées par l'œil et le système visuel (ou par des instruments spécifiques) comme de la lumière ayant une certaine couleur.

9.3.2 Les sources de lumière

Les sources de lumière se rangent principalement dans deux catégories : celles d'origine thermique et celles dues à la luminescence dont l'origine se trouve dans la désexcitation radiative d'atomes ou de molécules.

Rayonnement d'origine thermique

Un corps rayonne de l'énergie E sous forme radiative dont la longueur d'onde dépend de sa température. Pour un *corps noir* tout théorique, la *loi de PLANCK* spécifie que le flux énergétique élémentaire par m^2 de source, ou radiance possède un spectre continue dont la densité spectrale est donnée par :

$$E(\nu)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1} d\nu \quad (9.1)$$

L'énergie totale émise est obtenue en intégrant l'équation précédente et ne dépend que de la température ; ce qui conduit à la *loi de STEFAN* :

$$E = \sigma T^4 \quad (9.2)$$

ou $\sigma = 5,710^{-16} \text{ W/m}^2$ (constante de STEFAN).

Pour une température donnée on peut rechercher le maximum de la formule de PLANCK et on trouve la relation suivante, appelée *loi de WIEN* :

$$\lambda_{max}(nm) \times T(K) = 2,886 \cdot 10^6 \quad (9.3)$$

On voit donc que plus le corps rayonnant est chaud, plus la longueur d'onde de maximum du spectre émis se déplace vers les courtes longueurs d'onde. Cela permet de juger, à l'œil, de la température d'un four ou d'une pièce à forger : les expressions rouge sombre naissant, rouge cerise, etc. correspondent à des températures relativement précises.

Les lampes à incandescence sont constituées d'ampoules de verre remplies d'un gaz neutre (argon, krypton ou xénon) et d'un filament de tungstène que l'on porte jusqu'à une température de 3 000°. Leur spectre de couleur est donc plus rouge que celui du Soleil, tout photographe en a fait l'expérience lorsqu'il a voulu fixer sur la pellicule une scène familiale éclairée au tungstène.

Rayonnement de luminescence

On trouve différents types de rayonnement de luminescence :

Cathodoluminescence : due au bombardement électronique ;

Triboluminescence : résultat d'actions ou de contraintes mécaniques ;

Chimiluminescence : accompagnant certaines réactions chimiques ;

Électroluminescence : certains matériaux émettent de la lumière lorsqu'ils sont soumis à des champs électriques (diodes électroluminescentes) ;

Photoluminescence : l'excitation est produite par l'absorption d'un rayonnement électromagnétique. On distingue : la *fluorescence*, phénomène qui cesse en même temps (10^{-6} s) que l'action des radiations excitatrices et la *phosphorescence*, qui se prolonge après l'excitation qui la provoque (d'une dizaine de seconde en moyenne).

La désexcitation radiative d'un atome conduit à l'émission d'un photon. On obtient ainsi un spectre de raies dans les tubes néon ; en fait, dans ces sources d'éclairage, la décharge électrique effectuée dans un mélange de gaz rare et de vapeur de mercure produit des électrons et des photons durs (raies 185 et 254 nm du mercure essentiellement) qui excitent des « phosphores » comme le borate de cadmium, le silicate de zinc, le tungstate de calcium et bien d'autres encore déposés à la surface du tube. Ces composés minéraux, additionnés d'impuretés activantes (antimoine, plomb, manganèse, étain) émettent des spectres continus de fluorescence dont le maximum se situe à diverses longueurs d'onde (rouge, vert et bleu pour les trois cités). Le spectre d'émission du tube fluorescent est donc toujours composé de raies, dans le visible, de l'émission de la vapeur de mercure et du spectre continu de la fluorescence.

Le Soleil constitue la principale source de lumière, mais sur Terre nous ne recevons pas toute ses composantes. Les fréquences les plus élevées (de longueur d'onde inférieure à 300 nm) sont arrêtées par la couche d'ozone de la stratosphère.

L'énergie reçue au niveau du sol est d'environ 1 kW/m^2 et sa composition spectrale est voisine de celle d'un corps noir à 6 200 K.

9.3.3 La température de couleur

C'est la température à laquelle il faut porter un corps noir pour qu'il ait le même spectre d'émission que le corps étudié.

L'intérêt de cette notion est qu'elle permet de fixer avec un seul nombre le spectre de la lumière émise.

L'unité de mesure de la température de couleur est soit le Kelvin, on l'écrit T_c , soit le *mired* (micro reciprocal degree), défini comme étant égal à $10^6/T_c$. On trouvera quelques températures de couleur usuelles dans le tableau 9.1.

TAB. 9.1 – Quelques températures de couleur

bougie de paraffine	1 925 K
platine en fusion	2 042 K
lampe à incandescence à filament de carbone	2 100 K
lampe à incandescence à filament de tungstène	3 200 K
arc électrique au charbon	3 800 K
Soleil moyen	5 400 K
tube à éclair de flash électronique	5 600 K
lumière du jour	6 000 K
lumière du ciel bleu	12 000 K

9.3.4 Efficacité lumineuse spectrale

L'œil n'est pas un appareil de mesure capable de chiffrer des sensations mais c'est un instrument extraordinairement sensible pour effectuer des comparaisons.

Supposons que nous ayons une source monochromatique de luminance¹ énergétique $L_e(\lambda)$ sur un fond de luminance $L'_e(\lambda)$ de même longueur d'onde. Un observateur saura apprécier la différence des luminances. De plus l'appréciation visuelle variera dans le même sens que la luminance énergétique. On peut donc écrire :

$$L(\lambda) = K \cdot V(\lambda) \cdot L_e(\lambda) \quad (9.4)$$

– $L(\lambda)$ est une grandeur caractérisant la sensation de luminosité. On l'appelle la luminance lumineuse ;

– K est un facteur de proportionnalité qui ne dépend que des unités choisies ;

– $V(\lambda)$ est un coefficient relatif à la sensibilité de l'œil de l'observateur.

Supposons maintenant que nous essayons de comparer deux luminances ayant des longueurs d'onde différentes (mais pas trop pour ne pas que les différences de teinte influent) et faisons varier l'énergie de sorte qu'elles procurent les mêmes sensations. On aura alors :

$$L(\lambda_1) = L(\lambda_2) = K \cdot V(\lambda_1) \cdot L_e(\lambda_1) = K \cdot V(\lambda_2) \cdot L_e(\lambda_2) = L \quad (9.5)$$

En balayant ainsi tout le spectre, on a pu constater que $L_e(\lambda)$ est minimal pour le jaune-vert de longueur d'onde 555 nm. Ce qui signifie que ce rayonnement monochromatique est particulièrement efficace pour provoquer une sensation de luminosité. En posant $V(555 \text{ nm}) = 1$, on a $V(\lambda) = L_e(555 \text{ nm})/L_e(\lambda)$.

La courbe représentative des variations de V en fonction de la longueur d'onde s'appelle *courbe d'efficacité lumineuse relative spectrale* et est représentée sur la figure 9.1.

Qu'en est-il des rayonnements complexes, non monochromatiques ? Imaginons que nous ayons réussi à égaler deux à deux les luminances lumineuses monochromatiques :

$$L_1 = L_2; \quad L_3 = L_4; \quad \dots \quad ; L_{2n-1} = L_{2n} \quad (9.6)$$

¹Ainsi que nous le verrons au paragraphe suivant, la luminance est la puissance émise par unité d'angle solide et par unité de surface émissive.

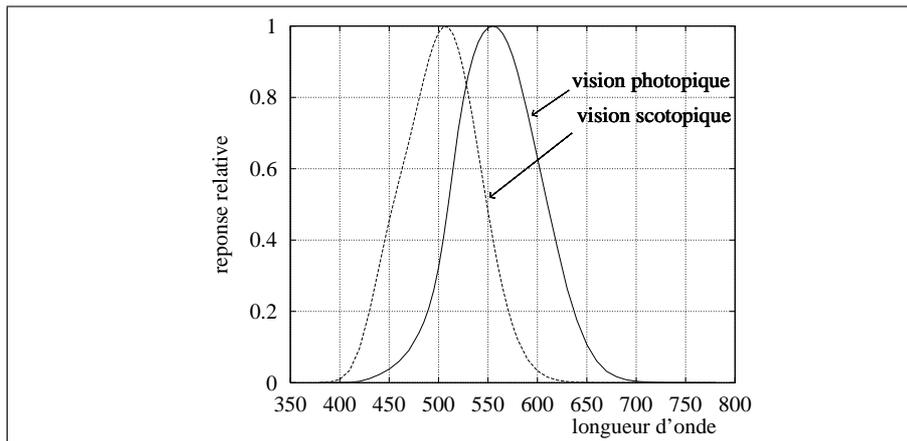


FIG. 9.1 – Sensibilité de l’œil moyen. À énergie transportée égale, c’est la radiation de 555 nm qui impressionne le plus la rétine (les termes photopique et scotopique sont relatifs respectivement à la vision diurne et nocturne).

Conservera-t-on l’égalité en composant d’une part tous les rayonnements d’indice pair et d’autre part tous les rayonnements d’indice impair ?

$$\sum_{i=1}^n L_{2i-1} = \sum_{i=1}^n L_{2i} \quad (9.7)$$

Oui ! Les expériences l’ont vérifié avec plus ou moins d’exactitude. Toute la photométrie repose sur ce postulat d’additivité appelé *loi d’ABNEY*.

