

De la lumière à la couleur

une synthèse sur la perception colorée

Vinciane Lacroix^{1*}

CISS Department, Royal Military Academy, 1000 Brussels, Belgium

Tél : int + 32 2 742 64 74, Fax : int + 32 2 742 64 72, Vinciane.Lacroix@elec.rma.ac.be

Résumé Pour qu'il y ait sensation colorée il faut qu'un rayon lumineux pénètre dans la rétine. En effet, c'est ce dernier qui, après avoir traversé le cristallin, va être capté par des cellules photo-sensibles et transformé en signal nerveux, puis interprété en sensation colorée. Ce point de vue sensoriel sépare dès lors le processus de la perception colorée en deux phases, la première concerne les phénomènes produits avant d'atteindre la rétine, et la deuxième, la transformation de la lumière en sensation colorée. La compréhension de l'intégralité du processus exige une maîtrise de nombreuses disciplines (Physique, Chimie, Neurobiologie, Psychologie, etc.). Depuis des siècles les peintres quant à eux ont été amenés à analyser ce processus, à retranscrire leur perception et ont ainsi développé une intuition du phénomène. Le présent article offre une synthèse actuelle sur la perception colorée, guidée par l'intuition des artistes et assistée par un outil scientifique : la distribution spectrale.

Mots clés couleur, distribution spectrale, perception colorée, vision.

Abstract In order to perceive a color, a light ray should penetrate the retina. Indeed, after having passed through the crystalline lens, the ray will be captured by photo-receptive cells and transformed into a signal, further interpreted as a color. This point of view divides color perception in two phases: the first one concerns phenomena occurring before reaching the retina, and the second, the transformation of light in color perception. The understanding of the whole process requires to master various disciplines (Physics, Chemistry, Neurobiology, Psychology, etc.). For centuries painters however have studied this process and have translated their perception in their work; therefore they have developed an intuition of the phenomenon. This article presents a state-of-the-art synthesis of color perception, guided by artists' intuition and assisted by a scientific tool: the spectral power distribution.

Key words color, color perception, spectral power distribution, vision.

1 Introduction

La compréhension de la perception colorée est passée au cours des siècles par de tels méandres que les suivre en compliquerait la synthèse. Dès lors une approche séquentielle des phénomènes intervenant dans la perception colorée est préférable à

* Cette étude est financée par le Ministère Belge de la Défense. L'auteure souhaite également remercier Pascal Gribomont pour ses suggestions.

l'approche historique souvent suivie (cf [21], [28], [23]). Aussi la couleur sera abordée comme un voyage de la lumière depuis sa création jusqu'à sa perception, envisagé en deux phases; la première, objective, résulte en un stimulus physique qui est étudié par la *radiométrie*; la deuxième, subjective, traite de la transformation de ce stimulus en sensation colorée. Plusieurs pistes ont été suivies pour comprendre cette transformation. L'une d'elles se base sur la *Neurobiologie* qui analyse la transformation au niveau des cellules et de leur influx nerveux. Seules les premières étapes sont aujourd'hui bien comprises; la difficulté d'accéder à toutes les zones du cerveau humain étant la principale limite même si les récentes techniques d'imagerie d'une part et l'étude de la vision des primates d'autre part contribuent à repousser cette limite. Une autre piste basée sur des expériences psycho-physiques est explorée par la *Colorimétrie*: des expériences visuelles bien contrôlées mais très contraignantes permettent d'établir un lien rigoureux entre des flux lumineux et une spécification "couleur" numérique. La limite de cette technique réside essentiellement dans les contraintes imposées. Enfin des approches mixtes basées sur des expériences visuelles, étoffées par des données biologiques, tentent d'établir des modèles du processus. Quelques modèles des premières étapes existent mais aucun n'a aujourd'hui l'assentiment général.

Finalement le peintre semble aujourd'hui le meilleur spécialiste de la perception colorée. La raison en est que, étant incapable pour des raisons techniques, physiques, de faire émettre par son tableau les signaux lumineux correspondant aux sensations lumineuses qu'il a lui-même perçues et/ou souhaite faire percevoir à quiconque regardera son tableau, il devra s'accommoder de peindre un tableau émettant des signaux lumineux *différents* mais qui imposeront chez le regardant les perceptions voulues. Sa technique de peinture est consciente ou non, on parlera dès lors de "l'intuition des peintres"; elle servira de fil rouge à cette synthèse. L'approche liant sciences et art s'inscrit dans un courant actuel [23], [22], [14], [16], [8].

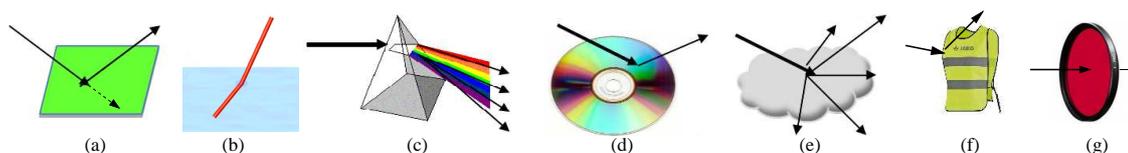


Figure 1. Phénomènes physiques de la première phase: (a) absorption/réflexion; (b) la réfraction; (c) la dispersion; (d) la diffraction; (e) la diffusion; (f) l'absorption/réémission; (g) la transmission

Un rayonnement qui a pénétré dans la rétine peut provenir directement d'une *source lumineuse* ou peut résulter de l'interaction d'un tel rayonnement avec la matière. Le soleil et une lampe à incandescence sont des exemples de sources lumineuses dont le rayonnement est d'origine thermique (ne dépend que de la température); un écran d'ordinateur, un néon sont quant à eux des exemples de luminescence

(rayonnement non thermique dépendant de la nature de la source). Les différents phénomènes physiques que sont l'absorption/réflexion, la réfraction, la dispersion, la diffraction, la diffusion, l'absorption/réémission, la transmission sont des exemples d'interactions du rayonnement avec la matière. Ils sont schématisés sur la Figure 1. Ceci résume la première phase.

Comme nous le verrons dans la Section 3 on peut modéliser tout rayonnement par une *distribution spectrale* ou *spectre*. L'exemple le plus familier est le spectre solaire (Section 4). Un spectre se modifie suite aux interactions avec la matière (Section 8) mais dans un premier temps on ignorera cette modification: on présentera le système visuel (Section 5) en considérant directement la source en *mode d'ouverture* [19] c'est-à-dire comme vue à travers le trou d'un écran; ce mode est à la base de la colorimétrie (Section 6). En réalité, comme nous le verrons dans la Section 9, quand la lumière est réfléchiée par une surface, la perception colorée tient compte de l'éclairage ambiant [9]. De plus, la présence d'un contexte donné [6] et les caractéristiques spatio-temporelles des rayons lumineux présents dans notre champ de vision [29] modifient également notre perception. Il est aussi probable que notre connaissance sur les objets reconnus modifie l'impression colorée que nous en avons, mais les processus intervenant dans cette interprétation sont encore mal connus [20]. Cette synthèse ne fera qu'effleurer les autres modes de vision; le lecteur aura quelques pistes de réflexion pour les aborder grâce aux modèles biologiques présentés dans la Section 7. L'analyse de certaines oeuvres d'art permet de mettre en évidence la spécificité de notre perception des couleurs; ce sera le but de la section suivante.

2 L'intuition des peintres

De tout temps, les artistes ont essayé de reproduire la sensation colorée par la peinture; l'analyse des couleurs utilisées pour représenter des scènes sous différents éclairages rend compte de la spécificité de notre vision. Par exemple, une scène où la lumière est très faible est pratiquement monochrome et parfois légèrement floue ("A Park at Night" de Rippl-Ronai, "Paysage- Effet de nuit" de Degouve de Nuncques, "Nocturne en bleu et argent: le lagon, Venise", Whistler) (1). Quand la lumière se fait plus présente comme au clair de lune, de nouvelles teintes apparaissent, mais elles semblent bleutées; dans certaines scènes nocturnes de Delvaux des arbres "vert", un tapis "rouge", un teint "chair" sont respectivement peints en "kaki", "violet", et "blanc bleuté" (2). L'ambiance du tableau "entre chien et loup" de Bordy est encore très bleutée, surtout dans le paysage au lointain; elle rend bien compte de cette sensation colorée que nous expérimentons quand le soleil vient de se coucher (3). Ce n'est que quand la lumière du jour est totalement présente que le chatoyement des couleurs nous apparaît dans toute sa splendeur (ex: Evenepoel "Le marché d'oranges à Blidah ") (4). Cependant, quand la lumière devient éblouissante,

il nous est impossible de distinguer la couleur, comme c'est le cas de la face exposée du bus en haut d'une côte d'une gravure de Thibault (5). Sous l'éclairage artificiel, la scène prend des couleurs très différentes: dans la "Terrasse de café la nuit" de Van Gogh l'éclairage des lampes au gaz transforme radicalement les couleurs sous la marquise (6). Les scènes éclairées à la bougie comme celles de de la tour ne donnent à voir aucun bleu, les teintes dominantes étant le jaune, le rouge et le vert kaki (7).

