BrienHoldenVisionInstitute

TRICHROMATIE, SYSTÈME MUNSELL, VISION DES COULEURS NORMALE

AUTEUR

Thomas Salmon: Northeastern State University, États-Unis

RÉVISION PAR LES PAIRS

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, États-Unis

CE CHAPITRE INCLUT UNE RÉVISION DE:

- Évidence pour la trichromatie
- Génétique moléculaire des cônes
- Étiquettes des couleurs
- Système Munsell de l'apparence des couleurs
- Perception normale des couleurs

ÉVIDENCE POUR LA TRICHROMATIE

La recherche scientifique a établi que la rétine humaine normale contient trois types de cônes et le spectre d'absorption caractéristique pour chaque photopigment a été identifié.
Ceci est à la base de la perception trichromate des couleurs. Des techniques expérimentales utilisées afin d'investiguer la vision des couleurs incluent:

- Études psychophysiques de l'appariement des couleurs
- Densitométrie rétinienne
- Micro-spectrophotométrie d'une cellule unique
- Enregistrements électrophysiologiques afin de mesurer la sensibilité spectrale des photorécepteurs individuels
- Ophtalmoscopie de haute résolution de l'optique adaptive

Un scientifique nommé Rushton a développé la **densitométrie rétinienne** dans les années 1960 afin d'étudier les photopigments rétiniens. Pour étudier le spectre d'absorption des cônes M, il faut trouver un sujet ayant une anomalie de la vision des couleurs et qui possède uniquement des cônes M à sa fovéa. Les cônes S sont habituellement absents à la fovéa. Donc, une personne qui ne possède pas de cônes L aura juste les cônes M à la fovéa.

Pour débuter, envoyer une lumière monochromatique (une longueur d'onde), avec un rayonnement connu, sur la fovéa et mesurer le montant de lumière qui est réfléchi. Le rayonnement de la lumière réfléchi sera moindre que celui provenant de la lumière incidente à cause de l'absorption par le photopigment. Vous pouvez donc calculer l'absorption relative pour cette longueur d'onde.
En répétant cette procédure pour plusieurs longueurs d'onde vous pouvez déterminer le spectre d'absorption pour les cônes M.

Pour étudier le spectre d'absorption pour les cônes L, vous devez répéter cette procédure avec un sujet qui n'a pas de cônes M. La densitométrie rétinienne aide à déterminer le spectre d'absorption pour les cônes L et M pour la portion centrale du spectre visible. Mais, cette technique est moins précise pour des longueurs d'onde courtes et longues.

ÉVIDENCE POUR LA TRICHROMATIE (SUITE)

Lors de la **microspectrophotométrie**, un cône est isolé et illuminé par une longueur d'onde ayant un rayonnement connu. La lumière transmise est mesurée et la différence entre la lumière incidente et transmise est attribuée à l'absorption par le photopigment. En répétant cette procédure pour plusieurs longueurs d'onde, vous pouvez déterminer le spectre d'absorption pour une sorte de cône (Voir Schwartz Fig. 5-8.)

Des enregistrements **électrophysiologiques** des cônes individuels peuvent aussi déterminer le spectre d'absorption. Lors de cette technique, une microélectrode mesure la réponse électrique d'un cône lorsqu'il est illuminé par la lumière monochromatique. En mesurant le rayonnement minimum requis afin de générer une réponse, vous déterminez le seuil pour cette longueur d'onde. Répétez cette procédure pour plusieurs longueurs d'onde afin de déterminer le seuil du spectre; l'inverse donne le spectre de sensibilité relatif du cône.

Dr. Austin Roorda de l'Université de Berkeley a utilisé **l'optique adaptive** afin de mesurer et de neutraliser les aberrations optiques de l'œil. Il a ensuite pris des photographies de haute résolution des photorécepteurs humains vivants. Avant ceci, la seule façon de photographier les photorécepteurs était d'effectuer la microscopie électronique sur des sections histologiques provenant d'un œil énucléé. Il a combiné les images de haute résolution avec la densitométrie rétinienne et a identifié le type de cône entre plusieurs photorécepteurs rétiniens. La figure 22-1 (gauche) de son site web démontre l'arrangement spatial des trois sortes de cônes dans la rétine d'un sujet. Le Dr. Roorda a été capable d'imager et de photographier les photorécepteurs individuels dans l'œil humain vivant et a utilisé des techniques de blanchiment sélectif afin d'isoler différents photopigments dans l'œil humain vivant.