On peut donc passer des unités énergétiques aux unités visuelles par des formules du genre :

$$L = K_m \int_{380}^{780} V(\lambda) L_{e\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (9.8)$$

pour la luminance, ou $L_{e\lambda}(\lambda)$ est la densité spectrique² de L_e .

La valeur de K_m actuellement adoptée est de $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Ce nombre n’est pas simple, pourquoi pas 2 ou π ? Cela résulte du fait que les unités lumineuses ont été établies empiriquement avant que leur lien avec les unités énergétiques ait été bien défini.

9.3.5 Les unités

Il m’a fallu un bout de temps avant de m’y retrouver dans les unités ; il y en a liées à la physique et d’autres à la physiologie de la vision. On consultera avec profit l’ouvrage de l’Association Française de l’éclairage [dl91].

Le tableau 9.2 vous en propose quelques unes, les plus utilisées ; je n’y ai mis que les unités métriques, même si des choses comme le footcandle sont en fait très utilisées par le spécialiste.

Le *flux lumineux* décrit la puissance rayonnée par la lumière visible modifiée par la réponse de l’œil d’un observateur de référence défini par la CEI pour la vision photopique (diurne).

L’*intensité* est la quantité de flux lumineux émis par une source par unité d’angle solide dans une direction déterminée (se mesure en candela).

²On note densité spectrique $L_{e\lambda}(\lambda)$ de L_e la valeur de $dL_e/d\lambda$.

TAB. 9.2 – Quelques unités

GRANDEURS	DÉFINITIONS	Grandeur énergétique		Grandeur visuelle	
		Symbole	Unité	Symbole	Unité
Flux	puissance totale émise par la source	F_e	W	F	lumen lm
Intensité	puissance émise par unité d'angle solide	$I_e = F_e/\Omega$	W/sr	$I = F/\Omega$	candela cd
Luminance	intensité par unité de surface apparente émissive	$L_e = I_e/A$	W.sr ⁻¹ .m ⁻²	$L = I/A$	cd/m ²
Éclairement	puissance reçue par unité de surface	$E_e = F_e/S$	W/m ²	$E = F/S$	lux lm/m ²

La *luminance* (nom moderne de la *brillance*), est l'effet visuel créé par le flux lumineux, que le flux provienne directement d'une source de lumière ou qu'il résulte du renvoi par une surface réfléchissante. C'est donc, par définition, l'intensité lumineuse émise dans un angle solide égal à l'unité (cône de 1 radian d'ouverture) par m² de la "projection" de la source (Luminance de 1 cd / m² = 1 nit ou apostilb ; Luminance de 1 cd / cm² = 10⁴ nits = 1 stilb).

9.4 La vision des couleurs

Le vocabulaire utilisé pour désigner les couleurs est arbitraire et dépend des professions.

La couleur d'un objet résulte, en première approximation, du produit, longueur d'onde par longueur d'onde, du spectre de la lumière par le spectre de réflexion de la surface et par le spectre de sensibilité du récepteur. Si la distribution spectrale de la lumière change, passant d'un éclairage avec des ampoules à incandescence à un éclairage en lumière naturelle par exemple, alors l'effet sur le système visuel est modifié et la couleur perçue varie. D'autre part, si le coefficient de réflexion de la surface d'un objet dépend de la longueur d'onde, alors la couleur change sous différents éclairages (c'est le *métamérisme*).

Et de plus des facteurs psychologiques interviennent parfois dans notre appréciation des couleurs. Ainsi, si nous savons qu'une surface est blanche, nous la verrons blanche même si, comme dans un laboratoire photographique, elle est éclairée par une lampe au sodium et ne peut donc nous renvoyer qu'une lumière jaune.

Préciser le vocabulaire et poser, malgré les difficultés, les bases d'une étude physique des couleurs fut une tâche difficile et qui demeure encore inachevée.

9.4.1 Le récepteur visuel humain

L'œil est un instrument d'optique constitué d'un cristallin, qui joue le rôle de lentille convergente, et d'une rétine sur laquelle se forment les images du monde extérieur. La voie optique principale comprend donc :

- un étage de réception, occupant la couche externe de la rétine ;
- un étage de traitement et de transmission, comprenant la couche interne de la rétine, le nerf optique, le chiasma, les bandelettes optiques, les fibres thalamo-corticales ;

- un étage de perception : le cortex occipital.

L'étage de réception est constitué par les quatre premières couches de la rétine :

1. la couche pigmentaire, rangée de cellules et de pigments évitant les diffusions parasites de la lumière ;
2. la couche bacillaire, constituée par les extrémités photosensibles des cônes et des bâtonnets. Chez les mammifères la lumière traverse successivement les diverses couches de la rétine avant d'atteindre les cellules photosensibles cônes et bâtonnets. Chez les céphalopodes (pieuvre, etc.) l'architecture est « mieux » conçue : ce sont les terminaisons photosensibles qui sont atteintes en premier par les rayons lumineux.
Chez l'homme il y a 120 millions de bâtonnets et 5 millions de cônes couvrant une surface angulaire de moins de 10 degrés (fovéa). Un million de fibres nerveuses constituent le nerf optique ;
3. la membrane limitante externe ;
4. la membrane granuleuse externe formée des corps des cellules visuelles.

L'étage de transmission comprend :

1. la couche granuleuse interne représentée par les cellules *bipolaires*. Les dendrites de ces cellules font des connexions sur plusieurs cellules visuelles (sauf au niveau de la fovéa où la connexion est de un pour un). Il existe aussi dans cette couche des cellules d'association dites *amacrines* ;
2. la couche plexiforme interne formée par les axones des cellules bipolaires ;
3. la couche formée par les corps des cellules ganglionnaires. Ces cellules reçoivent les axones de plusieurs cellules bipolaires, leurs propres axones forment le nerf optique.
4. enfin, la membrane hyaloïde du corps vitré.

L'étage de perception :

1. les fibres optiques sont tout d'abord reçues par un relais, le *corps genouillé externe*, qui les renvoie dans l'aire sensorio-visuelle du cortex visuel, région située à la partie postérieure et en bas du cerveau. Cette région est appelée *aire striée* et elle entoure un repli de la surface interne du cerveau, la *scissure calcarine* ;
2. l'aire striée constitue une réplique de la rétine. Plus de cent millions de cellules photosensibles, cônes et bâtonnets, débitent leurs messages nerveux sur le million de fibres du nerf optique. À la sortie du *corps genouillé* et dans le cortex visuel, ce nombre augmente considérablement, pour atteindre 1 400 millions de neurones dans le cortex. Ainsi, chaque millimètre carré de la fovéa est représenté par cinq centimètres carrés de la surface corticale.

À tout cela il faut ajouter un retour d'information venant du cortex et qui prend effet dans les cellules bipolaires, au niveau des amacrines. Il serait donc imprudent et présomptueux d'affirmer que tout est éclairci.

9.4.2 Vision diurne et vision nocturne

La rétine humaine, comme celle de beaucoup d'animaux, est composée de cônes qui servent à la vision diurne (photopique) et à celle des couleurs, ainsi que de bâtonnets qui sont les seuls à

être utilisés la nuit (vision scotopique). Ces derniers sont de 100 à 500 fois plus sensibles que les cônes.

J.E. PURKINJE (1787–1869) expliqua pourquoi la courbe de visibilité relative $V_\lambda = f(\lambda)$ se déplace vers les courtes longueurs d'onde quand on passe de la vision photopique à la vision scotopique : le rayonnement rouge ($\lambda = 600$ nm) excite les cônes ($V_\lambda = 0,631$) et provoque peu d'excitation sur les bâtonnets ($V_\lambda = 0,033$) alors que le rayonnement bleu-violet (450 nm) agit peu sur les cônes ($V_\lambda = 0,038$) et excite en revanche les bâtonnets ($V_\lambda = 0,455$).

L'effet Purkinje est d'une grande importance photométrique, toutes les grandeurs lumineuses perdent leurs valeurs pratiques dans les domaines où se manifestent cet effet. Il faut en effet en vision scotopique, beaucoup plus de lumière rouge pour égaler l'impression visuelle que provoque une certaine quantité de lumière bleue, qu'en vision photopique. Les objets faiblement éclairés apparaissent plus bleus qu'ils ne sont en réalité, les rouges apparaissent très sombres.

Le rendu des couleurs est donc fonction de la luminance. On estime le seuil inférieur de la vision photopique à environ 1 cd/m^2 .

9.4.3 Théories de la vision des couleurs

En 1801 YOUNG suppose qu'il existe dans la rétine trois types de capteurs :

« Il est presque impossible de concevoir que chaque point de la rétine contienne une infinité de particules susceptible de vibrer à l'unisson avec une ondulation lumineuse déterminée, il devient nécessaire de supposer ce nombre limité, par exemple à trois couleurs principales : rouge, jaune et bleu et chaque filament sensible du nerf peut consister en trois portions, une pour chaque couleur principale »

En 1807, YOUNG modifia sa théorie au profit du rouge, du vert et du violet ; HELMOLTZ reprit sa théorie en 1853.

Une théorie plus moderne, due à GRANIT, suppose que la rétine est divisée en unités receptrices, chacune comprenant un ensemble de cônes et de bâtonnets et débitant sur une même cellule ganglionnaire, ou sur plusieurs qui synchronisent leurs influx nerveux. Ces unités se divisent en dominateurs et en modulateurs. Les *dominateurs*, les plus nombreux, présentent une large sensibilité spectrale, ils sont les transducteurs de la luminance. Les *modulateurs* possèdent une sensibilité spectrale sélective qui confirme la discrimination colorée et l'hypothèse de YOUNG.