Voici donc le constat des peintres: la perception de la couleur dépend de l'intensité de la lumière éclairant (ou réfléchi par) la scène et de la "nature" de celle-ci: l'intensité lumineuse est croissante dans les exemples allant de (1) à (5), la lumière est lunaire dans (2), solaire dans (4), et artificielle dans (6) et (7). Mais qu'est-ce que la "nature" de la lumière, comment et pourquoi influence-t-elle notre perception?

3 La nature de la lumière

Pendant des siècles les scientifiques ont tenté de comprendre la nature de la lumière; James Clerk Maxwell a démontré que l'électricité, le magnétisme et la lumière ne sont que des manifestations du *champ électromagnétique* (EM): une variation du champ électrique produit un champ magnétique et vice versa; la propagation de cette variation dans l'espace constitue un *rayonnement EM*. L'interaction de ce rayonnement avec la matière peut être étudié au moyen d'un modèle qui représente le rayonnement comme une superposition d'ondes EM *monochromatiques*. Une onde monochromatique caractérise un champ électrique E et un champ magnétique B perpendiculaires l'un à l'autre, dont la variation se propage dans la direction perpendiculaire à E et à B , de telle sorte que les maxima/minima des champs sont espacés d'une distance λ , la *longueur d'onde* (voir Figure [7]); des contraintes sur ces variations déterminent des polarisations spécifiques, mais la vision humaine n'y est que faiblement sensible [7].

L'avantage de la représentation en superposition d'ondes EM monochromatiques vient du fait que les différentes interactions d'un rayonnement avec la matière — en particulier notre oeil — dépendent précisément de la longueur d'onde. Par exemple lors du passage d'un faisceau lumineux à travers un prisme, à chacune des interfaces entre les deux milieux transparents (air/verre, verre/air) le rayon est réfracté (i.e. sa direction est modifiée¹) différemment suivant la longueur d'onde. La lumière du soleil est décomposée en ses ondes monochromatiques: nous percevons les couleurs de l'arc-en-ciel. A noter qu'au delà du rouge d'une part et du violet d'autre part, notre oeil ne perçoit rien, alors que des yeux de serpents et des yeux de guêpes percevraient les uns, la plage "infrarouge", les autres "l'ultraviolette" [24].

¹ dans un milieu plus dense, la vitesse diminue et les longueurs d'ondes se déplacent vers le bleu

Un rayonnement EM est donc utilement représenté comme une superposition d’ondes dont les longueurs d’onde peuvent être de l’ordre de $10^{-12}m$ jusqu’à 10^3m (m : mètre); cette étendue constitue *le spectre EM*; ce que nous appelons “lumière” n’est que la partie *visible* du rayonnement qui se situe entre $300nm$ et $750nm$ (nm : $10^{-9}m$), parce que seules les ondes appartenant à cette plage peuvent être captées par notre œil. L’expérience du prisme nous donne à voir un ensemble de couleurs appelées *couleurs spectrales*, elle permet également d’associer à chacune des longueurs d’onde du domaine visible une couleur ($440nm \rightarrow$ bleu, $575nm \rightarrow$ jaune, etc.) mais cette relation n’est pas biunivoque: un rayonnement que nous percevons jaune n’est pas forcément d’une longueur d’onde de $575nm$ (voir Section 6). De plus, l’association longueur d’onde/couleur est relative, elle dépend aussi de l’intensité. Notez que le magenta n’est pas une couleur spectrale (voir Section 6).

Si l’on veut étudier les interactions d’un rayonnement avec la matière, sa distribution spectrale (Spectral Power Distribution) ou plus brièvement son *spectre* est un outil précieux. Il existe des spectres d’émission, de transmission, d’absorption, de réflexion: il s’agit de la puissance du rayonnement émise, transmise, absorbée, réfléchi pour chaque longueur d’onde. La Figure 2 montre des exemples de spectres d’émission et de réflexion.

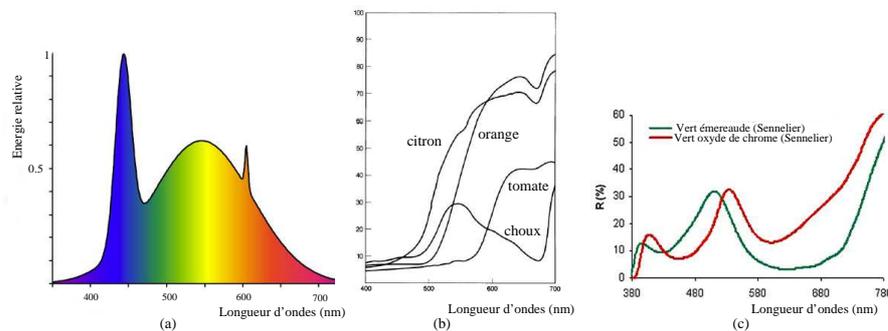


Figure 2. (a) Spectre d’émission d’une LED blanche (d’après [30]); (b) spectres de réflexion de différents matériaux (d’après [1]); (c) spectres de deux pigments verts (d’après [2])

Ce modèle *ondulatoire* du rayonnement EM ne permet pas d’expliquer tous les phénomènes d’interactions avec la matière; la théorie *corpusculaire* postule l’existence de “photons”, des particules qui chacune est vue comme “transportant” une onde monochromatique ou “paquet d’énergie” dépendant de la longueur d’onde.

Pour comprendre la perception colorée, le modèle ondulatoire via le spectre et le modèle corpusculaire via le photon sont indispensables.

4 Le rayonnement thermique

Plusieurs phénomènes physiques peuvent générer un rayonnement EM, et en particulier de la lumière. A ce titre, la théorie du corps noir nous intéresse particulièrement car le rayonnement électromagnétique produit par le soleil (et donc la lumière solaire), par une lampe à incandescence, ou encore un four, peut être modélisé par cette théorie. Un *corps noir* est un objet idéal qui absorberait tous les rayonnements EM quelle que soit leur longueur d'onde. Il ne suffit pas qu'il nous *paraisse* noir; en effet ceci ne garantirait cette propriété que dans le visible. S'il est chauffé, le corps noir émet un rayonnement EM, dit "thermique", dont Planck a modélisé le spectre qui ne dépend que de la température. Ce spectre (non normalisé) est illustré par la Figure 3 (a) pour différentes températures. Cette modélisation caractérise bien une série de sources lumineuses comme la lampe à incandescence (≈ 3000 K), les étoiles,... et le soleil (≈ 6000 K), comme le montre la Figure 3 (b): le spectre du soleil au sommet de l'atmosphère suit la distribution de Plank; ce spectre est modifié suite aux interactions que subit le rayonnement en traversant l'atmosphère. Le spectre du corps noir est continu, son maximum se déplace vers les plus courtes longueurs d'onde quand la température augmente: un corps noir qui nous paraît bleu sera donc plus chaud qu'un corps noir qui nous paraît rouge. Cela semble en contradiction avec le langage qui qualifie les couleurs rouges et bleues de couleurs chaudes et froides respectivement. Cette association résulte vraisemblablement de notre expérience et de notre culture: le feu (rouge) évoque la chaleur, l'eau (bleue) plutôt la fraîcheur. Le spectre solaire varie en fonction de la journée, de la saison et même du lieu; ainsi varient également nos impressions du monde. Les peintres et en particulier les impressionnistes ont voulu rendre compte de ces variations. L'exemple le plus connu est probablement la série des cathédrales de Monet. D'autres exemples comme les peintures de Thompson sont tout aussi parlants. Des lieux comme Etretat en France, St Ives en Angleterre, Skagen au Danemark [12] attirent des artistes pour leur lumière caractéristique.

