



HAL
open science

Colorimétrie et physiologie : la spécification LMS

Françoise Viénot, Jean Le Rohellec

► **To cite this version:**

Françoise Viénot, Jean Le Rohellec. Colorimétrie et physiologie : la spécification LMS. Couleur numérique : acquisition, perception, codage et rendu (Traité Signal et Image, IC2), , Hermès, Lavoisier, 2012. <hal-01565889>

HAL Id: hal-01565889

<https://hal.science/hal-01565889v1>

Submitted on 9 Aug 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Couleur numérique :
Acquisition, perception, codage et rendu

Christine Fernandez-Maloigne, Frédérique Robert-Inacio, Ludovic Macaire

10 août 2011

Table des matières

Chapitre 1. Colorimétrie et physiologie : la spécification LMS	11
Françoise VIENOT et Jean LE ROHELLEC	
1.1. Fondements physiologiques	11
1.1.1. Les photorécepteurs	12
1.1.1.1. Sensibilité spectrale des cônes, l'univariance de la réponse d'un photorécepteur	12
1.1.1.2. La mosaïque rétinienne	12
1.1.2. Organisation rétinienne	13
1.1.2.1. Notion de champ récepteur du neurone	13
1.1.2.2. Deux voies parallèles de la rétine au cortex	14
1.1.2.3. A l'origine des voies Konio- Parvo- et Magno-cellulaires	14
1.1.2.4. Particularité fonctionnelle de la voie Parvo-cellulaire (P)	15
1.1.2.5. Trois voies nerveuses au sortir de la rétine	15
1.1.3. Modélisation physiologique des attributs visuels liés à la couleur	17
1.1.3.1. Niveau réceptoral et antagonisme de cône	17
1.1.3.2. Troisième niveau : Antagonisme perceptif	17
1.2. La colorimétrie XYZ, le système de référence de la CIE	18
1.3. La colorimétrie LMS	20
1.3.1. Les fondamentales LMS	20
1.3.1.1. Mesure de la sensibilité spectrale des cônes par des tech- niques psychophysiques	20
1.3.1.2. Les pigments photosensibles et les fondamentales de cônes : définition et propriétés	20
1.3.1.3. Les recommandations de la CIE	21
1.3.1.4. Diversité des observateurs	22
1.3.2. Applications de la colorimétrie LMS	23
1.3.2.1. La spécification LMS	24
1.3.2.2. La luminance en colorimétrie LMS	24
1.3.2.3. Domaine des couleurs réelles	24

10 Couleur numérique : Acquisition, perception, codage et rendu

1.3.2.4. Le métamérisme	24
1.3.2.5. La simulation de la vision des daltoniens	27
1.3.2.6. La substitution silencieuse	27
1.3.2.7. Généralisation du modèle LMS	27
1.3.3. La discrimination des couleurs	29
1.3.3.1. Le diagramme de chromaticité isoluminant de MacLeod- Boynton	29
1.3.3.2. L'orientation et la taille des ellipses de MacAdam	29
1.4. Les couleurs dans leur contexte	30
1.4.1. CIECAM02	31
1.4.2. L'adaptation chromatique	31
1.4.3. Cloisonnement de l'espace perceptif par les teintes élémentaires	31
1.4.3.1. Le contraste simultané	32
1.4.3.2. Effet d'association et assimilation	32
1.5. Conclusion	32
1.6. Bibliographie	33

Chapitre 1

Colorimétrie et physiologie : la spécification LMS

Connaître le fonctionnement du système visuel humain est nécessaire pour tester et améliorer la qualité des images en couleur. La colorimétrie est l'outil incontournable pour apprécier quantitativement les modifications que l'ingénieur fait subir à une image. Les progrès récents dans cette discipline sont dus à une meilleure connaissance des mécanismes visuels.

Ce chapitre décrit d'abord les mécanismes physiologiques ayant leur siège de la rétine au cerveau, qui génèrent la sensation de couleur. Puis il présente deux approches la colorimétrie, la première, telle qu'elle est recommandée par la Commission internationale de l'éclairage (CIE), la seconde, directement issue de la physiologie du système visuel, et apte à spécifier le stimulus et les différences colorées. Enfin, le chapitre expose les difficultés liées à la définition de l'apparence colorée, et l'avantage à s'appuyer sur la modélisation du système visuel humain.

1.1. Fondements physiologiques

La lumière pénètre dans l'œil où elle excite les photorécepteurs qui sont des cellules photosensibles. Elle génère des modifications biochimiques de leur métabolisme et produit un signal relayé par différentes classes de neurones rétiniens post-réceptoraux. Les neurones rétiniens post-réceptoraux s'organisent selon un réseau à deux directions ; une radiale, l'autre transversale. L'information est acheminée selon

la direction radiale des récepteurs vers les cellules bipolaires puis vers les cellules ganglionnaires - dont les axones constituent le nerf optique. Les cellules horizontales et les cellules amacrines constituent un réseau transversal, dont l'action module les signaux directs. Puis, le signal transite sous forme de trains de potentiels d'actions par le nerf optique vers le cortex visuel, donnant lieu in fine à la perception.

1.1.1. Les photorécepteurs

1.1.1.1. Sensibilité spectrale des cônes, l'univariance de la réponse d'un photorécepteur

Chaque photon absorbé par un cône déclenche une cascade de réactions chimiques produisant un signal à la sortie du cône, quelle que soit la longueur d'onde associée à ce photon. De ce fait, l'amplitude de la réponse du cône à la lumière ne dépend que du nombre de photons absorbés, et non de la longueur d'onde associée aux photons. Alors que la lumière est une grandeur physique multidimensionnelle dans le domaine spectral, la réponse d'un cône isolé est univariante, elle ne varie qu'en amplitude. La probabilité que le photon a d'être absorbé par le cône est d'autant plus élevée que le photon a une énergie proche de celle que nécessite l'isomérisation du pigment photosensible inclus dans le cône. Cette probabilité d'absorption détermine la sensibilité spectrale du cône.

Des mesures in vitro de la sensibilité des cônes ont montré l'existence de trois familles de cônes rétiens, au maximum de sensibilité spectrale situé respectivement vers 419, 531, et 558 nm ce qui donnerait pour des mesures in vivo dans un œil intègre, compte tenu de l'effet filtrant des milieux oculaires, environ 440 nm pour les cônes S, sensibles aux courtes longueurs d'onde, 540 nm pour les cônes M, sensibles aux moyennes longueurs d'onde et 565 nm pour les cônes L, sensibles aux grandes longueurs d'onde. Les courbes de sensibilité spectrale sont assez largement étalées sur le spectre visible, proches l'une de l'autre pour les cônes M et L. A noter qu'il n'existe pas de cônes rétiens dont le maximum de sensibilité se situe dans la partie du spectre qui nous apparaît rouge (au-delà d'environ 620 nm), ce qui indique que les cônes rétiens ne sont pas des récepteurs simples de couleur. La couleur rouge, comme les autres couleurs, sont reconstruites par le système visuel. Ce sont les cônes M et L qui donnent à l'œil son maximum de sensibilité à la lumière autour de 555 nm.

1.1.1.2. La mosaïque rétinienne

Il est possible d'observer en microscopie optique ou électronique la mosaïque rétinienne constituée de deux types de photorécepteurs morphologiquement distincts, les bâtonnets responsables de la vision aux faibles éclaircissements, et les cônes pour les éclaircissements plus élevés. La densité numérique des cônes est maximale en fovéa, c'est-à-dire sur la zone centrale de la rétine où se forme l'image des objets sur lesquels se fixe notre regard, et chute de façon importante vers la périphérie. Il est aussi

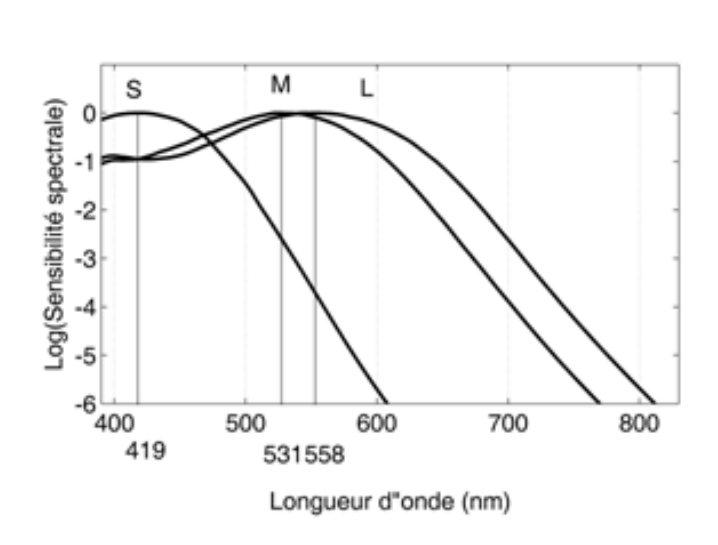


Figure 1.1. Sensibilité spectrale des trois familles de cônes.

possible d'observer les cônes *in vivo*, au fond de l'œil, à l'aide d'une optique adaptative neutralisant les aberrations, et même d'identifier leur famille d'appartenance L, M, ou S. Parmi la dizaine de rétines qui ont été examinées, on a vérifié que les cônes S sont relativement peu nombreux et que la proportion numérique des cônes L et M est en moyenne de 2L pour 1M, avec une surprenante variabilité d'un individu à un autre allant de 1L pour 2M à 16L pour 1M, pour une vision normale des couleurs.