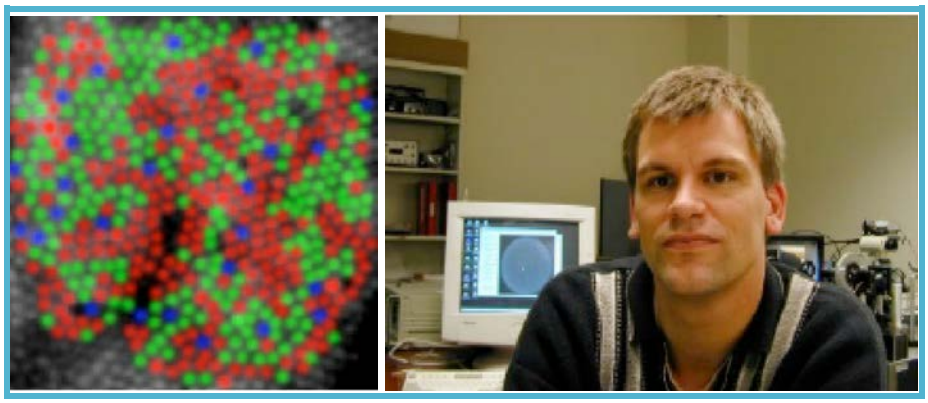

Figure 22-1 *En utilisant une caméra de fond d'œil avec l'optique adaptive de haute résolution et la densitométrie rétinienne, le Dr. Austin Roorda a été capable d'identifier les cônes S, M et L dans la rétine vivante.*

GÉNÉTIQUE MOLÉCULAIRE DES CÔNES

(Lire Schwartz, 2004 p. 98-101)

ÉTIQUETTES DES COULEURS

Quoique la longueur d'onde soit habituellement associée à une couleur particulière, la lumière produite par une longueur d'onde n'apparait pas toujours de la même couleur. Par exemple, dépendamment de la luminosité d'une lumière monochromatique, elle peut avoir une apparence différente. Vous pouvez avoir 555 nm vert clair ou 555 nm vert foncé. Il est plus précis de décrire la couleur associée avec la longueur d'onde comme étant une nuance. Par exemple, la nuance associée avec une longueur d'onde de 400 nm est le violet; 525 vert; 570 jaune; 630 rouge, etc. La couleur est un terme générique et commun. Mais, afin d'être plus spécifique en décrivant une couleur, on devrait la décrire en terme de trois attributs de base:

- Nuance
- Saturation
- Luminosité

ÉTIQUETTES DES COULEURS (SUITE)

Une nuance peut aussi différer à cause de la **saturation**. La saturation décrit la pureté ou la richesse d'une couleur. Par exemple, la couleur rouge pur (très saturé) peut être **désaturée** en mélangeant du blanc, résultant en la création de la couleur rose. Dans cet exemple, les couleurs rouge et rose ont la même nuance, mais ont une saturation différente. Dans cet exemple, rouge et rose sont des couleurs différentes, mais elles ont la même nuance.

La saturation relative d'une couleur peut être spécifiée par la **pureté colorimétrique (p)**.

L_λ – luminance d'une longueur d'onde pure

L_w – luminance d'une lumière blanche ajoutée à L_λ afin de l'égaliser avec une couleur examinée.

Dans cet exemple (Figure 22-2), la couleur examinée à gauche est égalisée avec un mélange de 90 parts rouge pur et de 10 parts blanc pur. La pureté colorimétrique est de 0.9. La couleur examinée à droite est égalisée avec un mélange de 90 parts rouge pur et de 210 parts blanc pur pour une pureté colorimétrique de 0.3.

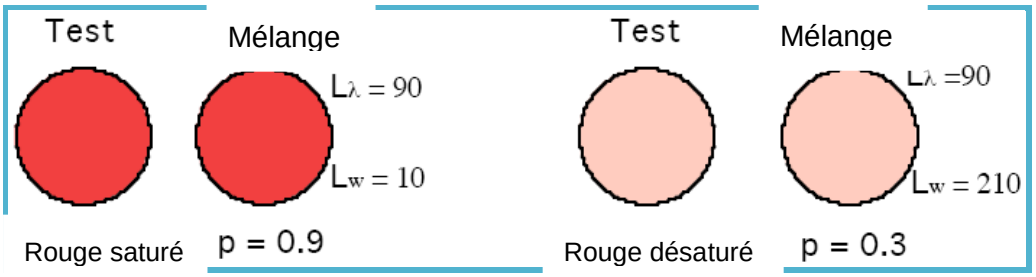

Figure 22-2: *Deux exemples de mesures de pureté colorimétrique ou de saturation d'une nuance particulière*