POLYAK, de son côté, suggère que chaque cône contient des quantités égales des trois pigments et que la décomposition photochimique produit dans la cellule réceptrice des modifications différentes, reçues par les cellules bipolaires. Les bipolaires qui touchent la base du pied des cônes seraient excitées par la décomposition du rouge, les bipolaires du type brosse par le vert et les bipolaires du type balai correspondraient au bleu.

Mais des expériences récentes (1975), étudiant les pigments visuels par réflexion au fond de l'œil ou par microspectrophotométrie ont montré que les bâtonnets contenaient un pigment, la *rhodopsine*, et que les cônes en contenaient trois dont le *chlorolabe* absorbant dans le vert-jaune (max à 530 nm) et l'*érythrolabe* absorbant dans le rouge (max à 570 nm). Le pigment bleu absorbant de façon très sélective à 440 nm (voir la figure 9.2).

Ces expériences sont corroborées par des résultats de mesures effectuées par GRANIT à l'aide de microélectrodes. Notons que la rhodopsine, ou pourpre rétinien, se trouve dans l'œil de tous les vertébrés.

Les signaux provenant des cônes sont directement transmis des cellules bipolaires aux cellules ganglionnaires et ces dernières changent leur caractère, jusque là trichrome, en un système de

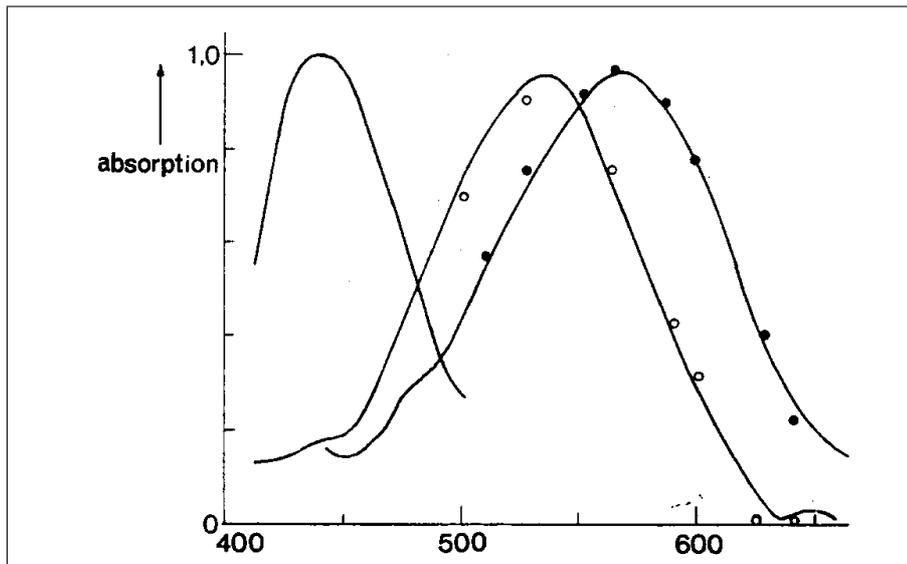


FIG. 9.2 – Absorption moyenne des trois pigments des cônes humains. La coïncidence des résultats obtenus par différentes méthodes montre bien que chaque cône ne contient qu'un seul pigment.

trois groupes de réponses antagonistes. Le premier concerne seulement le niveau de luminance et présente l'opposition noir-blanc, les deux autres sont liés à la perception des couleurs et agissent par les oppositions rouge-vert et bleu-jaune.

Ces réponses des cellules ganglionnaires sont aussi celles enregistrées dans le corps genouillé externe où il existe en effet quatre types de cellules antagonistes : $+V-R$, $+R-V$, $+B-J$, $+J-B$; $+V-R$ signifie que la cellule stimule le vert et inhibe le rouge. Cette coïncidence des sensibilités spectrales des photorécepteurs de la rétine d'une part et des cellules du corps genouillé d'autre part, fournit les éléments nécessaires au passage du système trichrome de YOUNG-HELMOLTZ au système des couples rouge-vert, bleu-jaune et noir-blanc de HERING.

À cet acheminement direct de l'information, s'ajoutent deux autres actions d'importance capitale pour la vision des couleurs exercées par les cellules horizontales et amacrines. Les cellules horizontales ont un champ récepteur étendu et servent de « contrôle de gain », d'ajustement automatique de la sensibilité, couvrant ainsi une plage allant de 1 à 10^9 . Les cellules amacrines permettent, elles, l'ajustement de la vision à la composition spectrale de l'éclairage.

Il est plaisant de remarquer que pour la seule raison de compatibilité entre la télévision noir et blanc et celle couleur (et de limitations en bande passante), les signaux vidéos sont codés en un signal non antagoniste noir-blanc compatible avec le système monochrome et deux antagonistes rouge-vert (dR) et bleu-jaune (dB) fournissant la couleur.

Tous ces mécanismes sont synthétisés dans le modèle de WALRAVEN représenté sur la figure 9.3. Les signaux trichromes conformes à la théorie de YOUNG-HELMOLTZ sont transposés en signaux R-V et J-B ainsi qu'en un signal de luminance suivant la théorie de HERING. Le signal de luminance est proportionnel à la somme des trois signaux monochromes des récepteurs rétiniens et est composé à des signaux de luminance provenant des récepteurs voisins.

9.4.4 Anomalies de la vision colorée

La couleur, étant une sensation, n'a pas d'existence matérielle. Elle est le résultat d'un mécanisme psychophysique encore obscur, mais assez complexe et instable pour qu'il subisse l'effet de phé-

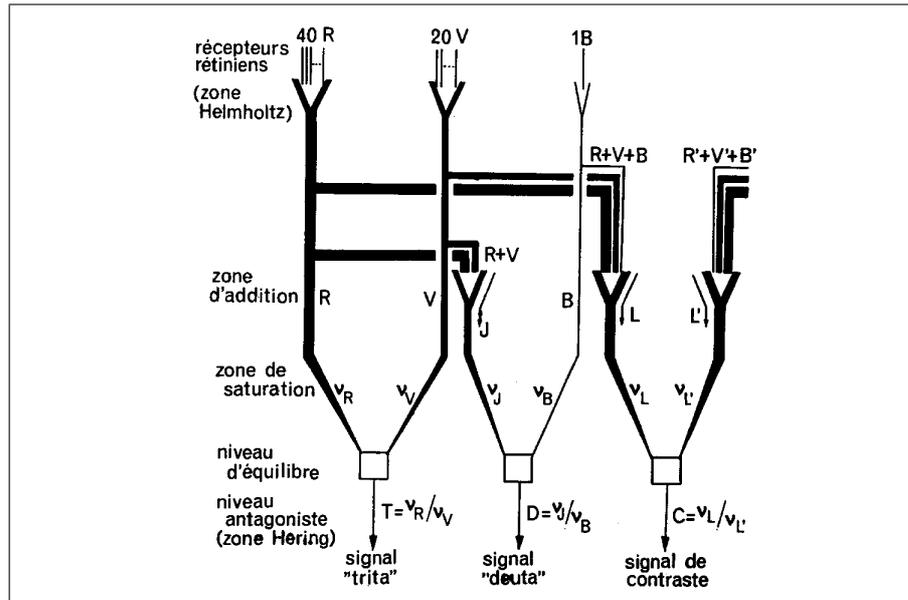


FIG. 9.3 – Schéma de WALRAVEN de la réception rétinienne et du traitement des radiations visibles dans le mécanisme de la vision des couleurs.

nomènes secondaires divers. Newton l'avait bien vu en 1730, il y a plus de deux cents ans :

« *The rays [of light] are, to speak properly, not coloured. In them is nothing else than a certain power and disposition to stir up a sensation of this or that colour* »

Anomalies chromatiques. Lorsque deux composantes et non trois déterminent la vision des couleurs, on a affaire au dichromatisme signalé par DALTON dès 1794.

Les yeux achromatopes sont totalement insensibles aux couleurs : ils ne voient que des images en noir et blanc. Par contre les yeux atteints de *daltonisme* différencient mal certaines régions du spectre. C'est une maladie d'origine génétique qui touche 8% des hommes et 0,5% des femmes. Le plus souvent il s'agit d'un simple trichromatisme anormal se traduisant par une appréciation incorrecte du rapport des couleurs primaires, notamment chez les *trichromates deutéranopes* (5%) dont la vue est déficiente dans le vert, et les *trichromates protanopes* dont la vue est déficiente dans le rouge. Lorsque la distinction du rouge et du vert fait totalement défaut on se trouve alors en présence de dichromates protanopes (pas de rouge), deutéranopes (pas de vert), ou plus rarement tritanopes (pas de bleu ni de jaune assimilés à du gris). Le total des dichromates ne dépasse pas 1,5% de la population masculine, contre 6% pour les trichromates. Toutes ces anomalies sont dues à des déficiences pigmentaires de la rétine.

Effet de Bezold-Brücke. Découvert en 1873, c'est un effet contraire à celui de PURKINJE, car il se situe au niveau supérieur de l'échelle des luminances. Les couleurs tendent à se déplacer vers deux pôles d'attraction : le jaune et le bleu. Le vert et le rouge se concentrent sur le jaune tandis que le bleu-vert et le violet se centrent sur le bleu.

Effet Stiles-Crawford. Découvert en 1933, il concerne l'influence de l'excentricité des rayons incidents par rapport au centre de la pupille, leur efficacité diminuant au fur et à mesure que leur point d'entrée s'en éloigne. L'équilibre chromatique ne semble pas en être affecté.