1.1.2. Organisation rétinienne

L'extraction du signal chromatique se réalise par la comparaison des signaux issus d'une famille de cônes à ceux issus d'une autre famille de cônes. Cette comparaison est réalisée par des neurones rétiniens post-réceptoraux.

1.1.2.1. Notion de champ récepteur du neurone

Chaque neurone du système visuel - où qu'il soit situé dans la hiérarchie du traitement - est en correspondance avec une zone donnée de l'espace vu par le sujet - et corrélativement avec l'ensemble des photorécepteurs sollicités, au sein de laquelle le comportement bio-électrique du neurone est modifié ; cette zone est appelée le champ récepteur du neurone.

Les champs récepteurs sont de petite taille dans la fovéa, et de plus en plus grands à mesure que l'on s'en écarte. Chaque neurone n'est concerné que par une petite partie

du champ de vision ; cette partie est circulaire et le codage du signal en charge de chaque neurone dépend de son environnement immédiat.

Un neurone rétinien ne réalise pas un codage absolu de la lumière contenue dans son champ récepteur, mais un codage relatif à l'état lumineux dans le proche voisinage. Seul un signal différentiel (contraste) génère un signal dans le neurone, qui est communiqué aux neurones suivants dans la hiérarchie du traitement de l'information visuelle. Le contraste peut porter aussi bien sur une différence de lumière que sur une différence de contenu spectral de la lumière.

1.1.2.2. *Deux voies parallèles de la rétine au cortex*

Le contact chimique entre les photorécepteurs et les cellules bipolaires et les cellules horizontales est réalisé au niveau du pied du cône est appelé " synapse ". Le type de synapse détermine une dichotomie fonctionnelle fondamentale du codage du signal lumineux. Certaines cellules bipolaires réalisent des synapses qui conservent la polarité du signal provenant du cône, d'autres l'inversent. Les cellules bipolaires-ON signalent un incrément de lumière au centre du champ récepteur (par rapport au pourtour) ; elles initient une voie nerveuse appelée voie ON. Les cellules bipolaires-OFF signalent un décrement de lumière au centre du champ récepteur (par rapport au pourtour) ; elles initient une voie nerveuse appelée voie OFF. Ces voies ON et OFF desservent en parallèle chaque surface unitaire de l'espace visuel en codant toutes les variations de lumière et demeurent indépendantes jusqu'au cortex.

1.1.2.3. *A l'origine des voies Konio- Parvo- et Magno-cellulaires*

Différents types de cellules bipolaires constituent l'origine de trois voies neuro-physiologiques distinctes de la rétine au cortex : la voie Konio-cellulaire dédiée à la différenciation spectrale, la voie Parvo-cellulaire dédiée à la différenciation spectrale et à la différenciation lumineuse et la voie Magno-cellulaire dédiée à la différenciation lumineuse.

Les cellules bipolaires naines (midget bipolar - MB) sont les plus nombreuses. Elles reçoivent les signaux des cônes L et M. Elles se distinguent par le type de synapse ; les unes appartiennent à la voie ON, les autres à la voie OFF (voir § suivant).

Pour faciliter la nomenclature, un neurone dont le champ récepteur est à centre ON (répondant à un incrément de lumière), sera codé par " + ", et un neurone dont le champ récepteur est à centre OFF (répondant à un décrement de lumière), sera codé " - ". La lettre suivant le signe représente le type de cône majoritaire au centre, soit L, soit M (nous évoquerons les cônes S dans le paragraphe suivant). Implicitement, le pourtour du champ récepteur reçoit les signaux de l'autre famille de cônes, soit M, soit L, sur un mode antagoniste. Ainsi, par exemple, un neurone noté +L transmettra un signal si le centre est plus lumineux que le pourtour et/ou si la composition spectrale au

centre favorise les grandes longueurs d'onde. Ainsi, les cellules bipolaires naines sont de 4 types principaux +L, -L, +M, -M. Ces neurones sont les éléments primordiaux de la voie Parvo-cellulaire et les principaux initiateurs de la vision des couleurs et de la vision des formes et des détails.

Les cellules bipolaires spécifiques des cônes S sont les éléments primordiaux de la voie Konio-cellulaire. Elles réalisent un codage de l'antagonisme spectral en opposant les signaux de courtes longueurs d'onde (S) à ceux des plus grandes longueurs d'onde (L et M), mais ne participent pas au codage des variations de clarté.

Les cellules bipolaires diffuses ne sont pas sélectives de l'origine spectrale. Les unes sont ON, les autres OFF. Ces neurones sont les éléments primordiaux de la voie Magno-cellulaire, qui initie la perception du mouvement, du papillotement et des variations de clarté.

1.1.2.4. *Particularité fonctionnelle de la voie Parvo-cellulaire (P)*

Dans leur grande majorité, les neurones de la voie Parvo-cellulaire sont sensibles aussi bien aux variations spectrales qu'aux variations lumineuses, mêlant ainsi deux variables perceptivement distinctes : la variation de clarté (précurseur de la forme) et la variation de chromaticité (précurseur de la couleur). Sur une même zone de l'image, ces neurones présentent deux organisations fonctionnelles de champs récepteurs : un champ récepteur sensible aux variations strictement lumineuses et un champ récepteur sensible aux variations spectrales. Par exemple, un neurone +L, signale un incrément lumineux au centre de son champ récepteur ET/OU, pour une stimulation équiluminante, le neurone signale que le centre est couvert d'une lumière plus riche en grande longueur d'onde que celle éclairant le pourtour.

1.1.2.5. *Trois voies nerveuses au sortir de la rétine*

Compte tenu de la large bande de sensibilité spectrale des cônes, l'antagonisme de cône permet, outre une économie de messagers, de décorrélérer les signaux des cônes et de minimiser les redondances au sein et entre les 3 voies Magno-, Parvo-, Konio-cellulaires [ZAI 97] [SHE 08].

Il est remarquable que chaque cône puisse interagir simultanément avec de nombreux types de cellules bipolaires. Tout se passe comme si le signal d'un cône était transcrit spécifiquement selon la spécialisation du neurone qu'il contacte, créant ainsi de multiples filtres d'une seule information générée par l'interaction de la lumière avec le photorécepteur.

Dans chacune des voies, les cellules ganglionnaires collectent les signaux issus des cellules bipolaires modulés par les cellules amacrines et les transmettent aux neurones du corps genouillé latéral du thalamus sans modification fonctionnelle notable et avec des taux de convergence variables selon la distance à la fovéa. Ces signaux se