La pureté d'excitation est donnée par la formule:

Pureté d'excitation (p) = $\frac{a}{a+b}$

La luminosité est un paramètre utilisé afin de décrire une couleur particulière. La luminosité perçue est étroitement liée à la fonction V(λ). L'information de la luminosité est chiffrée grâce à l'afférence provenant des cônes M et L. Notez que la luminosité n'est pas la même chose que la luminance, quoiqu'elles soient semblables. Dû au traitement neuronal, deux lumières avec la même luminance peuvent occasionnellement avoir une luminosité différente.

SYSTÈME MUNSELL DE L'APPARENCE DES COULEURS

Plusieurs systèmes ont été conçus afin de spécifier les couleurs. Un d'eux est le système de spécification de CIE. Un autre, qui est utilisé dans l'industrie de l'art et de la peinture, est le système Munsell. Vous pouvez lire une description technique de ce système à l'adresse web suivante:
http://www.coloursystem.com/?page_id=860&lang=en

Pour un sommaire moins technique, vous pouvez visiter: (http://en.wikipedia.org/wiki/Munsell_color_system).

En 1905, l'artiste A.H. Munsell a organisé un grand nombre d'échantillons de couleur selon leur nuance, saturation et luminosité. Ceci est devenu le système Munsell de l'apparence des couleurs.

> *Le système Munsell est une façon de précisément spécifier et démontrer les relations entre les couleurs. Chaque couleur a trois qualités: nuance, valeur et chroma. Munsell a établi des échelles numériques avec des mesures uniformes pour chaque attribut. Le livre de Munsell démontre une collection de couleurs placées selon cette échelle. Chaque couleur est identifiée numériquement en utilisant ces échelles. La couleur de chaque surface peut être identifiée en la comparant avec les couleurs dans ce livre, avec l'illumination idéale. La couleur est ensuite identifiée par sa **nuance**, **valeur** et **chroma**. Ces attributs ont les symboles H, V et C, et sont inscrits sous la forme H V/C, aussi appelée la notation Munsell. (http://www.munsell.com/munsell1.htm)*

SYSTÈME MUNSELL

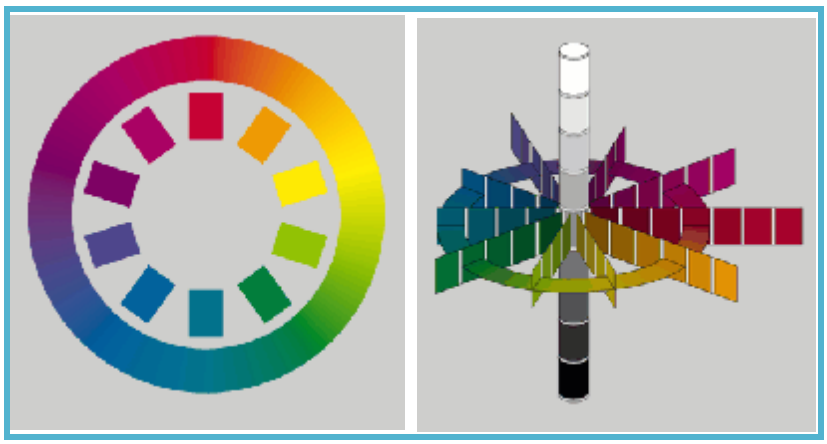

Figure 22-3: *L'image à gauche démontre la progression des nuances lorsque le cylindre Munsell est vu d'en haut. L'image à droite démontre que les couleurs varient du centre à la périphérie (chroma ou saturation) et de haut en bas (valeur ou luminosité)*