Persistance inégale des impressions colorées. Le rouge intense persiste moins longtemps que le bleu et le vert, mais le rouge sombre persiste davantage. Une image résiduelle blanche devient rapidement verdâtre, puis grise, violacée et finalement rougeâtre avant de disparaître.

Contraste simultané. Une couleur est appréciée différemment suivant qu'elle est considérée seule ou en présence d'autres couleurs. C'est le facteur qui fausse le plus notre jugement. Par exemple, un objet blanc sur fond bleu apparaît jaunâtre. Mais il faut considérer non seulement le ton des plages adjacentes, mais aussi leurs brillances et leurs topographies. On trouvera dans le magnifique livre de ITTEN [Itt85] et aussi dans celui de MANTE [Man77] des exemples édifiants.

Influence du champ périphérique. L'éclairement de celui-ci modifie la saturation et le contraste des différentes plages colorées. Ainsi un encadrement clair accroît le contraste des densités claires et moyennes, tandis qu'il réduit celui des ombres.

Contraste suggestif. ABNEY a remarqué, il y a longtemps, que lorsque l'on projette sur un écran une zone colorée contiguë à une zone blanche, cette couleur se trouve modifiée tandis que le blanc se teinte du ton complémentaire. Par exemple, si la couleur primitive est rouge, la couleur se modifie en écarlate et le blanc devient gris bleu-vert.

Variations de la courbe de visibilité. J.S. PRESTON, A. DRESSLER puis KOLRAUSCH ont observé que la sensibilité visuelle aux différentes radiations subit des variations périodiques, journalières et hebdomadaires pouvant atteindre 5%. Ce phénomène paraît dû aux modifications physiologiques liées à l'alimentation.

9.5 Colorimétrie

La couleur étant un effet (je me répète, mais c'est fondamental) perçu par un observateur, est déterminée par l'interaction de trois composantes : la source de lumière, l'objet et l'observateur.

La colorimétrie est la technique de mesure des couleurs, elle permet la reproduction de toute couleur à partir de données numériques.

Les peintres, les teinturiers, les imprimeurs donnent le nom de « couleur » aux matières qu'ils emploient pour produire des colorations. En fait, comme nous le verrons, il serait plus exact de parler de « teinte ».

Le livre de Glafkidès [Gla87] représente une bonne et courte introduction à la colorimétrie. Celui de Billmeyer [BS81] est sans doute celui qu'il faut lire pour débiter, avec celui de Kowaliski [Kow78].

9.5.1 Couleurs du spectre

L'ensemble des couleurs forme une suite continue et les correspondances qu'indiquent le tableau 9.3 ne sont qu'approximatives : rien ne permet de préciser où se trouve la transition entre le pourpre et le bleu par exemple. Les limites du spectre n'ont pas les valeurs précises que suggère le tableau, elles dépendent de la puissance de l'éclairement et, bien sûr, de l'observateur.

On appelle couleurs complémentaires deux couleurs dont le mélange produit une sensation de blanc.

Le coefficient de visibilité, ou efficacité spectrale, indique si une couleur est très visible ; le jaune est plus visible que le rouge, le rouge que le bleu. Les valeurs numériques indiquées ici sont les résultats de nombreuses mesures effectuées par GIBSON et TYNDALL. Les noms des teintes sont tirés de Kowaliski [Kow72]. Celui qui désire des données plus précises, que ce soit pour les coefficients de visibilité photopique et scotopique, les trouvera dans la bible que représente [WS82].

La colorimétrie est fondée essentiellement sur l'hypothèse de la *trivariance visuelle*.

TAB. 9.3 – Définition des couleurs et efficacité lumineuse spectrale

couleurs	longueur d'onde approximatives (nm)	couleurs complémentaires	efficacité spectrale
violet extrême	400		0,4
violet moyen	420	vert-jaune	4
violet- bleu	440		23
bleu moyen	470	jaune	91
bleu-vert	500		323
vert moyen	530	pourpre	862
vert-jaune	555		1000
vert-jaune	560		995
jaune moyen	580	bleu	870
jaune-orangé	590		757
orangé moyen	600	bleu-vert	631
orangé-rouge	610		503
rouge moyen	650	vert-bleu	107
rouge extrême	780		0,01

9.5.2 Trivariance visuelle

Rayonnement monochromatique :

Il suffit de deux grandeurs pour le caractériser complètement : la longueur d'onde et le flux énergétique F_e (Watt) par exemple ou encore une grandeur associée, la luminance énergétique L_e . Dans ce cas le système visuel est bivariant.

À partir de ces deux grandeurs on peut déterminer l'effet du rayonnement sur un récepteur tel que l'œil puisqu'on connaît la courbe de sensibilité spectrale du système visuel humain V_λ . C'est ainsi que l'on a introduit plus haut une nouvelle grandeur, le flux lumineux F exprimé en lumens (lm), relié au flux énergétique F_e par la relation : $F(\lambda) = K_m V_\lambda P_e(\lambda)$

Cas général :

L'œil ne reconnaît pas les différentes longueurs d'onde qui constituent un mélange. Il faut alors trois grandeurs pour caractériser le rayonnement : le système visuel humain est trivariant. Outre le flux lumineux F (lm), il faut connaître la longueur d'onde dominante λ_d et le facteur de pureté colorimétrique p_c :

$$p_c = \frac{L_{\lambda_d}}{L_{\lambda_d} + L_w} \quad (9.9)$$

où L_{λ_d} désigne la luminance de la radiation monochromatique dominante et L_w la luminance de la lumière blanche de référence (On a fait intervenir une lumière théorique, dite à spectre d'égale énergie, désignée par la lettre W (pour l'anglais *white* ou l'allemand *weiss*). Comparée à la lumière du Soleil, elle contient un peu plus de rouge et un peu plus de violet ; sa couleur est donc légèrement pourpre).

La longueur d'onde dominante λ_d ne doit pas être confondue avec celle du maximum de la répartition spectrale dont elle diffère en général (nous verrons que pour les pourpres λ_d n'existe pas).

En effet c'est la qualité spécifique de la sensation due à une radiation lumineuse ou à un ensemble de radiations. La longueur d'onde dominante correspond à ce qu'on appelle couramment la *teinte* de la lumière considérée, ainsi l'indication $\lambda_d = 580 \text{ nm}$ peut remplacer l'expression « teinte orangé ». Chez tous les sujets la teinte varie beaucoup moins vite dans le rouge et le violet que dans le jaune ou le bleu-vert ; c'est une question de plus petit écart appréciable de longueur d'onde dominante, la vision humaine est très sensible dans le jaune.

Le facteur de pureté colorimétrique p_c , que l'on l'appelle plus fréquemment la *saturation* est donc égal à 1 pour toute radiation monochromatique, la couleur correspondante est dite *saturée* ; il diminue à mesure que la couleur est de plus en plus lavée de blanc (ce qui affaiblit sa coloration) et il est nul pour la lumière blanche.

La saturation mesure en quelque sorte la distance de cette teinte à un gris de même luminosité.

Une teinte *vive* correspond à une valeur de $p_c \approx 1$, une teinte *pâle* correspond à des valeurs de $p_c \ll 1$.

En résumé, on spécifie donc les trois grandeurs suivantes :

- la luminance totale $L = L_{\lambda_d} + L_w$;
- la longueur d'onde dominante λ_d ;
- le facteur de pureté colorimétrique ou saturation $p_c = L_{\lambda_d}/L$.

Ces trois grandeurs, luminosité, teinte et saturation caractérisent entièrement un faisceau coloré ; la première, L est un *coefficient photométrique* alors que les deux dernières, λ_d et p_c , sont appelées les *coefficients de chromaticité* (ou encore coordonnées de HELMOLTZ).

Lorsqu'on a affaire à des couleurs saturées, la saturation est égale à 1. La couleur est alors caractérisée par la longueur d'onde dominante, à savoir la teinte. Si on enlève le blanc à la luminance totale, on obtient la luminance de la teinte.

La teinte est une notion très importante (fig. 9.4). Elle est à la base d'une représentation géomé-



FIG. 9.4 – De l'importance de la notion de teinte, d'après Johnny Hart.

trique des couleurs que nous verrons dans un prochain paragraphe. En anglais, depuis MUNSSELL elle s'appelle *hue*.

Ainsi, on peut définir sous le nom de teinte, saturation et luminance les caractéristiques psychophysiques d'une lumière dont chacune dépend principalement de la caractéristique chromatique (λ_d, p_c) ou photométrique (L) correspondante, mais aussi parfois des deux autres. Il peut en effet arriver, par exemple, que nous considérions comme des teintes non identiques des lumières résultant du mélange en proportions diverses d'une même lumière monochromatique avec une même lumière blanche, c'est-à-dire ayant même longueur d'onde dominante, mais différant par leur facteur de pureté ou par leur luminance ; l'étude de ces questions est encore inachevée.

Cas des pourpres :

Le pourpre est un mélange de bleu et de rouge, les deux couleurs situées aux deux extrémités du spectre. Cette couleur ne peut donc exister dans le spectre. Une lumière pourpre n'a pas de longueur d'onde dominante. Les pourpres constituent les complémentaires des radiations vertes de la bande allant de 495 nm à 570 nm. On détermine la longueur d'onde complémentaire λ_c ainsi que la luminance L_c de cette longueur d'onde, qui, superposée à une luminance L de pourpre, donne une luminance L_w de la lumière blanche.