Pour mieux objectiver ces différences entre lumière du jour à différents moments de la journée ou entre illuminants, une *température de couleur* a été définie au départ du modèle du corps noir: c'est la couleur qui est perçue lorsqu'un corps noir est chauffé à cette température (exprimée en degrés Kelvin) et le vocabulaire qui lui est associé (chaud/froid) suit la logique du langage. La température de couleur est cependant peu utile si l'on veut comprendre comment l'illuminant interfère avec des objets pour créer nos sensations colorées. En effet, comme nous le verrons dans la Section 8, le spectre dans son intégralité permet de rendre compte de plusieurs transformations du rayonnement suite aux réflexions et transmissions. Aussi la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) a recours à des spectres d'*illuminants standards* basés sur ce modèle. L'illuminant "A" à 2856 K représente la lumière d'une ampoule à incandescence standard, l'illuminant "D50" à 5000 K représente le spec-

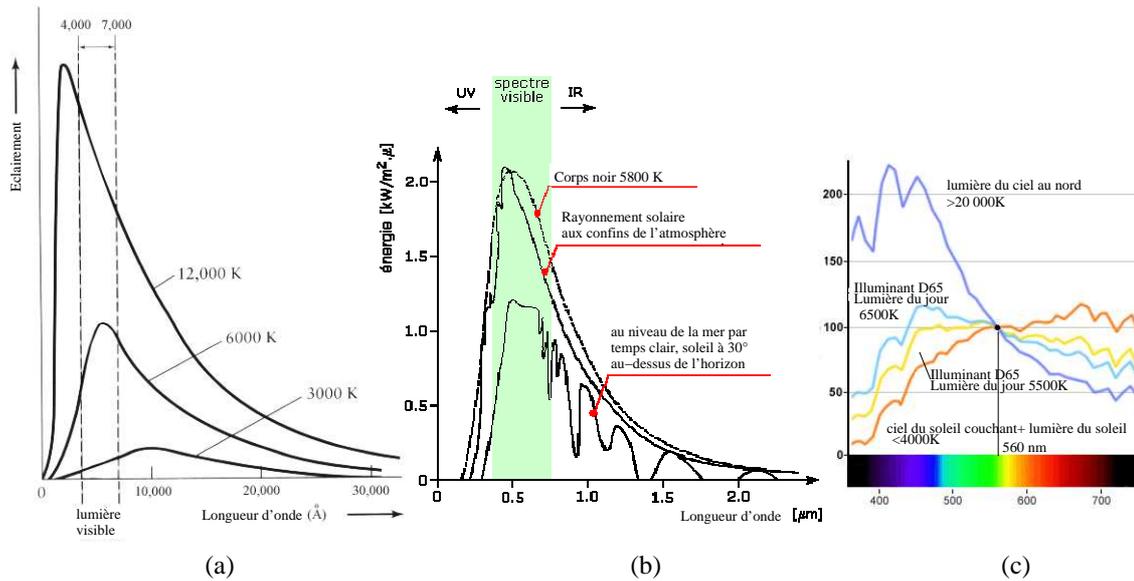


Figure 3. (a) Spectre du corps noir pour différentes températures d'après [3]; (b) spectres du soleil d'après [4] (c) Spectres normalisés de différents illuminants "blancs" d'après [19]

tre d'une lumière naturelle plutôt chaude (utilisée dans des applications graphiques et informatiques), tandis que l'illuminant "D65" à 6500 K correspond à une distribution spectrale de lumière du jour plutôt froide, préférée pour des applications industrielles [9] (voir Figure 3(c)). Tous correspondent à un "blanc". En physique la brillance ou radiance d'un rayonnement mesure l'intensité d'un rayonnement émis à partir d'une position donnée dans une direction donnée. Par convention, les spectres d'émission sont normalisés de telle sorte que leur puissance à une longueur d'onde de référence (555 nm ou 560 nm) est unitaire, car la plage de 555 nm à 560 nm est la plus "lumineuse" (i.e. efficace): pour un stimulus de puissance donnée, c'est à ces longueurs d'onde que nos photo-récepteurs répondent le plus (voir Section 5).

La *lumière du jour* est définie comme la lumière venant directement du soleil et la lumière diffusée par le ciel. Comme le blanc qualifie une surface qui renverrait tout le rayonnement visible, les standards D50 et D65 définissent aussi la "couleur" du point blanc, suivant que l'illuminant est plutôt chaud ou plutôt froid. Ces illuminants standards/ces "blancs" servent d'étalons pour d'autres illuminants/couleurs.

5 Le système visuel

Les connaissances sur le système visuel ont été acquises par deux voies différentes: une voie (neuro)physiologique et une voie psychophysique. Les modèles de perception tentent de concilier les résultats observés dans les deux domaines (voir Section 7).

La partie visible du rayonnement (caractérisé par un spectre) passe à travers la pupille qui en contrôle l'intensité; le cristallin joue alors l'effet de lentille, qui, avec la cornée et la macula, réalise un filtrage de la partie UV du rayonnement pour aboutir sur la rétine sur laquelle se trouve une série de couches de tissus neuronaux [24] et puis seulement les cellules photo-réceptrices contenant des photopigments. Suite à l'interaction entre la lumière et les photopigments, des signaux

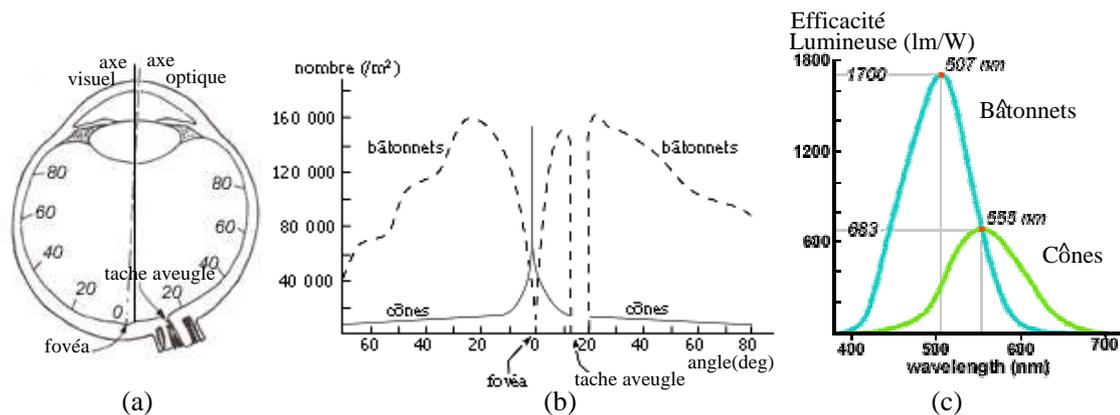


Figure 4. (a) L'oeil; (b) distribution relative des cônes et bâtonnets en fonction de l'angle de vue; (c) Efficacité lumineuse en lumen par Watt des cônes (vision diurne) et des bâtonnets (vision nocturne)

bioélectriques sont générés et relayés par les couches de neurones précédentes vers le nerf optique. Ces “couches” de neurones sont présentes partout sur la rétine, mais sont légèrement écartées devant la *fovéa* [23], une petite zone (2° du champ visuel) de la rétine centrée sur un point écarté de quelques degrés de l'*axe optique* c'est-à-dire l'axe du cristallin. Au centre de la fovéa, les cellules photo-réceptrices sont plus fines. L'axe défini par le centre de la pupille et le centre de la fovéa est l'*axe visuel*. Les humains possèdent deux types de cellules photo-réceptrices, les “bâtonnets” et les “cônes”; les premiers sont activés en cas de très faible lumière (un seul photon peut produire un signal [9]) assurant ainsi la vision nocturne, les seconds quand l'intensité lumineuse est plus importante pour assurer la vision diurne; les deux types de cellules sont stimulés lors de la vision crépusculaire. Leur distribution spatiale varie en fonction de l'angle de vue (voir Figure 4 (b)) et leur efficacité lumineuse relative mesurée par des techniques de photométrie est illustrée par la Figure 4 (c). La fovéa étant la zone la plus densément peuplée (essentiellement de cônes) et comme chacune de ses cellules est reliée à un seule neurone, elle jouit de la plus grande acuité spatiale². Il existe trois sortes de cônes caractérisés par le type de pigment qu'ils contiennent, ceux-ci se différencient par la plage de longueur d'onde

² Une personne ayant une vue normale peut distinguer à une distance de 7 m, des lignes noires et blanches d'1mm de large [18].

des photons qu'ils absorbent: S (short), M (middle), et L (long), comme le montre la Figure 5 (a). Ces courbes normalisées au niveau de leur pic d'absorbance, montrent la *probabilité relative* qu'a un photon de longueur d'onde donnée d'être absorbé par un photo-pigment. En fait, pour un même type de cône, il existe plusieurs variétés de molécules de ces pigments, même chez un individu donné [18]. Quand il est absorbé, le photon produit le même stimulus, quelle que soit sa longueur d'onde, c'est le *principe d'univariance* [25] mais le signal est "câblé" différemment suivant qu'il provienne d'un cône S, M ou L, d'où le terme *vision tri-chromatique* (voir Section 5). L'information de longueur d'onde est donc perdue; une comparaison entre des signaux de neurones provenant de cônes de type différent est donc nécessaire pour la retrouver...en partie. La transformation de l'absorption d'un photon de longueur d'onde donnée en stimulus³ pour un observateur moyen pour les cônes S, M et L est montrée sur la Figure 5 (b).