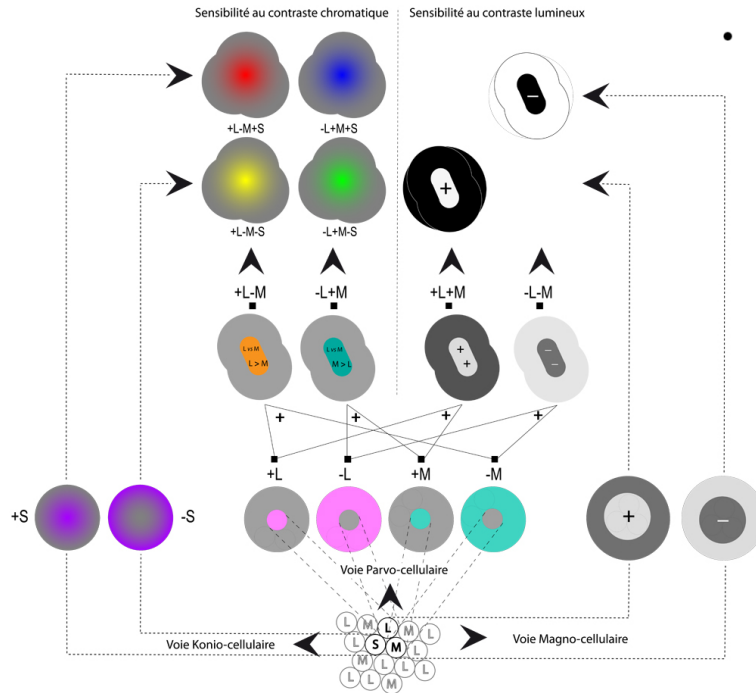


Figure 1.2. Représentation schématique de trois voies nerveuses indépendantes de la rétine au cortex, à partir des cônes. Premier niveau : Niveau récepteur de 3 types de cônes, L, M et S (ici version minimale de 3 cônes). Deuxième niveau : Les champs récepteurs des neurones de la voie Parvo-cellulaire combinent les signaux des cônes L et M ; l'antagonisme de cônes se manifeste par une organisation centre-pourtour codant à la fois le contraste lumineux (+ ; -) et le contraste spectral (L, M) donnant lieu à 4 types d'unités (+L, -L, +M, -M). Les champs récepteurs des neurones de la voie Konio-cellulaire combinent les signaux des cônes S avec les signaux des cônes sensibles aux plus grandes longueurs d'onde (L et M) sous la forme de champ récepteurs co-extensifs codant le contraste chromatique (S vs LM). Les champs récepteurs des neurones de la voie Magno-cellulaire combinent les signaux des cônes L et M, l'organisation centre-pourtour code le contraste lumineux (+ ; -). Troisième niveau : Combinaison additive des champs récepteurs des unités de la voie Parvo-cellulaire, donnant lieu à des unités sélectives au contraste chromatique fin et à des unités sélectives au contraste lumineux fin. Le codage du contraste chromatique est renforcé et affiné par la sommation des unités Parvo- avec les unités Konio-cellulaires. Le codage du contraste lumineux est renforcé et affiné par la sommation des unités Parvo- avec les unités Magno-cellulaires.

projetent ensuite sur le cortex visuel primaire, où ils sont combinés (sommés et/ou différenciés). À mesure que l'on s'élève dans la hiérarchie du traitement, la taille des champs récepteurs augmente prenant en compte des zones de plus en plus étendues du champ visuel.

1.1.3. Modélisation physiologique des attributs visuels liés à la couleur

Le modèle De Valois & De Valois [VAL 93] permet de rendre compte, de la ségrégation des informations chromatiques et lumineuses mêlées dès les premières étapes dans les voies visuelles. Ce modèle distingue plusieurs niveaux successifs de l'élaboration du signal nerveux conduisant à la perception de la couleur.

1.1.3.1. Niveau réceptoral et antagonisme de cône

Le modèle repose sur l'existence de 3 types de cônes, L, M, S. Les cônes S sont arrangés selon un maillage régulier et sont peu nombreux (par exemple, en proportion : 10 L pour 5 M pour 1 S).

L'antagonisme de cône est un codage différentiel entre le centre et le pourtour du champ récepteur. Chaque cône dispose au niveau de son pied d'un grand nombre de sites synaptiques. Une version minimale du modèle propose que chaque cône établisse un contact avec au moins 8 cellules bipolaires ; 4 avec des neurones ON (+L ; +M, +S et +LMS) et 4 avec des neurones OFF (-L ; -M, -S et -LMS).

1.1.3.2. Troisième niveau : Antagonisme perceptif

L'antagonisme de cônes du deuxième niveau fournit une information relative, locale, de nature dichotomique (par exemple, plus de lumière là que là, moins de grandes longueurs d'ondes là que là...). Le troisième niveau rend compte de la séparation de l'information concernant le contenu spectral de celle concernant le contenu lumineux. Les signaux parvenant au cortex sont sommés en tenant compte de l'organisation rétinotopique (le voisinage initial sur la rétine est préservé). La sommation des signaux du deuxième niveau renforce tantôt le contraste lumineux tantôt le contraste chromatique. Lorsque les unités d'origine spectrale différentes sont de même signe, par exemple : (+L) + (+M), le contraste lumineux est renforcé. Lorsqu'elles sont de signe opposé, par exemple (+L) + (-M), leur action commune renforce le signal de contraste chromatique, formant un champ récepteur à double antagonisme chromatique entre le centre et le pourtour, signalant de fines variations du contraste chromatique.

Compte tenu du recouvrement rétinotopique au niveau du cortex, les signaux issus des cônes S, véhiculés par la voie Konio-cellulaire, et les signaux de la voie Magno-cellulaire interagissent avec les signaux de la voie Parvo-cellulaire, affinant alors le signal chromatique et le signal lumineux.

Pour simplifier, au niveau du cortex visuel, quatre types d'informations sont disponibles. Deux concernent la nature spectrale de la lumière et deux son intensité relative entre le centre et le pourtour du champ récepteur indépendamment de sa nature spectrale :

- 1) le contraste spectral, local, entre les grandes et les plus courtes longueurs d'onde (L vs M) ;
- 2) le contraste spectral, local, entre les courtes longueurs d'onde d'une part et les plus grandes longueurs d'onde d'autre part (S vs L+M) ;
- 3) le contraste local de luminance entre le centre et le pourtour du champ récepteur de petite taille (parvo-cellulaire) ;
- 4) le contraste local de luminance entre le centre et le pourtour du champ récepteur de grande taille (magno-cellulaire).

Il existe une aire corticale associative spécifique du traitement de l'information " couleur " : l'aire V4. Elle traite les signaux issus de l'aire V1. Dans cette aire V4, les champs récepteurs sont de grande taille. Ainsi, les signaux chromatiques peuvent être interprétés en fonction du contexte chromatique avoisinant.

La modélisation de la vision des couleurs nécessite encore d'être développée pour prendre en compte, la pondération des signaux des cônes, le mode linéaire et/ou non linéaire des sommations [VAL 00] [GEG 03], le rôle de l'adaptation lumineuse et chromatique [VAL 08] et la nature de la constance de couleur.

1.2. La colorimétrie XYZ, le système de référence de la CIE

En colorimétrie, la lumière est un stimulus qui déclenche une sensation de couleur. La colorimétrie constitue un ensemble de méthodes et de données pour spécifier les couleurs de manière universelle.

Il existe deux procédés pour reproduire les couleurs. La synthèse additive consiste à additionner des lumières. Leurs images se projettent sur la rétine et leurs effets s'ajoutent. C'est le procédé d'affichage sur les écrans de visualisation. La synthèse soustractive consiste à superposer sur un support des colorants absorbants, soustrayant à la lumière réfléchi par le support une partie des rayonnements qui ainsi n'atteindront pas la rétine. C'est le procédé exploité dans les imprimantes.

La colorimétrie est fondée sur des expériences visuelles. L'expérience montre que la couleur de presque toutes les lumières peut être reproduite par l'addition de trois lumières appelées couleurs primaires additives, pratiquement du rouge, du vert et du bleu, en quantités convenables. L'expérience, appelée " égalisation de couleur ", montre aussi que les couleurs ont les propriétés des vecteurs, en particulier la propriété d'additivité. De ce fait, on applique aux couleurs et aux mélanges additifs de

couleurs les lois de l'algèbre linéaire. Les couleurs primaires réelles additives constituent les vecteurs de base [R], [G], [B]. Une couleur est définie par trois quantités scalaires R, G, B., appelées composantes trichromatiques (à ne pas confondre avec les intensités numériques codant la couleur d'un pixel).

Compte tenu des propriétés des mélanges additifs de couleurs, et du fait de l'homogénéité des égalisations de couleur réalisées par plusieurs observateurs, il a été décidé d'établir un système universel de spécification des couleurs. En 1931, la Commission internationale de l'éclairage (CIE) adopta le système colorimétrique XYZ, obtenu par transformation linéaire du système colorimétrique RGB. Les primaires [X], [Y] et [Z] sont virtuelles. Elles ont été choisies pour que toutes les couleurs, y compris les rayonnements monochromatiques, aient des composantes trichromatiques X , Y et Z positives, et pour que l'axe [Y], seul, porte la luminance. Soit $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ et $\bar{z}(\lambda)$, les composantes trichromatiques spectrales, ou fonctions colorimétriques, étant donné un rayonnement de répartition (ou densité) spectrale d'énergie $\Phi(\lambda)$, les composantes trichromatiques X , Y et Z de ce rayonnement sont calculées comme

$$\begin{aligned} X &= 683 \sum F(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= 683 \sum F(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= 683 \sum F(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (1.1)$$

Dans le cas d'un écran de visualisation, la fonction $\Phi(\lambda)$ est donnée par la mesure de la luminance énergétique ou radiance spectrale. Grâce au facteur d'ajustement 683, la composante trichromatique Y correspond à la luminance visuelle du rayonnement.