Cas du brun et du kaki

Les couleurs brune ou kaki ne sont pas des couleurs que l'on attribue facilement à un faisceau lumineux. Ce sont pourtant des couleurs qui apparaissent dans certains contextes. Si nous projetons sur une feuille blanche deux faisceaux, l'un rouge et l'autre jaune (cet dernier étant lui-même un mélange de vert et de rouge), et que nous augmentons l'éclairement ambiant (lumière blanche) nous remarquons à partir d'un certain moment que nous observons une lumière brune ! La couleur primitive orange s'est modifiée en brun-rouge et le blanc avoisinant s'est teinté de gris-bleu. C'est une autre manifestation du contraste suggestif cité plus haut. Nous pouvons facilement changer le caractère du brun. Par exemple, si nous enlevons un petit peu de vert, nous obtiendrons un brun rougeâtre de teinte chocolat ; si nous augmentons la proportion de vert, nous obtiendrons cette couleur qui est caractéristique des uniformes militaires !

9.5.3 Lumières simples, complexes, complémentaires

Les lumières simples, monochromatiques, ont, dans des conditions normales d'observation des couleurs dites pures auxquelles on donne un nom : jaune, orangé, rouge, violet, bleu, vert, etc. ainsi que nous l'avons vu plus haut.

Les lumières complexes, auxquelles on a le plus souvent affaire, sont désignées par le même nom que la couleur spectrale dont elles se rapprochent, sauf dans deux cas particuliers :

- *Lumière blanche*. Elle est obtenue par synthèse de couleurs pures ou par addition des flux de deux radiations convenablement choisies.

Quand deux radiations monochromatiques donnent par addition de la lumière blanche, elles sont dites *complémentaires*. Ainsi l'addition de deux luminances monochromatiques L_1 et L_2 peut produire une luminance blanche L_w , c'est-à-dire une sensation incolore. Dans ce cas particulier, alors que les luminances L_1 et L_2 s'ajoutent, les couleurs se neutralisent.

- Cas des pourpres. En additionnant les flux des extrémités rouges et violettes du spectre, on obtient un certain pourpre, et si l'on fait varier les proportions, une gamme de pourpres.

Il convient de remarquer que ni le blanc, ni les pourpres n'existent dans le spectre.

Lorsqu'une couleur simple ou complexe n'est pas mélangée à de la lumière blanche, on dit que cette couleur est *pure* ou *saturée*. Les couleurs spectrales sont saturées, mais les couleurs des objets sont en général plus ou moins diluées de blanc.

Une même sensation de couleur peut être provoquée par des additions de longueurs d'onde très différentes. Ainsi la couleur jaune peut être due, soit à l'observation d'une longueur d'onde monochromatique telle celle de la vapeur de sodium ($\lambda = 589$ nm), soit à une lumière blanche dans laquelle la composante bleue fait défaut. La couleur rouge du Soleil couchant est due à l'absorption des rayonnements bleus par l'atmosphère. On trouvera sur la figure 9.5 (tirée de [Kow78]) des exemples de répartition spectrale de quelques couleurs complexes usuelles.

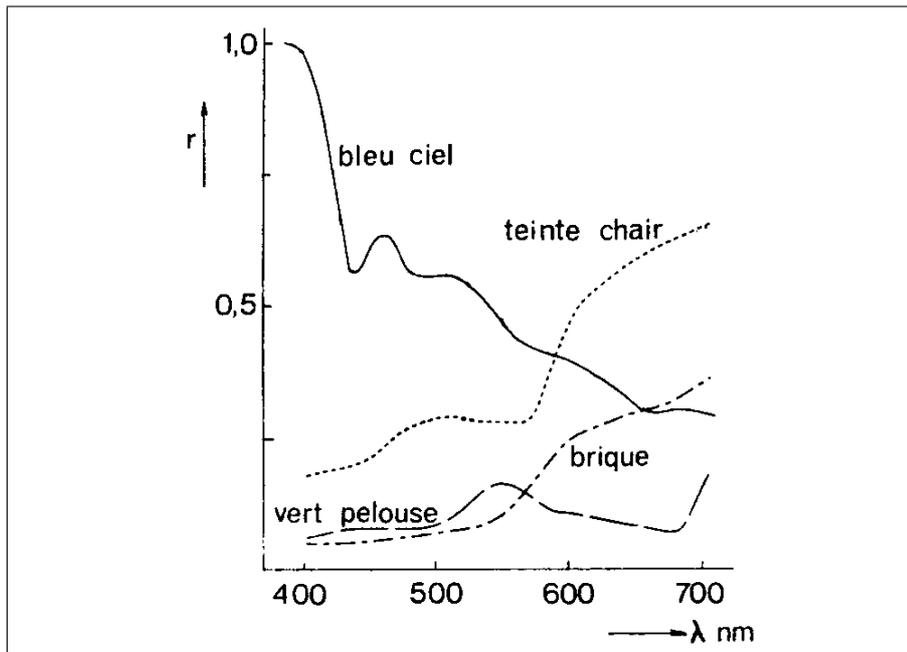


FIG. 9.5 – Caractéristiques spectrales typiques de couleurs fréquemment vues.

T. YOUNG, H. HELMHOLTZ et J. MAXWELL, les fondateurs de la colorimétrie, ont établi la loi fondamentale suivante : *l'addition de deux radiations monochromatiques (lumières pures) quelconques équivaut visuellement à l'addition d'une lumière monochromatique avec une lumière blanche*. Cette loi peut s'écrire :

$$L_1 + L_2 \equiv L_\lambda + L_w \quad (9.10)$$

À partir de l'équation colorimétrique précédente on peut généraliser en ajoutant un même terme aux deux membres de l'équation :

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_\lambda + L_3 + L_w \quad (9.11)$$

qu'on peut donc écrire :

$$L_1 + L_2 + L_3 = L_{\lambda'} + (L_w + L_{w'}) \quad (9.12)$$

On en déduit que la somme d'un nombre quelconque de luminances pures est équivalente à la somme d'une lumière blanche et d'une lumière pure, c'est la loi de GRASSMANN (1853). En définitive, deux rayonnements sont chromatiquement équivalents lorsqu'ils produisent sur le récepteur visuel normal des sensations identiques. Inversement, deux rayonnements peuvent paraître équivalents (au point de vue chromatique) et présenter des compositions spectrales très différentes.

9.6 La couleur selon Munsell

La classification géométrique spatiale des couleurs est un rêve relativement ancien puisque la première tentative connue, celle du suédois FORSIUS, remonte à 1611, dont la sphère fut imitée par RUNGE en 1810, suivie par la demi-sphère de CHEVREUL³ en 1836, du cylindre de MUNSELL

³Eugène Chevreul a proposé en 1864 avec un répertoire de 14 400 tonalités chromatiques, un catalogue universel de la couleur. Il entendait ainsi définir les couleurs, rendre compte des mélanges et indiquer les effets de leurs contrastes.

en 1905, du bicône de mélanges additifs d'OSTWALD en 1925 et du cône de la norme allemande DIN en 1953.

Le système le plus utilisé est cependant celui de MUNSELL, édité pour la première fois en 1905. Son livre a été réédité maintes fois depuis (le Munsell Renotation System) et contient actuellement environ 2 500 couleurs de référence (1 450 échantillons à surface brillante et 1 000 échantillons à surface mate).

Son système de classement est basé sur la teinte (*hue* dans son langage), la saturation (*chroma*) et la luminance (*value*).

La teinte (*hue*) : c'est la qualité de la couleur que nous désignons par les mots rouge, jaune, bleu, etc.

La luminance (*value*) : c'est la qualité de la couleur que nous désignons par les mots clair, sombre, etc. En fait, on cherche à identifier la couleur avec une certaine clarté d'un gris.

La saturation (*chroma*) : permet de décrire de combien la couleur s'éloigne d'un gris de même clarté.

Dans la notation de MUNSELL trois symboles représentent une couleur : la teinte, la saturation, la luminance. Dans cet ordre.

- la teinte est codée par un nombre et une lettre : 5Y ou 10GH par exemple. La lettre est l'initiale d'une des dix teintes majeures : *Red, Yellow, Green, Blue, Purple*, plus les cinq teintes adjacentes formées des paires comme *Green-Yellow*. Les nombres vont de 1 à 10 ;
- la luminance ensuite codée par un nombre allant de 1 à 10 ;
- la saturation enfin, séparée de la luminance par une barre diagonale (/).

Une désignation complète d'une couleur est 5R5/10 par exemple.

On trouvera sur le tableau 9.4 des exemples utilisés pour le rendu des couleurs.

TAB. 9.4 – Couleurs de référence recommandées par la CIE pour la détermination des indices de rendu des couleurs

N°	Notation Munsell approximative	couleur apparente sous la lumière naturelle
1	7,5 R 6/4	Rouge grisé clair
2	5 Y 6/4	Jaune grisé sombre
3	5 GY 6/4	Jaune-vert soutenu
4	2,5 G 6/6	Vert jaunâtre moyen
4	10 BG 6/4	Vert bleuâtre clair
6	5 PB 6/8	Bleu clair
7	2,5 P 6/8	Violet clair
8	10 P 6/8	Pourpre rougeâtre clair
9	4,5 R 4/13	Rouge saturé
10	5 Y 8/10	Jaune saturé
11	4,5 G 5/8	Vert saturé
12	3 PB 3/11	Bleu saturé
13	5 YR 8/4	Rose jaunâtre clair (peau humaine)
14	5 GY 4/4	Vert olive moyen (vert feuille)

Dans la représentation tridimensionnelle de la figure 9.6 (tirée de [CC80]), un axe vertical porte la luminance, blanc en haut, noir en bas ; il y a 10 degrés de luminance. C'est l'axe achromatique : il n'existe en ce lieu que des gris.