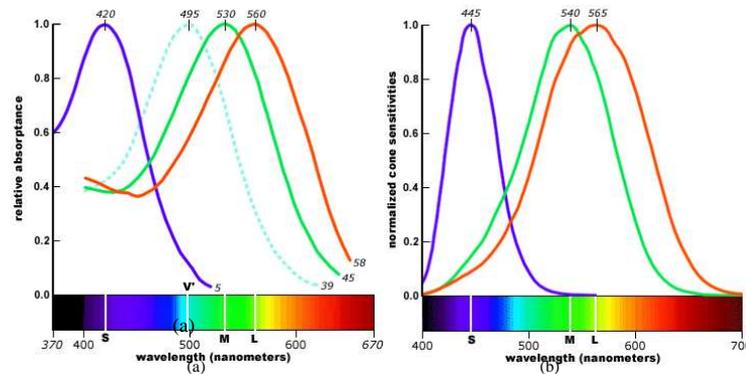


Figure 5. (a) Courbes normalisées d'absorption des différents photo-pigments présents dans les cônes (trait plein) et bâtonnets (pointillé) (voir [18] données de Dartnall, Bowmaker & Mollon (1983)); (b) Réponses spectrales normalisées des cônes S, M et L pour un observateur moyen de Stockman & Sharpe (2000)

L'analyse de toutes ces informations permet de mieux comprendre de nombreux aspects de la vision humaine et de son évolution. On peut considérer chacun des stimuli de S, M, L comme "primaires", c'est-à-dire les stimuli de base qui sont à l'origine de notre vision des couleurs, tout en remarquant qu'aucun rayonnement EM ne peut exciter un cône d'un seul type à la fois. Nous n'avons donc pas accès naturellement à la stimulation *indépendante* de cônes de type différent. Une onde monochromatique (un ensemble important de photons d'une même longueur d'onde) engendrera trois réponses différentes de la part des cônes.

Les courbes de sensibilité des cônes L et M sont très semblables. Cette similitude résulte vraisemblablement d'une mutation génétique. Celle-ci permet de discerner

³ Ces données sont très délicates à obtenir; les résultats varient suivant les méthodes; dans [25] les maxima de M et L diffèrent: ils se situent à 525 et 555 nm respectivement

des baies rouges du feuillage [20] et d'identifier de légères différences de teint directement liées à des maladies [11], deux raisons évoquées pour expliquer pourquoi l'évolution l'a favorisée. Les signaux issus de ces deux types de cônes seront donc très corrélés; une décorrélation est réalisée par le cerveau (voir Section 7). Si un type ou deux types de cône font défaut, comme c'est le cas chez des daltoniens, deux ou une réponse seulement est obtenue. Le *tritanope*, *deutéranope*, *protanope* ne possède respectivement pas de cône S, M, et L. Certaines personnes possèdent trois types de cônes, dont le M ou le L est remplacé par une version hybride: ML ou LM suivant que le pic de l'hybride est plus proches de M ou L. L'observateur ne présentant aucun de ces défauts a une vision des couleurs dite "normale".

L'existence d'un seul type de cellule en vision nocturne permet de comprendre pourquoi nous ne percevons pas de nuances colorées en faible lumière. La localisation périphérique des bâtonnets explique que notre vision nocturne est moins précise. La Figure 4 (c) montre que les bâtonnets sont plus sensibles aux courtes longueurs d'ondes; pour une certaine plage d'intensité lumineuse, comme juste après le coucher du soleil, lors de la vision crépusculaire, les deux types de cellules réagissent: nous expérimentons l'effet *Purkinje* [23], les bleus nous paraissent plus intenses, et toutes les couleurs plus bleutées. Effet exploité par le monde du cinéma où la "nuit américaine", dans les années 80, consistait à recréer artificiellement la "nuit" en plaçant un filtre bleu sur l'objectif de la caméra.

6 Colorimétrie

Les réponses spectrales normalisées des cônes S, M et L montrées dans la Figure 5 (b), sont le résultat d'expériences psychophysiques d'*égalisation* de lumières, à la base de la colorimétrie. Les diagrammes des "gamuts" qui montrent l'ensemble des couleurs représentables par un système (tel ou tel écran de télévision, telle ou telle imprimante) dans l'espace chromatique xy du système CIE (1931 ou 1964) sont également issus de la colorimétrie, et donc basés sur ces tests.

Plusieurs types d'expériences existent (voir [25] p.57), dont la méthode d'égalisation directe au maximum de saturation. Le principe est simple: des observateurs doivent, par un mélange de trois lumières de base appelées *primaires* dont ils peuvent varier les proportions, réaliser la même impression colorée qu'une lumière test de composition spectrale donnée. Un protocole précis et rigoureux détermine différents facteurs comme le niveau lumineux des stimuli, la taille du champ visuel, l'état d'adaptation de l'observateur, l'angle d'observation⁴, etc. Il est intéressant de choisir la lumière test et les primaires parmi des ondes monochromatiques de même énergie. On peut alors construire trois courbes appelées CMF (Color Matching Functions)

⁴ à 2° on limite le stimulus à la fovéa, sans stimulus des bâtonnets, à 10°, ceux-ci peuvent intervenir, mais un même filtrage par la macula est garanti sur le champ d'observation (celle-ci couvre à peu près 12°)

$\overline{r(\lambda)}$, $\overline{g(\lambda)}$, $\overline{b(\lambda)}$ qui donnent la proportion relative des primaires pour une lumière test donnée. Le résultat de cette expérience pour les primaires R, G, B de respectivement 645 nm, 526 nm et 444 nm est montré sur la Figure 6 (a), obtenue sur un ensemble d'observateurs normaux. On note que la fonction $\overline{r(\lambda)}$ est négative pour certains λ situés dans le bleu-vert du spectre EM. Cela veut dire qu'il n'est pas possible de reproduire la sensation colorée de ces ondes monochromatiques en mélangeant ces primaires R, G, B. Néanmoins si l'on ajoute au test une quantité de rouge on peut arriver à l'égalisation. On représente alors l'égalisation colorée entre le stimulus $E(\lambda)$ et les primaires $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$, par la relation:

$$E(\lambda) \sim \overline{r(\lambda)}\mathbf{R} + \overline{g(\lambda)}\mathbf{G} + \overline{b(\lambda)}\mathbf{B}$$

Quand deux lumières (ou stimuli) peuvent être ainsi égalisées mais sont physiquement différentes on parle de paires *métamères*. Ainsi un rayonnement constitué d'une onde monochromatique à 540 nm (vert) et à 645 nm (rouge) peut être la métamère d'une onde monochromatique à 575 nm (jaune). L'intérêt des expériences

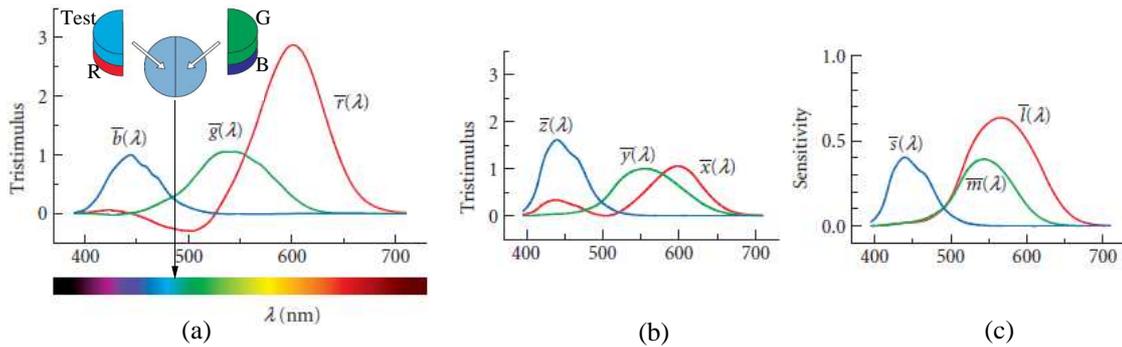


Figure 6. Expérience d'égalisation d'après [10] (a) Fonctions d'égalisation pour les primaires R (645 nm), G (526 nm), B (444 nm); (b) Fonctions pour les lumières imaginaires $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ de l'espace CIE; (d) Fonctions pour les primaires physiologiques, ou fonctions colorimétriques fondamentales

d'égalisation est de pouvoir prédire les coefficients pour n'importe quelle distribution spectrale. Ceci n'est possible que si l'égalisation peut être considérée comme linéaire et additive, ce que résumant les lois de Grassmann (voir [25] p.77 et [10] p.10.8). De plus, l'égalisation est maintenue même si les conditions de vues changent; enfin la variation des CMFs entre différents observateurs à vision normale est faible.