Dans le cas d'un matériau réfléchissant de facteur de réflexion $\rho(\lambda)$, éclairé par une source de répartition spectrale d'énergie $\Phi(\lambda)$, les composantes trichromatiques sont calculées relativement à une surface blanche de facteur de réflexion unité. La composante trichromatique Y est dans ce cas égale au facteur de réflexion (en anglais "reflectance").

$$\begin{aligned} X &= 100 \frac{\sum F(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda}{\sum F(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \\ Y &= 100 \frac{\sum F(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda}{\sum F(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \\ Z &= 100 \frac{\sum F(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda}{\sum F(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \end{aligned} \quad (1.2)$$

1.3. La colorimétrie LMS

En colorimétrie, la lumière est un stimulus qui déclenche une sensation de couleur. Or la vision en couleur commence avec l'absorption des photons par les pigments visuels contenus dans les cônes de la rétine. Ainsi, la lumière, en tant que stimulus, peut être définie par les trois signaux L, M, S qu'elle déclenche dans les cônes et qui constituent les signaux d'entrée sur le système visuel.

1.3.1. *Les fondamentales LMS*

1.3.1.1. *Mesure de la sensibilité spectrale des cônes par des techniques psychophysiques*

Comme leurs sensibilités spectrales se recouvrent, il est impossible d'obtenir la réponse d'une seule famille de cônes avec des rayonnements monochromatiques. On utilise une méthode psychophysique qui tire avantage de la réduction à deux familles de cônes chez certains daltoniens. Ces dichromates ne possèdent que des cônes S et L, ou des cônes S et M. On mesure la sensibilité spectrale relative des cônes L, ou M, en faisant alterner temporellement deux radiations monochromatiques, l'une servant de référence, l'autre de test. La cadence est assez rapide pour que l'influence initiée par les cônes S soit minimale, laissant subsister un léger papillotement. La sensation de papillotement est minimum lorsque les deux radiations ont la même efficacité visuelle. En procédant ainsi pour toutes les longueurs d'onde test, on obtient la sensibilité spectrale des cônes qui ont suivi le papillotement.

1.3.1.2. *Les pigments photosensibles et les fondamentales de cônes : définition et propriétés*

Les phénomènes d'absorption des photons par les molécules de pigments photosensibles sont des phénomènes quantiques. On a constaté que les spectres d'absorption de tous les pigments photosensibles des vertébrés terrestres, mesurés *in vitro*, ont pratiquement la même forme sur un graphique dont l'axe des abscisses est gradué en inverse de la longueur d'onde.

On appelle fondamentale, ou fondamentale de cônes, la sensibilité spectrale des cônes mesurée à l'entrée de la cornée, c'est-à-dire des cônes intégrés dans l'œil, avec tous les filtres tels que le cristallin, le pigment maculaire ou et autres, qui absorbent une fraction de la lumière entrant dans l'œil avant qu'elle ne parvienne à la rétine. Les fondamentales de cônes doivent être liées aux fonctions colorimétriques par une relation linéaire.

La mesure objective de la sensibilité spectrale des cônes est récente. Pendant de nombreuses années, celle-ci n'a été accessible que par des méthodes expérimentales indirectes.

En posant quelques hypothèses, telles que l'absence d'une famille de cônes chez les dichromates, la nécessité d'obtenir des réponses spectrales de cônes positives, et la vraisemblance de la forme du spectre d'absorption de pigments photosensibles, il a été possible, dès la fin du XIXe siècle, de prédire les fondamentales à partir des égalisations de couleur réalisées par des sujets normaux ou dichromates.

L'approche la plus précise et la plus complète est fournie par la colorimétrie, où chaque rayonnement monochromatique est défini par ses composantes trichromatiques spectrales $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Il reste à trouver la relation linéaire qui fait correspondre ces valeurs à la réponse spectrale des cônes $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$.

1.3.1.3. Les recommandations de la CIE

La Commission Internationale de l'Éclairage [1] a publié des tables donnant les valeurs de sensibilité spectrale relative des fondamentales L, M et S pour un champ d'observation de 10° de diamètre angulaire et pour un champ de 2° , pour un observateur moyen, jeune, à vision des couleurs normale. Les recommandations reprennent les travaux de Stockman et Sharpe [STO 00] sur plusieurs années.

Pour un champ d'observation de 10° d'angle visuel, soit une surface de diamètre 10 cm vue à 57 cm, les fondamentales $\bar{l}_{10}(\lambda)$, $\bar{m}_{10}(\lambda)$, $\bar{s}_{10}(\lambda)$ dérivent des égalisations de couleur réalisées par 49 observateurs et obtenues par Stiles et Burch [STI 59]. Ces fonctions colorimétriques expérimentales $\bar{r}_{10}(\lambda)$, $\bar{g}_{10}(\lambda)$, $\bar{b}_{10}(\lambda)$ données pour des primaires réelles monochromatiques, rouge (645.2 nm), verte (526.3 nm) et bleue (444.4 nm), présentent une qualité supérieure à toutes les précédentes. Les fondamentales sont obtenues par transformation linéaire

$$\begin{pmatrix} \bar{l}_{10}(\lambda) \\ \bar{m}_{10}(\lambda) \\ \bar{s}_{10}(\lambda) \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \bar{r}_{10}(\lambda) \\ \bar{g}_{10}(\lambda) \\ \bar{b}_{10}(\lambda) \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Pour un champ d'observation de diamètre angulaire 10° , les fondamentales présentent un maximum de sensibilité à 568,6 nm, 541,3 nm et 447,9 nm.

Les valeurs de la fonction colorimétrique $\bar{s}_{10}(\lambda)$, tabulées par la CIE sont légèrement différentes de ce que donnerait la transformation linéaire ci-dessus, mais les conséquences pour la colorimétrie sont négligeables. Les tables sont accessibles sur le site <http://www.cvr1.org/>.

Malheureusement, pour un champ d'observation de diamètre angulaire 2° , les données expérimentales de qualité n'étaient pas disponibles. Or, plusieurs facteurs physiologiques sont modifiés avec l'excentricité. Il a été décidé d'adopter un schéma de calcul permettant de prédire des fondamentales compatibles avec les données physiologiques et psychophysiques connues. Le schéma consiste à partir des fondamentales

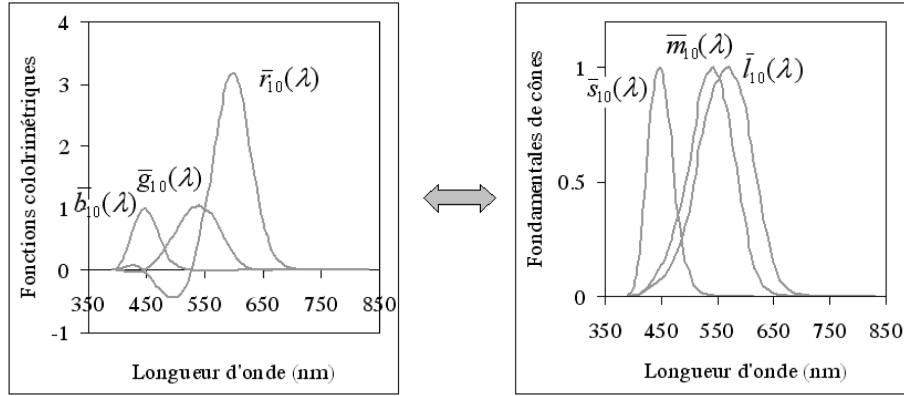


Figure 1.3. Fonctions colorimétriques expérimentales $\bar{r}_{10}(\lambda)$, $\bar{g}_{10}(\lambda)$, $\bar{b}_{10}(\lambda)$ et fondamentales $\bar{l}_{10}(\lambda)$, $\bar{m}_{10}(\lambda)$, $\bar{s}_{10}(\lambda)$ liées par une relation linéaire.

pour un champ de 10° , à remonter à l'absorption des pigments visuels inclus dans les cônes en prenant en compte les phénomènes d'absorption dans plusieurs structures de l'œil, le cristallin, le pigment maculaire, et la densité de pigment photosensible dans les cônes, puis à reprendre le cheminement inverse pour obtenir les fondamentales $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}_{10}(\lambda)$, $\bar{s}_{10}(\lambda)$ pour un champ d'observation de 2° [Com 06] [SCH 07].

La figure 1.4 indique le schéma de calcul des fondamentales validé pour un champ d'observation de 2° , et généralisable à tout champ d'observation de diamètre angulaire compris entre 1 et 10° . La CIE donne toutes les valeurs numériques et équations nécessaires à la modélisation des fondamentales.