Centrée autour de cet axe, à chacun des dix niveaux, une roue colorée porte les différentes teintes (jaune, rouge, magenta, bleu, cyan et vert, ainsi qu'un grand nombre de teintes intermédiaires (au

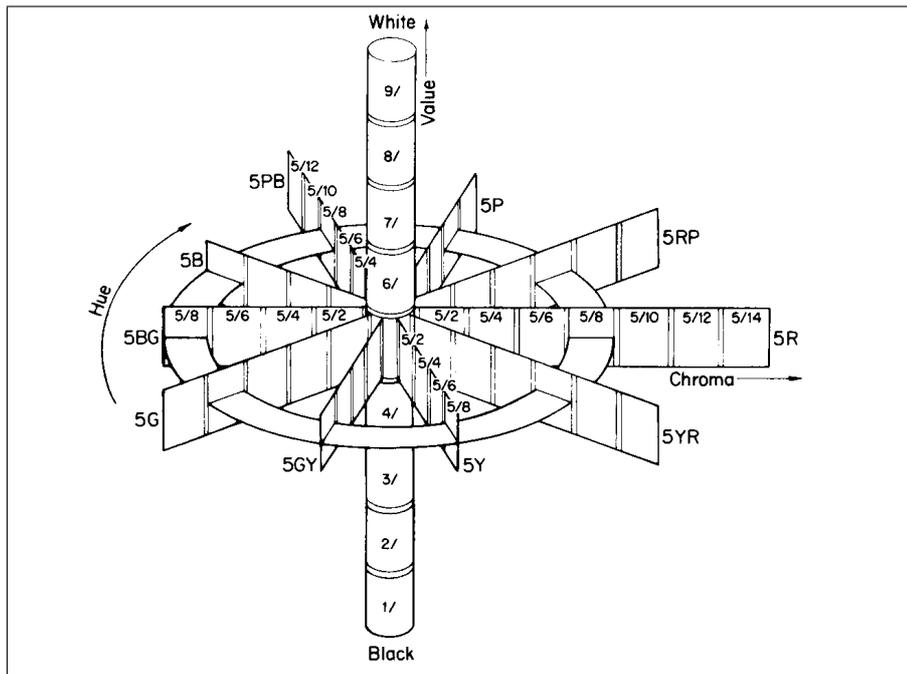


FIG. 9.6 – Espace des couleurs de MUNSELL HSV pour la teinte (*hue*), la saturation (*chroma*) et la luminance (*value*).

total il y a 100 teintes). Les notations sont : Y, YR, R, RP, P, PB, B, BG, G, GY pour les principales. Les différentes branches sur la figure 9.6 n'ont pas la même longueur car chacune est divisée en zones perceptuellement équidistantes et notre œil distingue une plus grande gamme de teintes dans les rouges que dans les bleus, par exemple.

Sur la figure 9.7 j'ai dessiné la roue des teintes. Par définition celles-ci sont équidistantes, il ne faut pas confondre cette roue des teintes avec celle des coloristes (Fig. 9.8) qui, elle, positionne les teintes suivant leurs rapports de complémentarité.

Les noms qui les désignent sont les plus courants, même si fréquemment le terme *pourpre* est utilisé à la place de *violet*.

La saturation est représentée par la distance au centre qui est l'axe achromatique. En effet, l'extérieur du cercle porte les teintes pures, saturées. Si on les laves de blanc, elles pâlissent. Plus on va vers le centre du cercle, plus la teinte est pâle, plus la saturation diminue pour arriver, au centre, à un gris.

9.6.1 Un langage universel des couleurs

Il existe un langage universel des couleurs qui procède en six étapes successives affinant la description. Exemple :

1 = brun

2 = brun jaune

3 = brun jaune clair

4 = 10 YR 6/4

5 = $9\frac{1}{2}$ YR 6,4/4 $\frac{1}{4}$

6 = $x = 0,395$; $y = 0,382$; $Y = 35,6$ ou encore 9,6 YR 6,4 $\frac{1}{5}$ /4,3

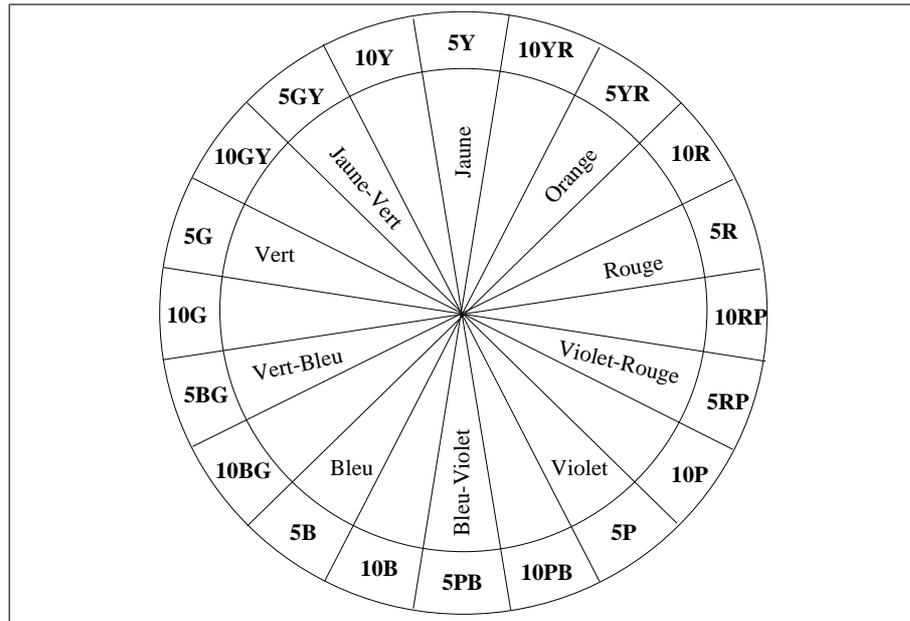


FIG. 9.7 – La roue des couleurs selon Munsell.

D'autre part, selon les recommandations de l'association française de normalisation, la couleur d'un corps est décrite par sa teinte (violet, rouge, etc.) suivi de l'adjectif *clair* ou *foncé* selon que le facteur de luminance est plus ou moins élevé, et de l'indication *saturé* ou *lavé de blanc* selon que le facteur de pureté est voisin de 1 ou de 0. De façon plus concise la couleur sera dite *vive* si elle est à la fois claire et saturée, *pâle* si elle est claire et lavée, voisine du blanc, *profonde* si elle est foncée et saturée, *rabattue* si elle est foncée et lavée (voisine du noir).

On remarquera qu'il existe pour les corps colorés certains qualificatifs qui n'existent pas pour les lumières colorées. On appelle, par exemple, marron, un rouge très rabattu comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, rose ou lilas un pourpre pâle, etc.

9.7 La trichromie

On arrive aisément à reproduire un blanc, en synthèse additive trichrome, en utilisant trois lumières convenablement écartées dans le spectre ; on appelle ces trois couleurs les *primaires*. On utilise habituellement le rouge, vert et le bleu (RVB) ; mais on pourrait prendre n'importe quelle couleur pourvu qu'aucune ne puisse être réalisée par combinaison des deux autres (toujours GRASS-MANN).

En synthèse soustractive trichrome on utilise des pigments qui absorbent la lumière. Ces derniers sont complémentaires des primaires R, V, B et sont respectivement le cyan (bleu-vert), le magenta (pourpre) et le jaune. Toute couleur pure peut être reconstituée visuellement par la somme de ces primaires dans des proportions convenables (cf. tableau 9.5 et figure 9.8).

9.7.1 Système trichromique RVB (ou RGB)

Les composantes fondamentales du système RGB⁴ sont les trois radiations monochromatiques suivantes : les raies bleue et verte du mercure à 436 nm et 546 nm, le rouge de 700 nm. Le blanc

⁴On évite souvent le sigle RVB pour lui préférer RGB : Red, Green, Blue pour ne pas confondre V avec Violet

TAB. 9.5 – Les couleurs obtenues en synthèses additive et soustractive

avec des lumières	rouge + vert	→	jaune
	rouge + bleu	→	pourpre (magenta)
	bleu + vert	→	bleu-vert (cyan)
	rouge + vert + bleu	→	blanc
avec des pigments	cyan + jaune	→	vert
	cyan + magenta	→	bleu
	magenta + jaune	→	rouge
	jaune + magenta + cyan	→	noir

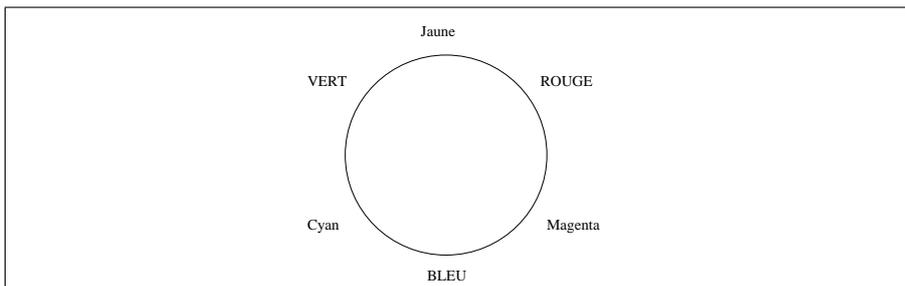


FIG. 9.8 – Roue des couleurs des deux types de primaires. Le choix habituel des couleurs primaires pour la synthèse additive (à l’aide de faisceaux lumineux) est indiqué ici en majuscules. Les minuscules représentent les primaires utilisées en synthèse soustractive (à l’aide de pigments). Chaque jeu de primaires forme un triangle.

est l’étalon équiénergétique fictif d’apparence pourprée.