On peut généraliser l'égalisation de n'importe quelle lumière, pas seulement monochromatique et de même énergie, et même avec n'importe quel triplet de trois primaires "indépendantes" c'est-à-dire telles qu'aucune ne réalise une égalisation avec les deux autres. Cependant, dans certaines situations, l'observateur pourrait avoir besoin d'augmenter l'intensité d'une primaire au delà de son intensité maximale ou en dessous de son minimum pour arriver à l'égalisation. Ceci n'est pas

réalisable, alors dans le dispositif expérimental, on diminue l'intensité du test dans le premier cas, et on ajoute la primaire au test dans le second cas. Cette expérience met donc en défaut la croyance que, en lumière, *toute* couleur peut être réalisée par mélange de trois primaires RGB. En particulier, une onde monochromatique ne peut être réalisée au départ d'un jeu de trois primaires, sauf si, dans le diagramme de chromaticité, elle est située sur une droite qui joint deux primaires (voir Figure 7 (c)). Néanmoins, on maintient l'égalisation en utilisant un signe négatif. Les valeurs R, G, B de tristimulus d'une lumière donnée de distribution spectrale $P(\lambda)$, associé à un jeu de primaires donné $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$, peuvent dès lors être obtenues à l'aide des CMFs $\overline{r(\lambda)}, \overline{g(\lambda)}, \overline{b(\lambda)}$:

$$R = \int P(\lambda)\overline{r(\lambda)}d\lambda, \quad G = \int P(\lambda)\overline{g(\lambda)}d\lambda, \quad \text{et} \quad B = \int P(\lambda)\overline{b(\lambda)}d\lambda$$

Le choix des primaires est donc arbitraire; il résulte de contraintes pratiques ou technologiques; les primaires peuvent être des lumières monochromatiques ou non. Le caractère linéaire de l'égalisation fait que le triplet de primaires peut être transformés en n'importe quel triplet, via la transformation des CMFs par calcul matriciel. La CIE a choisi des lumières imaginaires $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ telles que les trois CMFs soient positives; les CMFs résultantes sont $\overline{x(\lambda)}, \overline{y(\lambda)}, \overline{z(\lambda)}$; de plus la CMF $\overline{y(\lambda)}$ est aussi la fonction de luminosité des cônes représentée dans la Figure 4 (c), réalisant le lien entre la *Photométrie* et la *Colorimétrie*. Une autre transformation consiste à choisir comme primaires les courbes de sensibilité des cônes L, M et S avec les CMFs $\overline{s(\lambda)}, \overline{m(\lambda)}, \overline{l(\lambda)}$. Les différentes CMFs sont illustrées sur la Figure 6 (b) et (c) dont la version normalisée au maximum du stimulus a été présentée dans la Figure 5 (b).

Une couleur peut donc être représentée par un point dans un espace 3D, par exemple dans l'espace SML des stimuli engendrés par les cônes S, M et L, comme illustré par la Figure 7 (a). En normalisant les fonctions $\overline{x(\lambda)}, \overline{y(\lambda)}, \overline{z(\lambda)}$ par rapport à leur somme on obtient les coordonnées chromatiques représentées en (c):

$$x(\lambda) = \frac{\overline{x(\lambda)}}{\overline{x(\lambda)} + \overline{y(\lambda)} + \overline{z(\lambda)}} \quad y(\lambda) = \frac{\overline{y(\lambda)}}{\overline{x(\lambda)} + \overline{y(\lambda)} + \overline{z(\lambda)}}$$

L'espace chromatique CIE 1931 est déterminé par les coordonnées \mathbf{Y} (la luminance) et x et y . Cet espace n'est pas "perceptif": la distance euclidienne entre deux couleurs dans cet espace n'est pas représentative de la distance perçue entre les deux; le diagramme de chromaticité illustré par la Figure 7 (c) donne en effet une trop grande importance au vert. Le pourtour du diagramme est constitué d'une courbe comprenant les couleurs spectrales, et de la *droite des pourpres* (dont le magenta), couleurs qui ne se manifestent que lorsque les cônes S et L sont stimulés ensemble. La colorimétrie a depuis produit un nombre d'espaces de couleur "perceptifs" tels le CIELUV ou CIELAB pour corriger ce défaut. Ces espaces décomposent le tristimulus

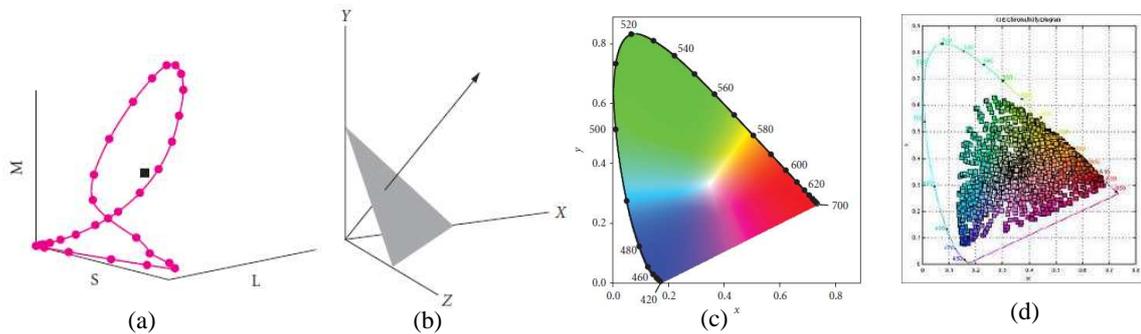


Figure 7. Représentation d'une couleur d'après [10]. (a) Vue perspective dans l'espace tridimensionnel S, M, L où les couleurs d'ondes monochromatiques de même énergie sont représentées par des cercles connectés entre eux tandis que le point blanc D65 est représenté par le carré noir; (b) vue perspective de l'espace X, Y, Z où la droite indiquée par la flèche est le lieu de toutes les couleurs caractérisées par une même valeur de chromaticité, située à l'intersection du plan d'équation $X+Y+Z = 1$; (c) coordonnées dans l'espace chromatique xy du système CIE d'un spectre d'égale énergie avec l'intérieur coloré pour donner une information grossière de l'apparence colorée d'un stimulus pour chaque valeur de la chromaticité d'un stimulus vu dans un contexte neutre (d) représentation des échantillons de Munsell (voir Section 8).

en un signal de luminance, et deux signaux chromatiques qui rendent compte d'une opposition rouge/vert et bleu/jaune qui semblent correspondre au traitement réalisé de la rétine au cortex (voir Section 7). L'espace CIELAB $L^*a^*b^*$ illustré par la Figure 8 dans lequel une couleur est répertoriée suivant sa "valeur" (L), et dans le plan ab , sa "teinte" (angle), et "saturation" (longueur), semble le plus commode. Les transformations entre la plupart des différents espaces existants sont disponibles à l'adresse <http://www.brucelindbloom.com/>.