1.3.1.4. Diversité des observateurs

Environ 8% de la population masculine manifeste des défauts de la vision des couleurs, sous des formes et à des degrés divers. Les femmes en sont pratiquement exemptes. Ces sujets, appelés daltoniens, confondent certaines couleurs que la majorité des individus voient différentes. Le défaut a pour origine l'absence ou la modification d'une famille de pigments photosensibles.

En ce qui concerne la vision des couleurs normale, les variations individuelles sont de deux ordres. Les variations numériques de populations de cônes, considérables, n'ont pas d'incidence sur la vision et l'identification des couleurs, mais ont un effet sur la visibilité et la clarté relative des couleurs. Les variations spectrales des fondamentales modifient la vision des couleurs. Dans le cadre de la vision des couleurs normale sous-tendue par trois familles de cônes, il existe des sous-familles de pigments photosensibles dont le maximum de sensibilité spectrale est légèrement décalé en longueur d'onde, de l'ordre de quelques nanomètres. Des variations de transmission des milieux oculaires peuvent aussi modifier les fondamentales.

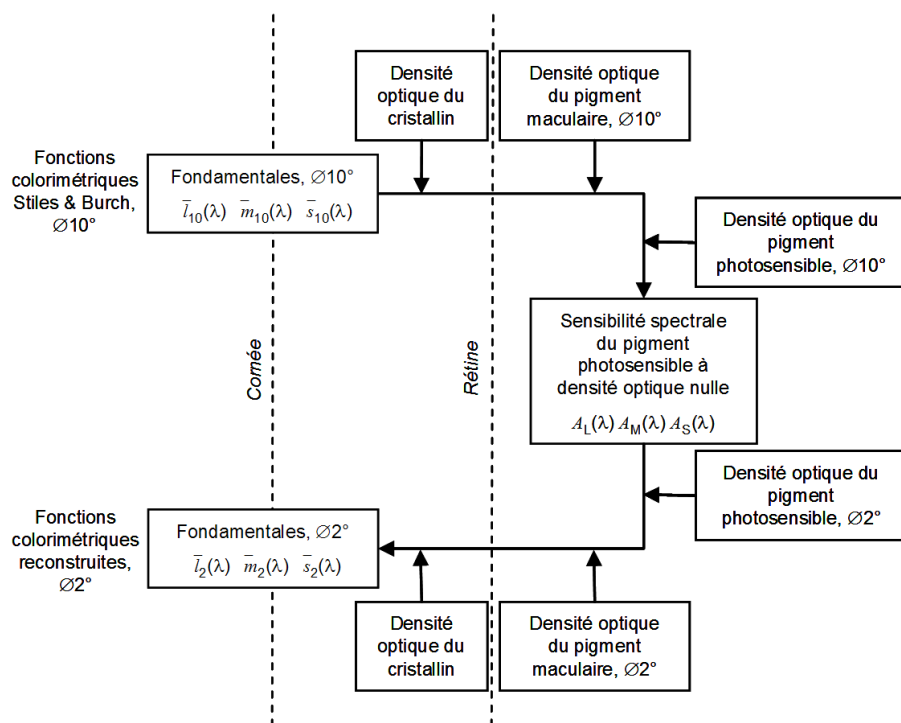


Figure 1.4. Procédure de dérivation des fondamentales de cônes pour un champ d'observation de diamètre angulaire 2° .

Ainsi, d'après les égalisations de couleur de 47 sujets examinés par Stiles et Burch, il a été proposé de classer les observateurs réels en sept catégories, chacune acceptant des égalisations de couleur que rejettent les autres catégories [SAR 10]. Ces variations individuelles ont des répercussions sur l'appréciation des couleurs sur les nouveaux écrans de visualisation à primaires étroites de type diodes électroluminescentes, et pourraient expliquer des désaccords entre individus.

1.3.2. Applications de la colorimétrie LMS

Plusieurs applications exploitent directement la spécification LMS de l'excitation des cônes. La spécification LMS ouvre aussi des perspectives intéressantes pour analyser le traitement des signaux dans les voies visuelles : discrimination des couleurs et mise en forme de l'apparence colorée.

1.3.2.1. La spécification LMS

La spécification L, M, S d'un stimulus, reposant sur l'amplitude de l'excitation des trois familles de cônes, s'obtient par un calcul analogue à celui des composantes trichromatiques X, Y, Z .

$$\begin{aligned} L_Q &= k_L \sum P_\lambda(\lambda) \bar{l}(\lambda) \Delta\lambda \\ M_Q &= k_M \sum P_\lambda(\lambda) \bar{m}(\lambda) \Delta\lambda \\ S_Q &= k_S \sum P_\lambda(\lambda) \bar{s}(\lambda) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (1.4)$$

1.3.2.2. La luminance en colorimétrie LMS

La luminance résulte de la somme des activités des deux familles de cônes L et M. Les cônes S ne contribuent pas à la luminance. Pour obtenir la valeur Y de la luminance, les composantes trichromatiques L et M doivent être calculées à l'aide des équations 1.4 du § 1.3.2.1, en introduisant les facteurs $k_L = 1.98$ et $k_M = 1$.

1.3.2.3. Domaine des couleurs réelles

Toutes les couleurs des surfaces réelles sont incluses dans un volume fermé de l'espace, limité par la position des couleurs optimales. En effet, il est physiquement impossible de réaliser des surfaces dont le facteur spectral de réflexion dépasse 100%. Une fois cette limite atteinte, le seul moyen d'augmenter le facteur de luminance Y de la surface consiste à élargir la bande spectrale de réflexion, ce qui inévitablement diminue la pureté de la couleur. En quelque sorte, une surface ne peut pas être simultanément très claire et très saturée. Le calcul montre que les *couleurs optimales* correspondent à un jeu de facteur de réflexion au profil spectral en créneau et qu'elles sont représentées par une surface convexe dans l'espace colorimétrique.

On remarque, au sein du domaine des couleurs réelles, que les valeurs des excitations de cônes L et M sont fortement corrélées (Figure 1.5). Comme il a été montré expérimentalement que l'excitation des cônes S ne participe pas à l'élaboration de la luminance, les plans de luminance constante sont disposés parallèlement à l'axe S. Tout plan d'équation $L + M = \text{constante}$, calculé avec les facteurs $k_L = 1.98$ et $k_M = 1$, est parallèle à l'axe S et porte des couleurs de luminance constante.

1.3.2.4. Le métamérisme

En tant que grandeur physique, la lumière est définie par la distribution des radiations monochromatiques qui la composent. En tant que stimulus de couleur, la lumière n'est définie que par trois nombres, liés aux trois signaux générés dans les cônes. Le système visuel est incapable d'analyser le spectre de la lumière. C'est ce qui explique

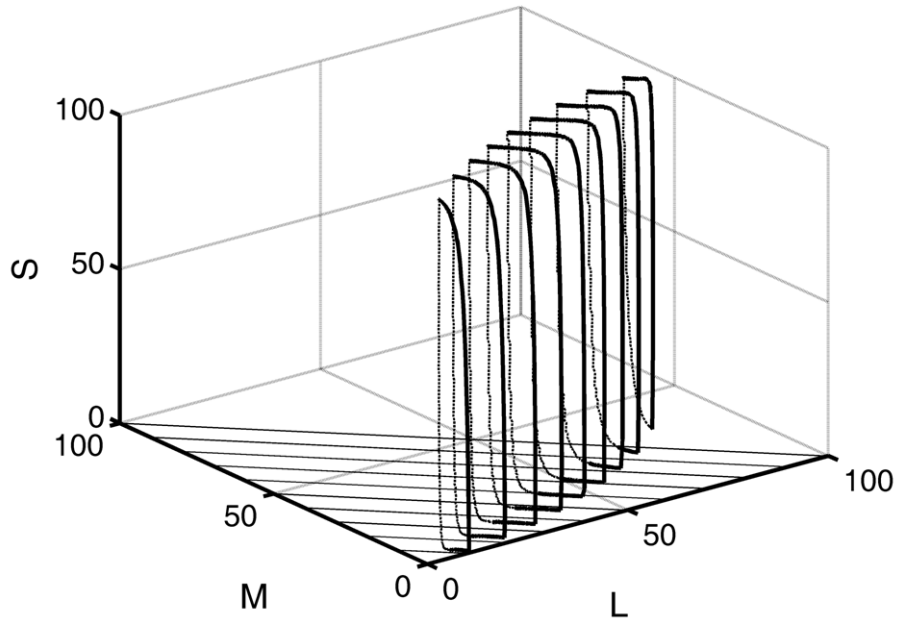


Figure 1.5. Couleurs optimales dans des plans isoluminants de l'espace chromatique LMS. Les composantes trichromatiques L, M, S, ont été normalisées comme indiqué dans la discussion.

le métamérisme, phénomène d'origine visuelle, par lequel deux lumières peuvent paraître de la même couleur alors que leurs spectres sont différents. Les deux lumières paraissent identiques car la même quantité de photons est absorbée par les cônes dans les deux cas. Ce phénomène est largement exploité par les technologies de visualisation qui, par exemple, reproduisent la couleur apparente des nuages dont le spectre est naturellement continu par des mélanges additifs de primaires aux spectres discontinus.