Les trois variables sont représentées dans l’espace sur trois axes obliques suivant les trois arêtes d’une pyramide triangulaire (fig. 9.9) dont le sommet est *O* (appelé point alychne). *O* représente du noir. Si la couleur à reproduire est *C*, on doit avoir : $C = rR + gG + bB$. L’axe passant par

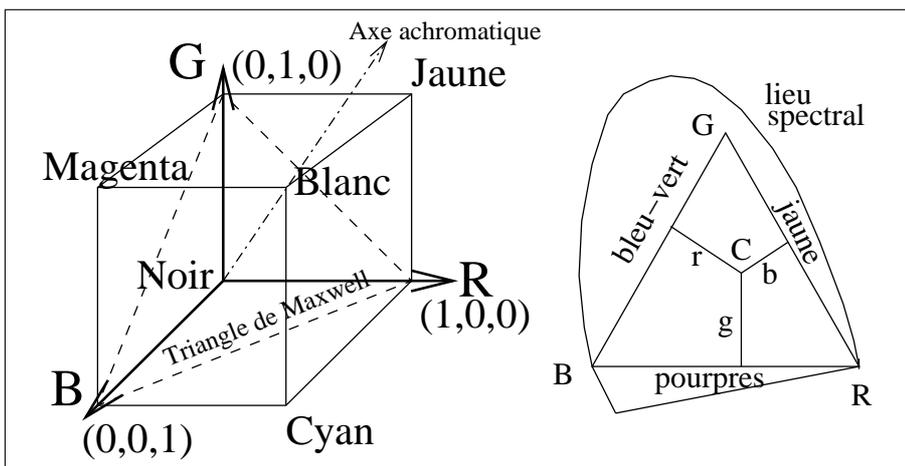


FIG. 9.9 – Cube des couleurs et triangle de MAXWELL.

le sommet est relatif à la luminance, c’est l’axe *achromatique*. Sur cet axe, les couleurs sont les

mêmes, mais les luminances différentes. Du fait que pour caractériser une couleur il n'est besoin que de deux grandeurs chromatiques, il suffit d'examiner ce qui se passe dans un plan. Ce plan est la base de la pyramide.

Si l'on convient d'une unité arbitraire pour chaque couleur, le triangle est équilatéral. Il s'appelle le *triangle de Maxwell*. Si l'on convient de plus de représenter la hauteur du triangle par la valeur 1, alors un ton déterminé est représenté par les distances r , g et b aux trois côtés du triangle avec la relation :

$$r + g + b = 1 \quad (9.13)$$

Le blanc de référence W se trouve ainsi au centre du triangle. L'ensemble des couleurs que l'on peut reproduire en synthèse additive se situe à l'intérieur de ce triangle. Cela résulte des lois de GRASSMAN. On voit donc que le choix de Rouge, Vert, Bleu n'est pas magique, c'est une façon d'obtenir un triangle de grande surface.

La courbe ensemble des points représentatifs des lumières monochromatiques est appelée le *lieu spectral* ou *lieu du spectre* ou encore *spectrum locus*. On voit sur la figure 9.9 que ce lieu est extérieur au triangle de MAXWELL ; par suite, une des coordonnées trichromatiques peut être nulle ou négative ce qui signifie qu'il faut *retirer* une certaine proportion d'une ou de deux couleurs fondamentales pour obtenir certaines couleurs, certains verts par exemple.

Comme $r + g + b = 1$ il suffit de déterminer deux coefficients, le troisième s'en déduisant, nous arrivons tout naturellement à la représentation en coordonnées rectangulaires (triangle rectangle isocèle que nous allons voir tout de suite).

Pour éviter l'inconvénient de coefficients négatifs, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) a proposé en 1931 un système international dit X, Y, Z .

Les primaires X, Y, Z de ce système sont choisies de façon à ce que la courbe spectrale ne comporte que des coefficients trichromatiques positifs. X, Y , et Z sont des primaires irréelles « non physiques » par opposition aux primaires physiques RGB. Parmi l'infinité des transformations possibles, la CIE en a choisie une particulière dans laquelle la primaire Y est prise égale à la courbe de réponse de l'œil humain à une lumière blanche W . C'est l'efficacité lumineuse relative spectrale $V(\lambda)$ vue plus haut.

Pour déterminer cette transformation, traçons trois tangentes à la courbe spectrale du système RGB et effectuons une transformation homographique sur le triangle obtenu pour obtenir le triangle isocèle XYZ ou, cette fois-ci, le lieu spectral sera intérieur : les coordonnées seront ainsi toujours positives : figure 9.10.

On a alors en X et en Z des flux nuls et en Y un flux de 1 lumen et toujours bien sûr $x + y + z = 1^5$. Les coordonnées du blanc W sont bien sûr $x = 0,3$ et $y = 0,3$.

Sur la figure 9.10, j'ai aussi tracé les droites d'égale teinte (celles qui partent du bord du lieu spectral vers le blanc W , ainsi qu'une courbe d'égale pureté ou d'égale saturation (0 en W , 1 sur le locus). En fait les droites ne sont pas aussi droites que je les ai dessinées, et les courbes sont complexes, on s'attendrait à des cercles. C'est ce qui motivera la transformation de ce système de coordonnées en le système CIELUV que nous verrons plus loin.

Soit alors une couleur C . La longueur d'onde dominante est obtenue en reliant C à W et en cherchant l'intersection de cette droite avec le locus. Si a est la distance de C à W et b la distance de C au locus, alors la pureté chromatique vaut $a/(a + b)$. C'est en réalité une approximation car la longueur d'onde dominante et la pureté ainsi déduites des graphes de la CIE ne sont pas exactement corrélées à la teinte et à la saturation telles qu'elles sont perçues visuellement ; les courbes de la CIE ne sont pas aussi justes que leur précision pourrait le laisser penser !

⁵en posant $x = X/(X + Y + Z)$; même chose pour y et z .

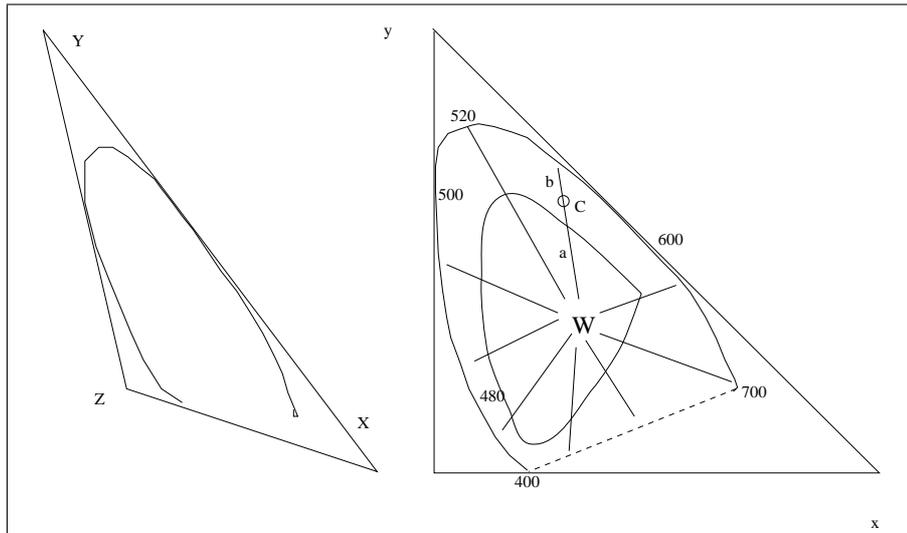


FIG. 9.10 – Le triangle des couleurs de la CIE

Des tentatives pour rendre l'espace des couleurs plus uniforme, c'est-à-dire qui donne des lieux équidistants pour des teintes ou des saturations équidistantes (comme dans la notation de MUNSSELL) ont été nombreuses. Il existe des transformations linéaires et d'autres non linéaires du système XYZ ; SCHRÖDINGER s'y est brillamment exercé.

Une transformation importante est celles basées sur les couleurs opposées. L'idée étant que, quelque part entre l'œil et le cerveau, les signaux provenant des cônes sont codés en clair-foncé, rouge-vert et jaune-bleu. L'argument étant qu'une couleur ne peut être rouge et verte à la fois, ou jaune et bleue. La qualité du rouge peut s'exprimer avec un seul nombre, s'il est positif on a affaire à du rouge, s'il est négatif, on a affaire à du vert ; c'est la coordonnée a . La qualité du jaune sera codée par la coordonnée b . On obtient ainsi le repère CIELAB (le L vaut pour « luminance »).

Une autre transformation importante conduit aux coordonnées de chromaticité métrique (pour psychométrie) u' et v' :

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad \text{et} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (9.14)$$

C'est le système CIELUV qui lui aussi a été proposé en 1976 (voir la figure 9.11).

Il permet de définir, entre autre, l'angle de *saturation métrique* et l'angle de *teinte métrique*. Ce sont ces variables que l'on utilise lorsque l'on veut travailler sur la teinte ou la saturation et que l'on ne dispose que des signaux R , V et B issus d'une caméra ou d'un enregistrement numérique. Ce n'est pas la panacée.