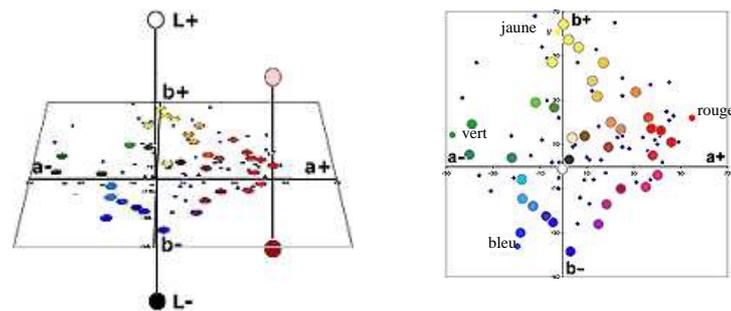


Figure 8. L'espace Lab d'après [19]. (a) Vue en perspective; (b) plan a^*b^*

Aussi, la colorimétrie permet de décrire de manière objective la couleur d'une lumière de distribution spectrale donnée vue dans certaines conditions déterminées par les tests psychophysiques, ceci au moyen de trois nombres. Ces derniers sont souvent trois coefficients qui indiquent comment créer une distribution métamère de la

lumière en question, au départ d'un jeu arbitraire de trois primaires indépendantes. Si les coefficients sont négatifs, le mélange ne peut être que "conceptuel" et donc pas réalisable physiquement avec le jeu donné. De manière alternative, ces coefficients peuvent être la luminance et deux coordonnées de chromaticité.

7 De la rétine au cortex

La rétine est une mosaïque de bâtonnets (que l'on peut ignorer ici) et de cônes S, L, et M, distribués aléatoirement. Les cônes S représentent de 5 à 10% du total des cônes, tandis que le rapport L/M diminue vers la périphérie et varie d'un individu à l'autre [26]. Le codage visuel se fait sur base de différences entre réponses neuronales, tant au plan spatial que spectral et temporel [25]. Tout neurone du système visuel est en correspondance avec une partie de la rétine, son "champ récepteur" (CR), approximativement circulaire, variable en taille (plus petite sur la fovéa, plus large en périphérie) via les *cellules ganglionnaires*. Le nombre de types de ces cellules, comment elles codent les stimuli en provenance des cônes, leurs caractéristiques suivant que leur CR est dans la fovéa ou en périphérie, varient suivant les sources [23], [21], [26], [25], [15], [13], [17], le lieu de désaccord étant principalement lié à la contribution des cônes S.

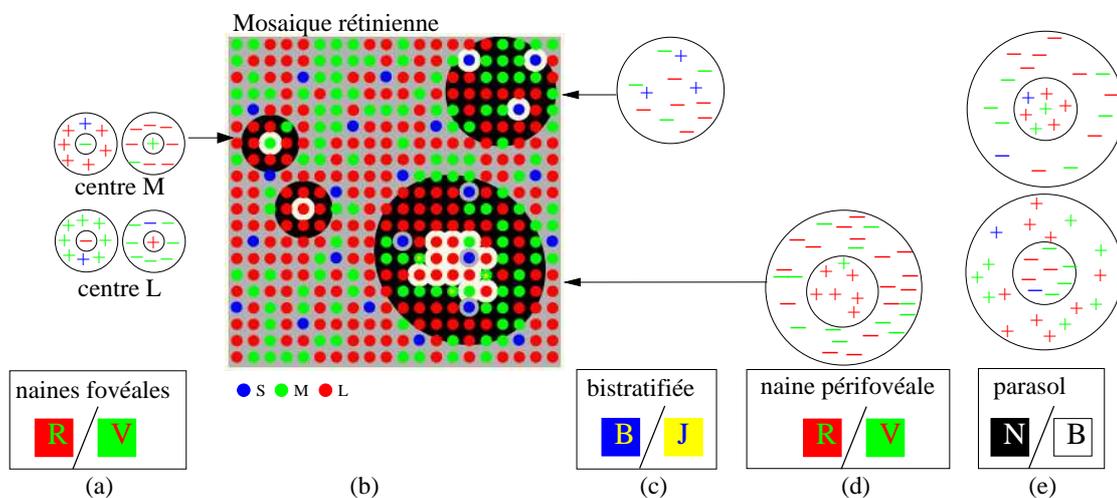


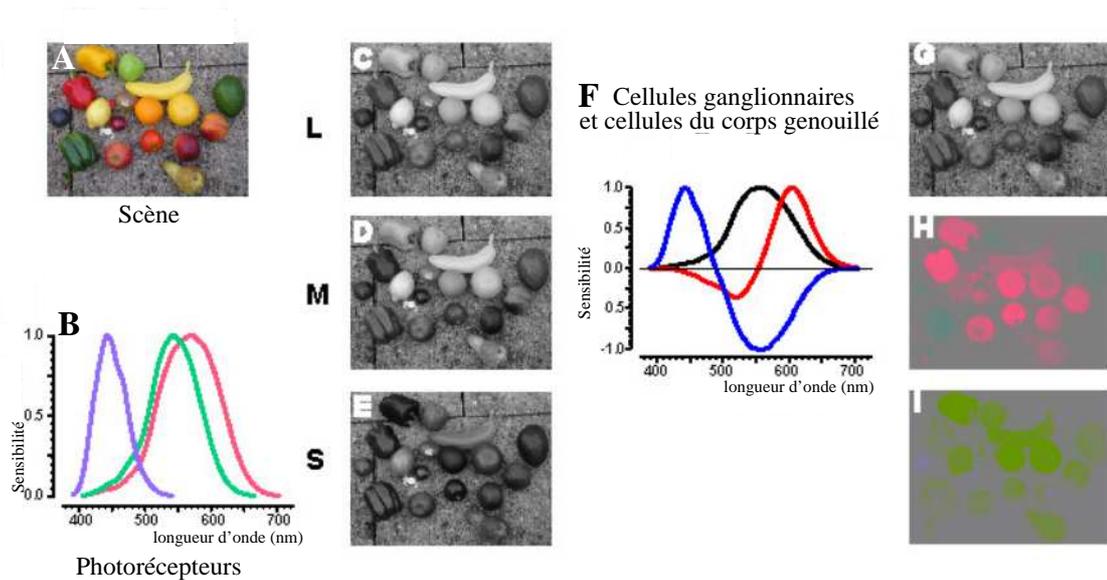
Figure 9. Champs récepteurs de cellules ganglionnaires; (a) naines "on-off" et "off-on" de la fovéa, d'opposition L/M; (b) Mosaïque rétinienne schématique de primate d'après [13]; entourée de blanc: centre du champ récepteur, de noir: pourtour, de gris: ni centre ni pourtour; (c) bistratifiée; (d) naine périfovéale; (e) parasol "on-off" et "off-on"

Il y aurait essentiellement trois types de cellules ganglionnaires [5] (voir Figure 9) qui constitueraient 75 % de l'ensemble [17], le quatrième type étant marginal:

- Naine: petite cellule dont le CR est de type “on-off” ou “off-on”, suivant que le centre est excitant ou inhibant, avec un réponse maximale pour un contraste maximal entre les stimuli du pourtour/centre, réalisant ainsi un contraste local. Suivant la localisation de son centre dans la fovéa ou en périphérie, ce dernier sera constitué d’un ou plusieurs cônes (voir Figures 9 (a) et (d)). Les auteurs s’accordent pour dire que la cellule ganglionnaire naine code le contraste L/M contraste aussi qualifié de rouge/vert. Le codage est transmis de la rétine au corps genouillé latéral, situé à mi-chemin entre la rétine et le cortex, par la voie *Parvo*, caractérisé par une bonne résolution temporelle. Selon [17] et [23] les cônes S pourraient contribuer au centre de naine.
- Bistratifiée: représentée sur la Figure 9 (c), cellule sans organisation centre/pourtour, avec un CR moyen. La plupart des études considèrent qu’elle code uniquement le contraste S/(L+M) aussi qualifié de bleu/jaune. Le codage serait transmis par la voie *Konio* caractérisé par une résolution temporelle moyenne [21].
- Parasol: cellule avec larges centre et pourtour (voir Figure 9 (e)), mélangeant indifféremment les stimuli des cônes L et M au centre et en périphérie [21]; certains auteurs estiment que les cônes S interviennent également [23], [26], [17]. Elle code donc un contraste de luminance $(L+M+(S))/(L+M+(S))$ par le biais de centre on ou off. Ce codage achromatique serait transmis par la voie *Magno* caractérisé par une excellente résolution temporelle.
- Photosensible: mentionnée dans [5] et [26], ce type de cellules représentant 1 à 3% de l’ensemble, serait directement sensible à la lumière (sans être connectée ni aux cônes ni aux bâtonnets) et donnerait un signal absolu de la lumière.