Un cas bien connu en affichage numérique est celui de l'obtention d'un jaune par synthèse additive du rouge et du vert. La possibilité d'obtenir un métamère de la radiation jaune de 589 nm, par le mélange additif de rayonnements de 670 nm et de 546 nm, connue sous le nom d'égalisation de Rayleigh (Rayleigh, 1881) [], tient au fait que le nombre de photons absorbés par les cônes L, M, ou S est identique pour les deux métamères.

Posons le problème : Quelles sont les valeurs des flux énergétiques $\Phi(\lambda)$ qui apportent une solution ? Nous proposons de résoudre le problème par la colorimétrie LMS. Les données numériques $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ seront arrondies pour faciliter la démonstration.

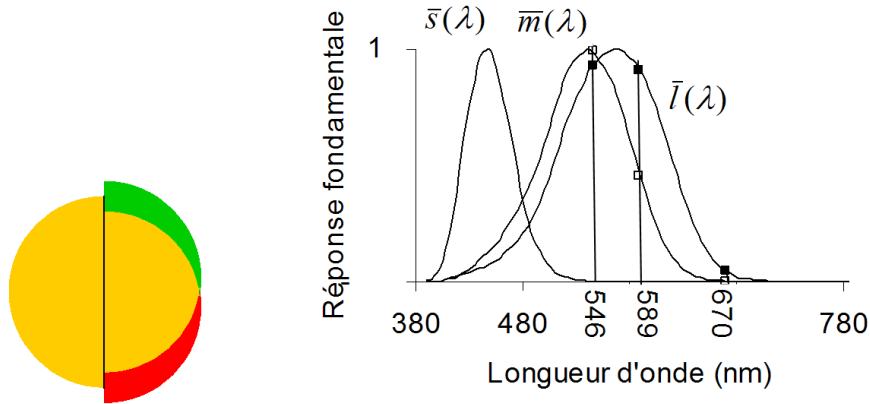


Figure 1.6. *Egalisation de Rayleigh.*

Ecrivons les équations chromatiques

Pour les cônes L

$$\bar{l}(670) \times \Phi(670) + \bar{l}(546) \times \Phi(546) + \bar{l}(589) \times \Phi(589) = 1 \quad (1.5)$$

Pour les cônes M

$$\bar{m}(670) \times \Phi(670) + \bar{m}(546) \times \Phi(546) + \bar{m}(589) \times \Phi(589) = 1 \quad (1.6)$$

Introduisons des valeurs numériques relevées sur les courbes de sensibilité de la figure ???, et, si une solution relative suffit, posons $\Phi(589) = 1$. On en déduit que

$$\begin{aligned} \bar{l}(546) &= 0.9 & \bar{l}(589) &= 0.9 & \bar{l}(670) &= 0.05 \\ \bar{m}(546) &= 1 & \bar{m}(589) &= 0.5 & \bar{m}(670) &= 0 \\ \bar{s}(546) &= 0 & \bar{s}(589) &= 0 & \bar{s}(670) &= 0 \end{aligned} \quad (1.7)$$

Il faut résoudre le système d'équations

$$\begin{pmatrix} 0.05 & 0.9 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi(670) \\ \Phi(546) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.9 \\ 0.5 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

La solution donne la proportion des flux énergétiques à 670 nm et à 546 nm qu'il faut additionner pour obtenir la couleur jaune du rayonnement de 589 nm.

$$\begin{aligned} \Phi(670) &= 9 \\ \Phi(546) &= 0.5 \end{aligned} \quad (1.9)$$

1.3.2.5. *La simulation de la vision des daltoniens*

Sur le principe de la spécification LMS, il a été possible de simuler ce que voit un dichromate qui ne possède pas de pigment photosensible L (cas du protanope), M (cas du deutéranope), ou S (cas du tritanope). Pour un dichromate, tous les stimuli localisés dans l'espace LMS le long d'une droite parallèle à l'axe représentant la famille de cônes absente sont confondus, dite droite de confusion. L'espace des couleurs pour le dichromate est obtenu en projetant parallèlement à cet axe toutes les couleurs de l'espace LMS sur la surface qui portent des couleurs apparemment identiques pour lui et pour un sujet normal.

1.3.2.6. *La substitution silencieuse*

Dû à leur recouvrement spectral, il est impossible de stimuler une famille de cônes exclusivement, même avec une radiation monochromatique. Un moyen pour stimuler une seule famille de cônes consiste à alterner dans le temps deux couleurs qui se situent sur une parallèle à l'axe représentatif de l'excitation de cette famille de cônes. Alors, la stimulation des deux autres familles de cônes ne varie pas. Elles restent silencieuses.

Cette technique peut être étendue à la stimulation des bâtonnets et des cellules ganglionnaires à mélanopsine.

1.3.2.7. *Généralisation du modèle LMS*

Le modèle colorimétrique LMS repose sur des fondements physiologiques soigneusement établis. Il existe une relation linéaire entre les composantes trichromatiques R , G , B , les composantes trichromatiques X , Y , Z et les signaux L , M , S . La colorimétrie LMS pourrait dans l'avenir supplanter la colorimétrie XYZ chaque fois que l'effet d'une lumière sur le système visuel doit être contrôlé et analysé. En l'absence de recommandation de la CIE, on pourra adopter la matrice de passage définie par Smith et Pokorny pour transposer les composantes trichromatiques de l'espace XYZ à l'espace LMS [SMI 75]. Des facteurs k_L et k_M sont inclus dans la transformation de telle sorte que la somme des composantes trichromatiques (L+M) donne

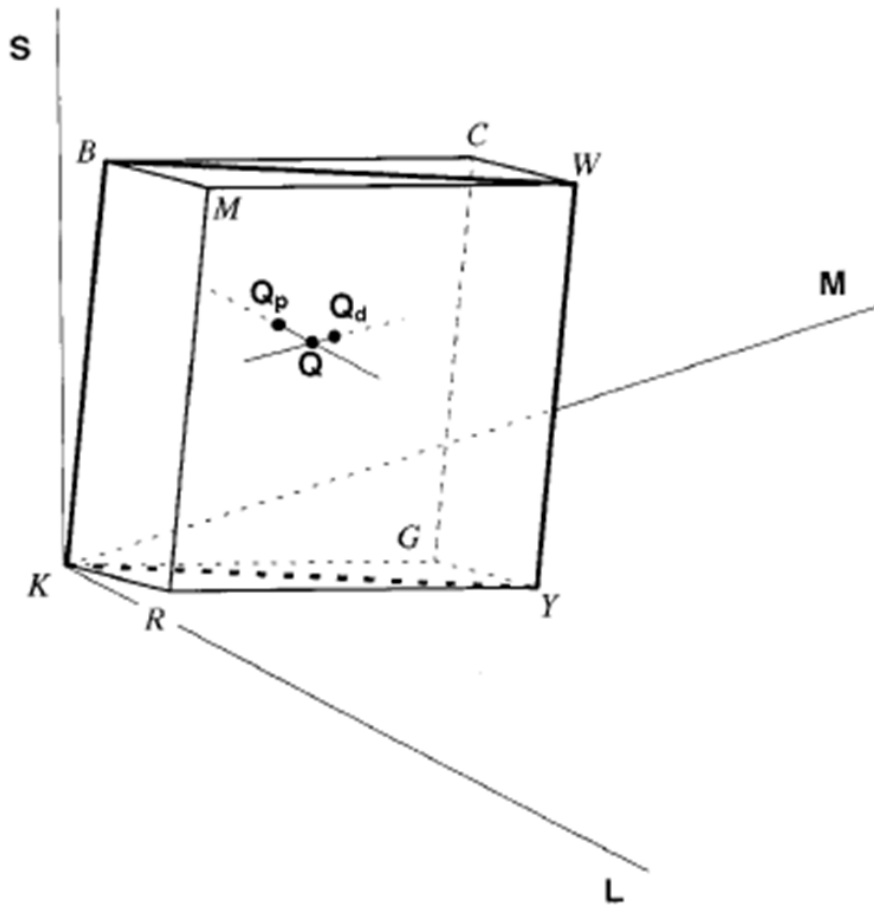


Figure 1.7. Représentation dans l'espace colorimétrique LMS de couleurs confondues par deux types de dichromates. Les droites de confusion sont parallèles aux axes L, M ou S. Le stimulus Q_p est confondu avec Q par le protanope. Le stimulus Q_d est confondu avec Q par le deutéranope.