9.7.2 Calcul des composantes trichromatiques

Inversement, étant donné un choix particulier de primaires R , G et B , dont les *coefficients de distribution trichromatiques* sont respectivement r_λ , g_λ et b_λ , les valeurs R , G , B seront données

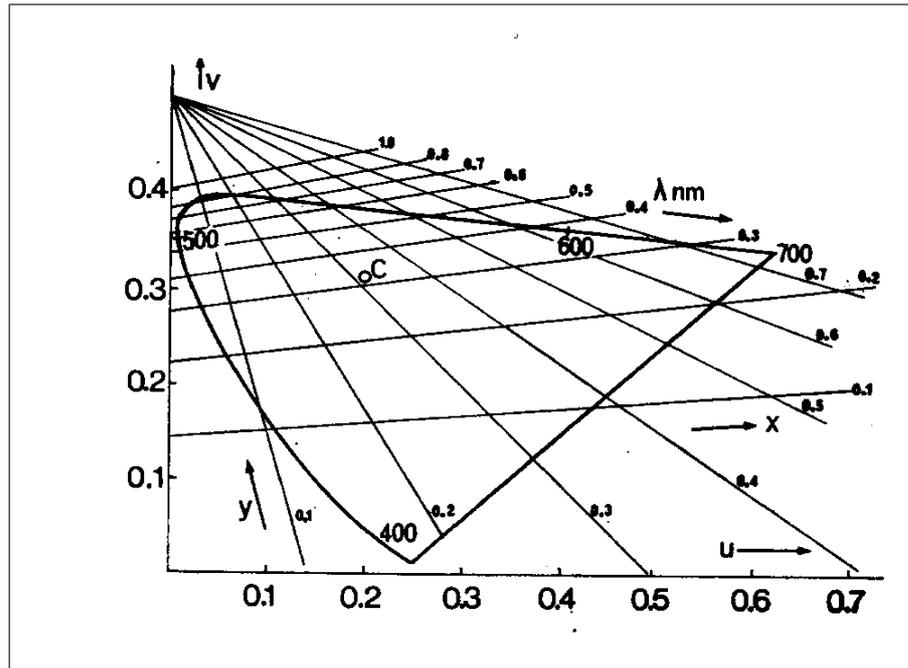


FIG. 9.11 – Le triangle des couleurs de la CIE dans les coordonnées u/v .

par :

$$\begin{aligned}
 R &= k \int_{\lambda} F_{\lambda} r_{\lambda} d\lambda \\
 G &= k \int_{\lambda} F_{\lambda} g_{\lambda} d\lambda \\
 B &= k \int_{\lambda} F_{\lambda} b_{\lambda} d\lambda
 \end{aligned}
 \tag{9.15}$$

où F_{λ} est le flux spectral dont on recherche les composantes.

9.8 Quelques couleurs

Certaines couleurs portent des noms charmants, en voici quelques unes dont les définitions sont tirées du Robert électronique :

- **ALIZARINE** [alizaRin] n. f.
- Chim., techn. Matière colorante rouge que l'on extrayait autrefois de l'alizari (racine de garance) et que l'on obtient aujourd'hui par synthèse.
- **AMARANTE** [amaRät] n. f. et adj.
- 1. N. f. Plante ornementale aux nombreuses fleurs d'un rouge pourpre velouté, en grappes. Amarante crête-de-coq (ou Passe-velours) : célosie de Linné. Amarante queue-de-renard. Amarante épineuse (n. sc. : *Amaranthus spinosus*) de Linné, appelée épinard épineux. La fleur elle-même. L'amarante était, chez les Anciens, le symbole de l'immortalité.
- Loc. métaphorique. (Vx). Couronné d'amarante : immortalisé.
Colorant naturel extrait de cette plante.
Bois d'amarante : acajou de Cayenne, employé en ébénisterie.

- 2. Adj. invar. (1694). Qui est de la couleur de l'amarante. Étoffe, velours amarante.
DÉR. Amarantacé, amarantine
- **HÉLIOTROPE** [eljótRóp] n. m. et adj.
 - 1. Bot. et cour. Plante dicotylédone (Borraginées) annuelle ou vivace, à feuilles alternes et persistantes, à fleurs odorantes (blanches, mauves, violettes) dont de nombreuses espèces croissent dans les régions chaudes et tempérées du globe. L'héliotrope d'Europe, à fleurs blanches, communément appelé tournesol, herbe aux verrues, herbe de Saint-Fiacre ou herbe aux chancres. L'héliotrope du Pérou, à petites fleurs bleues ou lilas, cultivé pour son parfum suave qui rappelle celui de la vanille.
 - Adj. (1892). De la couleur violette des fleurs d'héliotrope. Une robe héliotrope. Des robes héliotrope.
 - **CINABRE** [sinabR] n. m.
 - 1. Chim. Sulfure de mercure (Hg S) de couleur rouge, d'où l'on tire ce métal. *Des troncs d'arbre barbouillés de cinabre (- Piédestal, cit. 2).*
 - 2. (1552). Littér. Couleur rouge de ce sulfure. - Vermillon
 - **INCARNADIN, INE** [ëkaRnadë, in] adj.
 - Littér. D'une couleur d'incarnat pâle. Ruban incarnadin.
 - N. m. (1611). Couleur rose chair. œillet d'un bel incarnadin.
 - **JONQUILLE**, [∑ökij] n. et adj.
 - 1. N. f. Variété de narcisse à fleurs jaunes et odorantes, scientifiquement appelée *Narcissus jonquilla* (famille des Amaryllidacées), dont les feuilles rappellent celles du jonc. La jonquille, plante d'ornement, est aussi cultivée pour son parfum.
 - Spécialt. La fleur de cette plante. Un bouquet de jonquilles.
 - 2. Adj. invar. (1748). De la couleur (jaune vif) de cette fleur. Jaune jonquille. Velours jonquille. Des rubans jonquille.
 - Spécialt. Diamant jonquille (couleur très rare).
 - N. m. Peint. Un beau jonquille, du jonquille : couleur secondaire composée avec du blanc et du jaune.
 - **LAPIS [lapis] ou LAPIS-LAZULI [lapislazyli] n. m.**
 - Minér. Pierre d'un bleu d'azur ou d'outremer, silicate essentiel du groupe des feldspathoïdes.
 - Azurite (vx); lazulite. Les lapis-lazuli sont employés dans les mosaïques, les incrustations décoratives, dans la confection des bijoux. *Marbre incrusté de lapis et de turquoises.* La poudre de lapis était utilisée comme colorant. - Outremer. - Par appos. Bleu lapis (- Inodore, cit. 2).
 - Par métaphore. Bleu intense.
 - Ethymologie : 1580, lapis ; lapis-lazuli, XIIIe ; comp. du lat. lapis "pierre", et de lazuli "azur", lat. médiéval lazulum, de l'arabe pop. lazurd, arabe class. lazaward "lapis-lazuli", du persan lazward. - Azur.
 - **SINOPLÉ** [sinópl] n. m.
 - Blason. Un des émaux* héraldiques, de couleur verte, représenté en gravure par des lignes diagonales descendant de gauche à droite
 - Didact. Couleur verte.
 - **SMARAGDIN, INE** [smaRagdë, in] adj.
 - Didact. D'un vert d'émeraude.
 - DÉR. (Du même rad.) Smaragdite
 - **ZINZOLIN** [zëzólë] n. m.
 - Vx ou littér. Couleur d'un violet rougeâtre que l'on obtient du sésame.
 - Adj. (Vieilli). Des rubans zinzolins, une étoffe zinzoline.

9.9 Conclusions

La science de la couleur est devenue complexe et très sophistiquée. Il semble que tous les progrès faciles ont été réalisés mais c'est peut-être une fausse impression. Les problèmes qui restent exigent des connaissances approfondies dans des domaines divers pour être résolus. En voici un : trouver une formule qui donne la nouvelle couleur, perçue bien sûr, d'un échantillon placé dans un nouvel environnement. En voici un autre : est-on sûr que la couleur peut être traduite par trois coordonnées seulement ? Et un dernier sur lequel SCHRÖDINGER s'est cassé les dents : quel système de coordonnées donnera des points également séparés pour des couleurs également séparées ? J'espère, en tout cas, que cette (trop) brève incursion dans un domaine qui mélange intimement la physique, la biologie et le traitement du signal vous fera voir le monde d'un autre œil !

Bibliographie

- [BS81] Fred W. Billmeyer and Max Saltzman Jr, editors. *Principles of color technology, 2 édition*. Wiley and Sons, 1981.
- [CC80] G. J. Chamberlin and D. G. Chamberlin, editors. *Colour ist measurement, computation and application*. Heyden, 1980.
- [dl91] Association Francaise de l'éclairage, editor. *La photométrie en éclairage*. Société d'édition Lux, 1991.
- [Gla87] Pierre Glafkidès. *Chimie et physique photographique*. CEP Editions, 1987.
- [Itt85] Johannes Itten. *Art de la couleur*. Dessain et Tolra, 1985.
- [Kow72] Pierre Kowaliski. *Théorie photographique appliquée*. Masson, 1972.
- [Kow78] Pierre Kowaliski. *Vision et mesure de la couleur*. Masson, 1978.
- [Man77] Harald Mante. *La couleur en photographie*. Dessain et Tolra, 1977.
- [WS82] Günter Wyszecki and W. S. Stiles, editors. *Color science, concepts and methods, quantitative data and formulae*. Wiley and Sons, 1982.