Gegenfurtner [20] résume les premières étapes de la transformation du tristimulus rétinien en perception colorée sur un exemple illustré par la Figure 10: la lumière issue de (A) est absorbée par les trois types de cellules photosensibles que sont les cônes S, M et L disposés sur la rétine (B). Les réponses des trois stimuli sont représentées par les trois photographies en noir et blanc (C, D, E); les signaux électriques correspondant passent par un circuit complexe qui les transforme en trois canaux (F); l’un correspond à la luminance: le canal Magno ou M (G), les autres à la couleur codée en un canal d’opposition rouge-vert: le canal Parvo ou P (H), et un autre bleu-jaune: le canal Konio ou K (I). Les signaux sont envoyés vers le cortex visuel.

Aussi, trois canaux de résolutions spatiale, spectrale et temporelle différentes transmettraient l’information de la rétine au corps genouillé. Livingstone [23] suggère que la fascination pour le tableau de la Joconde viendrait du fait que des signaux contradictoires seraient envoyés via ces canaux: le canal de fine résolution spatiale transmet un sourire triste tandis que les autres canaux transmettent une expression plus gaie, comme on peut le constater sur une image floue du tableau. L’exploitation de ce traitement visuel à différentes résolutions spatiales est manifestement connue



des artistes depuis longtemps (voir par exemple “All is Vanity” de Charles Gilbert, “Voltaire” ou “Mae West” de Dali, et “Paul” de Chuck Close).

Les auteurs ont tenté d'utiliser ces données physiologiques pour expliquer les expériences psychologiques telles que les images rémanentes (contrastes successifs), les oppositions en couleurs complémentaires (i.e., lumières colorées qui mélangées donnent un neutre) à l'origine de la théorie des opposants attribuée à Herring ou même la notion de quatre teintes de base: rouge, vert, bleu et jaune, à côté du noir et du blanc, mais les processus neuronaux connus actuellement ne permettent pas de rendre compte de ces aspects de la vision colorée. Aussi le rapprochement entre les différents codages et les oppositions en termes de couleur (i.e. contraste rouge/vert, bleu/jaune, noir/blanc) doit être considéré avec réserve.

L'idée que l'information colorée soit séparée de l'information de luminance n'est pas nouvelle chez les artistes, en témoigne la distinction entre les “coloristes” et “valoristes”. Au XVII^e siècle, les partisans de la couleur étaient qualifiés de “runbénistes” et ceux du dessin, les “poussinistes”, en référence à Rubens et Poussin. Des artistes comme Léger ont même préconisé une dissociation de la forme et de la couleur (“femmes au perroquet”, “femme à la fleur”, etc.) comme s'il avait l'intuition d'un traitement neuronal différent. Cette indépendance entre l'information colorée est aussi exploitée dans beaucoup de tableaux de Dufy, ou même en aquarelle de manière générale où un “débordement” de la couleur sur la forme ne gêne pas l'interprétation. Le coloriage des photographies noir et blanc a bénéficié également de cette imprécision de notre perception colorée.

8 Interactions avec la matière

Jusqu'à présent nous avons considéré un rayon en provenance directe d'une source lumineuse. Ce rayon peut interagir avec la matière avant d'entrer dans l'oeil, suivant les différentes modalités présentées dans l'introduction. Parmi celles-ci, l'absorption/réflexion et la transmission peuvent facilement être modélisées à l'aide des spectres. Pour trouver les caractéristiques du tristimulus liées à un matériau donné, il suffit de multiplier le spectre de l'illuminant avec le spectre de réflectance puis par les fonctions de sensibilité des cônes; pour trouver la couleur dans l'espace X, Y, Z de ce matériau éclairé par un illuminant donné et vu en mode d'ouverture, au lieu d'utiliser les fonctions de sensibilité des cônes, on utilise les fonctions d'égalisation, comme illustré sur la Figure 11 pour le citron.

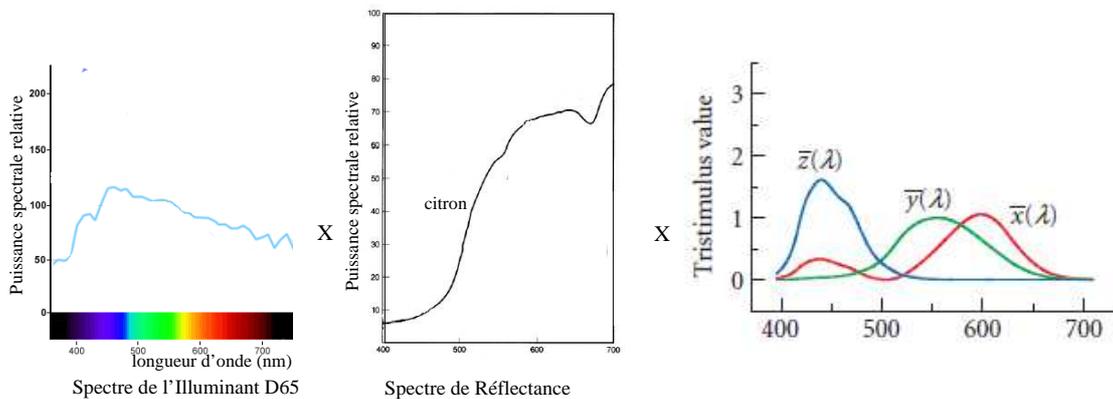


Figure 11. Calcul des composantes X, Y, Z du citron éclairé par un illuminant D65: on multiplie le spectre de l'illuminant par le spectre de réflectance, puis par les fonctions d'égalisation

La couleur d'un objet dépend donc directement de l'illuminant. Au plus le spectre de l'illuminant sera limité en longueurs d'onde au moins grand sera l'ensemble des couleurs possibles. D'où le peu de nuances existantes dans les couleurs de scènes de rue éclairées par des lampes au sodium. Deux matériaux pourraient donc créer la même impression colorée sous un éclairage donné, mais différente sous un autre.

La lumière perd de son intensité puisqu'une partie est absorbée; sa couleur est modifiée puisque l'absorption de manière générale n'est pas uniforme sur toutes les longueurs d'onde. Un pigment noir et un pigment blanc idéal devraient avoir un spectre plat réfléchissant respectivement 0% et 100% de la lumière; en réalité ils réfléchissent respectivement au moins 10% et pas plus de 90% de la lumière [19], et leurs spectres ne sont pas parfaitement uniformes. Les couleurs des surfaces colorées occupent donc une partie plus restreinte de l'espace des couleurs. Les échantillons de

Munsell, qui donnent une idée de l'ensemble des couleurs de surface possibles sont représentés sur la Figure 7 (d).

Le mélange des pigments est donc plus complexe que le mélange des lumières: deux pigments pourraient sembler identiques alors que leur composition spectrale est différente, dès lors, leur comportement dans des mélanges donnera des couleurs différentes. En conséquence, on ne pourra parler de couleurs complémentaires en peinture (au sens: leur mélange donne un gris) que si l'on fait référence à des matériaux précis (ex. PR122), et non pas au nom abstrait de couleur (ex. magenta).

9 Autres modes de vision

En réalité, nous ne percevons pratiquement jamais une couleur comme à travers une ouverture d'écran; la *couleur d'ouverture* décrite jusqu'à présent est purement idéale. A la rigueur, on peut percevoir une surface isolément, on parle alors du mode de *couleur isolée*. Si cette surface est plus intense que le champ environnant on est en présence d'une *couleur lumière*, à l'inverse, en présence d'un champ plus lumineux, on a la perception d'une surface qui renvoie la lumière, c'est le mode de *couleur de surface*. Dans ce cas, pour estimer la couleur d'un objet, le cerveau tient compte de l'illuminant: une adaptation à la luminosité ambiante permet d'ajuster les "valeurs" relatives des différentes surfaces, et une adaptation à la couleur de la lumière permet de réajuster les tons. Aussi dans certaines situations, un tristimulus considéré en mode d'ouverture peut être perçu très différemment: un ocre peut paraître jaune ou brun suivant que la source lumineuse est très faible ou très intense, et même blanc ou gris si la source est jaune. La *constance de couleur* nous permet ainsi d'attribuer une "vraie couleur" aux objets, indépendamment de la lumière incidente. Grâce à cette faculté, n'importe qui peut porter des lunettes teintées de rouge, jaune ou bleu et après un certain temps ne plus se rendre compte du filtrage. Dans la mesure où la couleur et l'intensité de la source varient dans une plage qui correspond aux variations diurnes, notre estimation de couleur absolue sera bonne, au-delà, la perception colorée sera altérée. En fait, l'estimation des caractéristiques de la source est réalisée globalement sur le champ visuel, même si la source n'est pas présente: c'est ce qui nous permet de voir le même tableau de la Joconde dans différentes reproductions même si les unes présentent une dominante jaune, les autres une dominante bleue ou magenta.