directement la luminance Y. (Rigoureusement, la transposition s'applique aux composantes trichromatiques corrigées par Vos en 1978 [.])

$$\begin{pmatrix} L \\ M \\ S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.01608 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

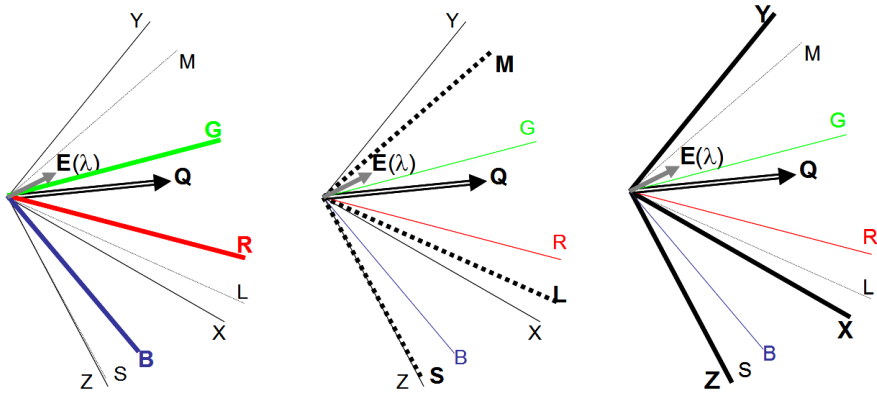


Figure 1.8. Représentation de la couleur Q et d'un rayonnement monochromatique $E(\lambda)$ dans les espaces colorimétriques RGB, LMS et XYZ. La figure est reproduite en trois exemplaires pour accentuer les trois axes de chaque espace, respectivement. Au sein de chaque espace, les axes sont indépendants et non orthonormés. La représentation dans le plan de la figure rend difficilement compte de la structure tridimensionnelle de chaque espace.

1.3.3. La discrimination des couleurs

1.3.3.1. Le diagramme de chromaticité isoluminant de MacLeod-Boynton

Le diagramme de chromaticité représente la chromaticité des couleurs sans faire référence à leur luminance. Le diagramme de chromaticité x, y du système colorimétrique XYZ en est un exemple. Le diagramme de chromaticité l, s proposé par MacLeod et Boynton [MAC 79] est isoluminant. Il se situe dans un plan à luminance constante. Les composantes trichromatiques L et M étant calculées avec les facteurs $k_L = 1.98$ et $k_M = 1$, l'axe des abscisses l porte en abscisses la contribution de l'excitation des cônes L à la luminance, et l'axe des ordonnées porte la variation de l'excitation des cônes S seuls, rapportée à la luminance. Soit, en posant

$$l = \frac{L}{L+M} \quad \text{et} \quad s = \frac{S}{L+M} \quad (1.11)$$

Toute droite de l'espace L, M, S se projette selon une droite dans le diagramme de chromaticité l, s . En particulier, les droites de confusion des protanopes et des deutranopes se projettent comme des faisceaux de droites issues de $(1,0)$ et de $(0,0)$ respectivement, et celles des tritanopes comme des droites parallèles à l'axe s .

1.3.3.2. L'orientation et la taille des ellipses de MacAdam

Dans le diagramme de chromaticité x, y , les variations de taille et d'orientation des ellipses de MacAdam indiquent les capacités de discrimination chromatique.

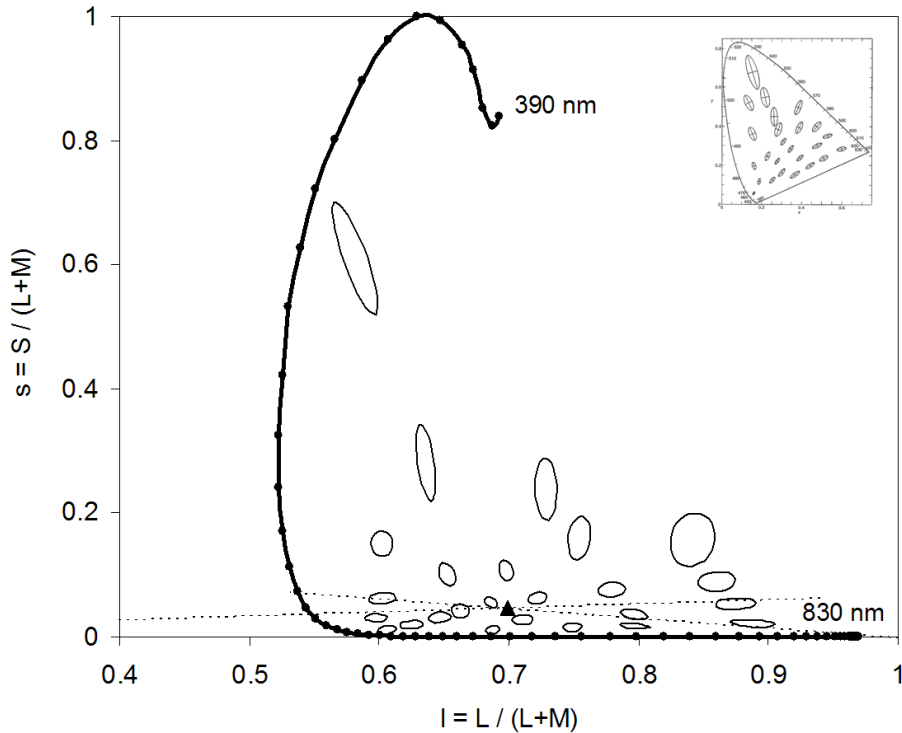


Figure 1.9. Diagramme de chromaticité isoluminant l, s , l'unité de la composante trichromatique S est telle que la coordonnée s ne dépasse par l'unité. Blanc équi-énergie (Δ noir). Droites de confusion protan et deutane (—). Ellipses de MacAdam, échelle arbitraire.

Elles reflètent l'activité des deux voies chromatiques [GRA 49]. Les grands axes des ellipses, qui suivent un faisceau de droites issues de l'extrémité inférieure gauche du lieu spectral, représentent une variation de l'excitation des cônes S . Les petits axes s'étendent dans des directions représentatives des variations d'excitation des cônes L et M (Figure 1.9, encart). On peut espérer obtenir une représentation uniforme des petites différences de couleur en exploitant les processus rétinien de codage post-réceptoral. Ainsi, dans le diagramme de chromaticité de MacLeod et Boynton, les seuils de discrimination chromatique s'organisent sur des cercles lorsqu'ils sont obtenus sur un fond de même chromaticité et sur des ellipses régulièrement disposées lorsqu'ils sont obtenus sur un fond gris [KRA 92] (Figure 1.9).

1.4. Les couleurs dans leur contexte

La colorimétrie spécifie une lumière, un stimulus de couleur présenté isolément. Dès que le contexte de la présentation - conditions d'éclairage, environnement - change

ou devient complexe comme au sein d'une image, l'apparence du stimulus est modifiée. On oppose ainsi la définition de l'apparence colorée à la spécification d'une couleur isolée.

1.4.1. CIECAM02

Une couleur isolée revêt plusieurs attributs d'apparence : la teinte (*hue*), la chroma (*chroma*) ou le niveau de coloration (*colourfulness*), la clarté (*lightness*) ou la luminosité (*brightness*). L'ensemble des teintes forme le cercle chromatique au sein duquel quatre teintes élémentaires ont un statut particulier et s'opposent deux à deux : le rouge et le vert, le bleu et le jaune. Le modèle d'apparence colorée CIECAM02, décrit au chapitre NNN, comprend un module d'adaptation chromatique, un module d'adaptation lumineuse et un module de calcul des attributs d'apparence.

Il s'agit d'un modèle empirique, opérationnel, issu de nombreuses observations visuelles. En introduisant la non-linéarité des signaux issus des cônes, le modèle CIECAM02 s'applique à un éventail de niveaux lumineux plus grand que celui que l'on rencontre dans un bureau ou sur un écran. Il prédit l'apparence d'une couleur isolée dans des conditions d'éclairage variées, faible ou fort, artificiel ou naturel. Cependant, il ne reflète qu'imparfaitement la complexité du fonctionnement du système visuel. Ainsi, la spécificité des signaux de cônes S - reconnue dans la version antérieure du modèle de Hunt [HUN 87] - n'est pas prise en compte, et les phénomènes de contraste simultané (décrits dans le chapitre NNN " Apparence colorée ", section NNN) ne sont pas pris en compte.

1.4.2. L'adaptation chromatique

Lorsque l'éclairage d'une scène change, que ce soit en luminance ou en chromaticité, l'apparence colorée des objets change peu, comme si le gain des mécanismes récepteurs s'ajustait à la lumière ambiante. Il est tout à fait remarquable que les mécanismes d'adaptation chromatique proposés dans CIECAM02 possèdent des courbes de sensibilité spectrale assez proches des fondamentales, en diffèrent par une bande passante légèrement plus étroite (*sharpened*), des pics de sensibilité plus éloignés l'un de l'autre, et de légères sections négatives. Ces signes indiquent une légère activité antagoniste dans l'adaptation chromatique dont le siège ne se situerait pas uniquement au niveau des cônes, mais aussi, dans une moindre mesure, au niveau des réseaux de neurones rétiniens de la voie Parvo- et de la voie Konio-cellulaire.

1.4.3. Cloisonnement de l'espace perceptif par les teintes élémentaires

La frontière délimitant dans l'espace LMS les couleurs rougeâtres des couleurs verdâtres n'est ni plane, ni continue au voisinage du lieu achromatique. De même pour

les frontières bleu / jaune et blanc / noir, ce qui exclue une modélisation linéaire des teintes élémentaires à partir des signaux de cônes. En outre, ces frontières se déforment quand le test à juger se présente sur un fond coloré, celui-ci induisant une adaptation chromatique. Le modèle proposé par Chichilninsky et Wandell [CHI 99] nécessite de séparer les signaux en incréments et décréments. Il comporte une première étape où les signaux des cônes se distinguent selon leur signe L+, L-, M+, M-, S+, S-, chaque type subissant un gain spécifique qui traduit l'adaptation chromatique. Dans la deuxième étape où les signaux des cônes se recombinaient linéairement, les incréments et les décréments sont à nouveau séparés en signaux pré-antagonistes RG+, RG-, BY+, BY-, WB+, WB-, avant de se recombinaient en signaux antagonistes.

1.4.3.1. *Le contraste simultané*

Le contraste simultané (décrit dans le chapitre " Apparence colorée ", phénomène selon lequel une surface change de couleur selon le fond sur lequel elle est présentée, a été largement étudié. La loi s'énonce ainsi : par leur juxtaposition, deux couleurs perdent plus ou moins de la couleur qui leur est commune ([CHE 39] chapitre IX). Ainsi un vert-jaune vire au vert sur un fond jaune, et vire au jaune sur un fond vert. Contrairement aux hypothèses les plus simples, les couleurs induites par un fond ne sont pas exactement complémentaires du fond, ce qui révèle l'intervention de mécanismes perceptifs par delà les récepteurs.

Dans les images, les situations de contraste sont très complexes et les mécanismes mis en jeu mal connus. Ainsi, la couleur d'une cible est biaisée, dans le sens du contraste simultané, par la distribution des couleurs d'une image numérique, mais ne l'est pas dans la perception d'une scène naturelle en 3-D [WEB 02].

Les contrastes de couleur pourraient être traités indépendamment, voire en amont de la couleur elle-même, ce qui expliquerait notre rapidité à décrypter la complexité d'une image. Pour modéliser les phénomènes de contrastes colorés, il convient d'introduire des processus de rectification des signaux après le traitement rétinien (Shapiro, 2008) [SHA 08].

1.4.3.2. *Effet d'association et assimilation*

A l'opposé du contraste, quand la couleur d'une surface tend à prendre la couleur de son environnement, on parle d'assimilation [KNO 04]. Le phénomène facilement observable avec un environnement de fréquence spatiale relativement élevée, résulte de mécanismes d'association dont l'explication est encore hypothétique. L'illusion de White en couleur, largement popularisée, est très spectaculaire [VIE 03].

1.5. Conclusion

Ce chapitre rassemble des fondements physiologiques, des données colorimétriques et des observations, qui constituent différentes approches de la vision des

couleurs, et qui reflètent, chacune à leur manière la réponse unique du système visuel humain. Dans la perspective de traiter une image, la colorimétrie apporte une réponse nécessaire, mais insuffisante. Une couleur ne peut pas être traitée isolément. Le contexte, le voisinage, les conditions d'adaptation et l'attente de l'observateur constituent des paramètres majeurs modifiant notablement l'apparence de la couleur. La qualité du traitement d'image tient à sa conformité aux processus réellement effectués par le SVH. En retour, comprendre la complexité du SVH constitue un enjeu auquel l'imagerie numérique peut contribuer.

1.6. Bibliographie

- [CHE 39] CHEVREUL M., *De la Loi du Contraste Simultané des Couleurs*, Pitois-Levrault, 1839.
- [CHI 99] CHICHILNISKY E. J., WANDELL B. A., W B. A., « Trichromatic Opponent Color Classification », *Vision Research*, vol. 39, p. 3444–58, 1999.
- [Com 06] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE, *Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1*, 170-1-2006, CIE, 2006.
- [GEG 03] GEGENFURTNER K. R., KIPER D. C., « Color Vision », *Annual Review of Neuroscience*, vol. 26, n° 1, p. 181-206, 2003.
- [GRA 49] GRAND Y. L., « Les seuils différentiels de couleurs dans la théorie de Young », *Revue d'optique*, vol. 28, p. 261–278, 1949.
- [HUN 87] HUNT, *The reproduction of colour in photography, printing & television*, Fountain Press, 1987.
- [KNO 04] KNOBLAUCH K., SHEVELL S. K., « The Visual Relays in the Thalamus », CHALUPA L. M., WERNER J. S., Eds., *The Visual Neurosciences*, p. 892–907, Cambridge : MIT Press, 2004.
- [KRA 92] KRAUSKOPF J., GEGENFURTNER K. R., « Color discrimination and adaptation », 1992.
- [MAC 79] MACLEOD D. I. A., BOYNTON R. M., « Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance », *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 69, n° 8, p. 1183–1186, OSA, Aug 1979.
- [SAR 10] SARKAR A., BLOND L., CALLET P. L., AUTRUSSEAU F., MORVAN P., STAUDER J., « Toward Reducing Observer Metamerism Issue in Industrial Applications : Colorimetric Observer Categories and Observer Classification », *in the eighteenth Color Imaging Conference, Color Science and Engineering Systems, Technologies, and Applications, CIC18*, 2010.
- [SCH 07] SCHANDA J., *Colorimetry, Understanding the CIE system*, Wiley, 2007.
- [SHA 08] SHAPIRO A. G., « Separating color from color contrast », *J. Vis.*, vol. 8, n° 1, p. 1-18, 1 2008.
- [SHE 08] SHEVELL S., KINGDOM F., « Color in Complex Scenes », *Annual Review of Psychology*, vol. 59, n° 1, p. 143–166, 2008.

- [SMI 75] SMITH V., POKORNY J., « Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm », *Vision Research*, vol. 15, n° 2, p. 161 - 171, 1975.
- [STI 59] STILES W., BURCH J., « NPL colour-matching investigation : Final report (1958) », *Optica Acta*, vol. 6, p. 1-26, 1959.
- [STO 00] STOCKMAN A., SHARPE L. T., « The spectral sensitivities of the middle-and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype », *Vision Research*, vol. 40, n° 13, p. 1711–1737, 2000.
- [VAL 93] VALOIS R. D., VALOIS K. D., « A multi-stage color model. », *Vision Res.*, vol. 33, n° 8, p. 1053–1065, May 1993.
- [VAL 00] VALOIS R. D., COTTARIS N., ELFAR S., MAHON L., WILSON J., « Some transformations of color information from lateral geniculate nucleus to striate cortex », *Proc. of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 97, n° 9, p. 4997–5002, April 2000.
- [VAL 08] VALBERG A., SEIM T., « Neural mechanisms of chromatic and achromatic vision », *Color Res. Appl.*, vol. 33, p. 433-, 2008.
- [VIE 03] VIENOT F., ROHELLEC J. L., « Jeux de couleurs », *Pour la Science, Dossier hors-série*, p. 20-27, avril/juin 2003.
- [WEB 02] WEBSTER M. A., MALKOC G., BILSON A. C., WEBSTER S. M., « Color contrast and contextual influences on color appearance. », *J Vis*, vol. 2, n° 6, p. 505–519, 2002.
- [ZAI 97] ZAIDI Q., « Decorrelation of L and M cone signals », *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A14, p. 3430-3431, 1997.