Si plusieurs surfaces sont présentes dans le champ visuel on parle de *couleur en relation*: les couleurs interfèrent les unes sur les autres, tant du point de vue de leur valeur, leur teinte ou leur saturation. On parle *d'induction chromatique*. Dans la Figure 12 (a) cet effet est illustré pour des tons neutres: la valeur perçue des carrés dépend du fond. Dans la Figure 12 (b) on a le sentiment de quatre figures éclairées par des sources colorées: jaune et bleu en haut, magenta et cyan

en bas. Dès lors, on ajuste les tons des éléments: le carré central de chacune des mosaïques est perçu comme bleu et jaune en haut, vert et rouge en bas, alors que tous sont du même gris. L'induction chromatique se fait dans le sens de la couleur complémentaire. Quand l'angle sous-tendu par la couleur de l'objet est petit, c'est une *assimilation chromatique* qui a lieu: la couleur a tendance à se rapprocher de celle de son voisinage, comme illustré en (c) où les carrés du centre sont identiques sur les images du haut et du bas, mais sont assimilés différemment en fonction des couleurs voisines. Ces effets peuvent en partie être expliqués par les modèles physiologiques (cf. Section 5). Ces connaissances, divulguées aux peintres par Chevreul, Blanc et Rood, ont été exploitées par Delacroix, Van Gogh, les impressionnistes et pointillistes (Seurat, Signac). Ultérieurement, Albers, à l'origine du mouvement *Op Art*, étudiera de manière systématique les couleurs en relation [6].

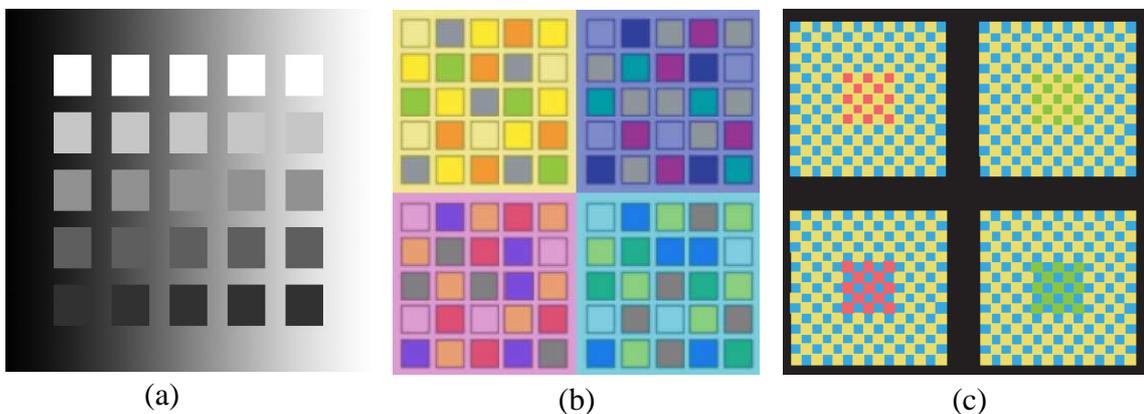


Figure 12. Couleurs en relation. (a) Les carrés de chaque ligne ont la même valeur mais celle-ci est perçue différemment en fonction de la valeur du fond (d'après [19]); (b) les carrés au centre de chacune des mosaïques sont du même gris (d'après [20]); (c) les carrés du centre ont la même couleur (d'après [27])

10 Conclusions

Les mystères de la perception colorée sont aujourd'hui loin d'être entièrement élucidés. Les premiers stades du traitement des signaux lumineux sont quant à eux bien compris; ils permettent de rendre compte de la spécificité de la vision humaine. Lors de la vision diurne, grâce à la présence des cônes (trois types de cellules photo-réceptrices caractérisées par différentes sensibilités aux longueurs d'onde courtes, moyennes et longues), une lumière de composition spectrale donnée se transforme en trois stimuli ensuite combinés, transformés et transmis au cerveau visuel. Il y aurait trois canaux caractérisés par des résolutions spatiale, spectrale et temporelle différentes qui transmettraient des informations complémentaires au cerveau: l'une concerne la

luminance des objets, et les deux autres la couleur. Le cerveau combinerait alors une description grossière des formes basée sur la luminance, une description plus fine et bien localisée des bords des objets et enfin, une information de couleur plus diffuse.

Quand la luminosité est trop faible, les bâtonnets, des cellules plus sensibles que les cônes et dont la sensibilité unique est située vers les plus courtes longueurs d'onde, prennent le relais au niveau de la rétine. C'est pour cette raison que la nuit, tous les chats sont gris!

References

1. <http://courses.ucsd.edu/hpashler/psyc161/Lectures/lecture4.pdf>.
2. http://alcaid.spreadix.com/fr/doc/t/matiere-4/d/la-couleur-et-ses-mysteres_757/c3/.
3. <http://docs.kde.org/stable/fr/kdeedu/kstars/ai-blackbody.html>.
4. http://lesowww.epfl.ch/enerbat/rayonnement_solaire.htm.
5. http://en.wikipedia.org/wiki/Retinal_ganglion_cell.
6. Josef Albers. *Interaction of Color: New Complete Edition*. Yale Univ Pr, 2009.
7. Jean-Marc Alliot. Electromagnétisme, la polarisation. <http://www.photo-lovers.org/>, 2009.
8. Philip Ball and Jacques Bonnet (Traduction). *Histoire vivante des couleurs : 5000 Ans de peinture racontée par les pigments*. Hazan, 2010.
9. Roy S. Berns. *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. John Wiley & Sons, 2000.
10. David H. Brainard and Andrew Stockman. *the OSA Handbook of Optics*, chapter Colorimetry, pages 10.1–10.56. McGraw-Hill, 2010.
11. Mark Changizi. *The Vision Revolution: How the Latest Research Overturns Everything We Thought We Knew About Human Vision*. BenBella Books, 2010.
12. Philippe Delerm. *Sundborn ou les jours de lumière*. Gallimard, 1998.
13. Jonathan Demb and David Brainard. Neurons show their true colors. *Nature*, 467:671–672, 2010.
14. Michael Douma. Color vision and art. <http://www.webexhibits.org/colorart/index.html>.
15. Bevil Conway et al. Functional connectivity in the retina at the resolution of photoreceptors. *The Journal of Neuroscience*, 30(45):14955–14963, 2010.
16. Céline Caumon et al. *Lumière sur la couleur*. Editions de Monza, 2010.
17. Greg Field et al. Functional connectivity in the retina at the resolution of photoreceptors. *Nature*, 467:673–677, 2010.
18. Bruce Mac Evoy. Light and the eye. <http://www.handprint.com/HP/WCL/>, 2009.
19. Bruce Mac Evoy. Basic forms of color. <http://www.handprint.com/HP/WCL/>, 2010.
20. Karl Gegenfurtner. Cortical mechanisms of colour vision. *Nature Reviews Neuroscience*, 4:563–572, 2003. <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/>.
21. Michel Imbert. *La couleur, Lumière, vision et matériaux*, chapter 1: Connaissance de la couleur, pages 18–34. Editions Belin, 2006.
22. Philippe Lanthony. *Lumière, vision et peinture*. Citadelles et Mazenot, 2009.
23. Margaret Livingstone. *Vision and Art: The Biology of Seeing*. Harry N. Abrams, 2002.
24. Jean Le Rohellec. *Lumière sur la couleur*, chapter Vision et perception de la couleur. Editions de Monza, 2010.
25. Robert Sève. *Science de la couleur—Aspects physiques et perceptifs*. Chalagam Edition, 2009.
26. Samuel Solomon and Peter Lennie. The machinery of colour vision. *Nature Reviews Neuroscience*, 8:276–286, 2007.
27. Andrew Stockman and David H. Brainard. *the OSA Handbook of Optics*, chapter Color Vision Mechanisms, pages 11.1–11.103. McGraw-Hill, 2010.
28. Bernard Valeur. *Lumière et luminescence — Ces phénomènes lumineux qui nous entourent, Chapitre 2: Une brève histoire de la couleur*, chapter Chapitre 2: Une brève histoire de la couleur, pages 18–39. Editions Belin, 2005.
29. Françoise Viénot. *La couleur, Lumière, vision et matériaux*, chapter Chapitre 2: La vision en couleur des surfaces, pages 50–53. Editions Belin, 2006.
30. Olivier Wajsfelne. <http://www.physique.vije.net/BTS/index.php?page=photometrie2>.