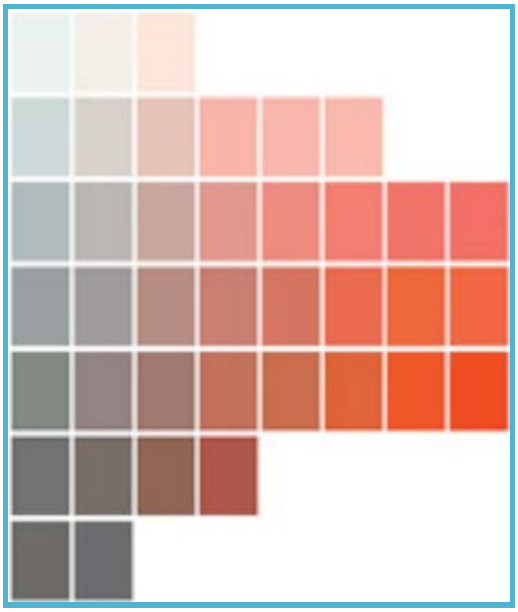

Figure 22-4: *Le système Munsell*

Dans le système Munsell, les couleurs très saturées s'éloignent du centre. La figure 22-4 donne un exemple. Tous les échantillons ont la même nuance, mais diffèrent en terme de luminosité (valeur Munsell) et de saturation (chroma Munsell).

Dans le système Munsell, toutes les couleurs sont arrangées dans un cylindre dont les nuances changent autour de la circonférence du cylindre. La figure 22-3 (à gauche) démontre l'organisation vue par en haut. Les **nuances** se divisent en dix sections, chacune comportant dix mesures de nuances plus petites. Au total, il y a 100 nuances dans ce système. Les nuances majeures sont R, JR, J, VJ, V, BV, B, MB, M et RM, et les étapes dans chaque nuance principale ont un numéro. Par exemple, la nuance au centre de la section rouge est désignée 5R. La **valeur** est reliée à la luminosité et varie de 0 (noir) en bas à 10 (blanc) en haut.

SYSTÈME MUNSELL (SUITE)

Chroma correspond à la saturation (pureté colorimétrique ou pureté d'excitation). Les couleurs neutres (blanc-gris-noir) ont un chroma de zéro, mais toutes les autres couleurs peuvent avoir un chroma plus grand ou égal à 1. Les numéros plus grands sont plus saturés. Quelques couleurs naturelles peuvent avoir un chroma jusqu'à 20 et quelques couleurs fluorescentes peuvent avoir un chroma jusqu'à 30. Schwartz dit que le chroma varie de 1 à 14, le 1 étant au centre et le 14 étant sur le bord. Voir la fig. 5-19 dans Schwartz, 2004.

Chaque couleur dans le système Munsell est spécifiée par le format suivant (Fig. 24-4): nuance valeur/chroma. Par exemple, un rouge vif, avec une valeur (luminosité) de 6 et un chroma (saturation) de 14, est désigné 5R 6/14. Des divisions plus fines peuvent être spécifiées en utilisant des décimales. Par exemple: 5.3R 6.1/13.5.

PERCEPTION NORMALE DES COULEURS

SATURATION RELATIVE DES NUANCES SPECTRALES PURES

Quelques longueurs d'onde ont l'apparence d'être plus saturées que d'autres, même si elles ont toutes une pureté colorimétrique ou excitatoire de 1.0. La longueur d'onde la moins saturée est de 570 nm, qui a une nuance jaune.

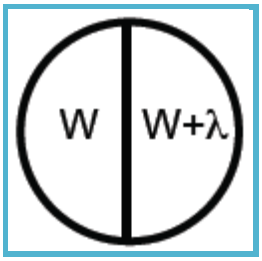

Figure 22-5: *Section bipartie afin d'évaluer la saturation relative de différentes nuances (W = blanc)*

En utilisant un stimulus, tel que celui démontré dans la figure 22-5, vous pouvez examiner la saturation relative d'une longueur d'onde en ajoutant un petit montant de cette longueur d'onde (entièrement saturée) à la lumière blanche. Continuez à rajouter la lumière de cette longueur d'onde jusqu'à temps qu'elle ne soit plus blanche comparée à la section blanche du stimulus. (Notez que la luminance totale sur les deux côtés est maintenue constante). En utilisant les valeurs de luminance pour la nuance blanche et la nuance qu'on examine, vous pouvez calculer une saturation spectrale relative avec la formule suivante:

$$\text{saturation relative} = \left[\frac{(L_\lambda + L_w)}{L_\lambda}\right]$$

Vous devez ajouter très peu de nuances fortement saturées, comme le bleu et le rouge, mais beaucoup plus de nuances désaturées, comme le jaune de 570 nm, afin de changer l'apparence de la portion examinée à une couleur autre que blanche. Le tableau 22-1 donne des valeurs hypothétiques dans une expérience afin de comparer la saturation de trois longueurs d'onde. La figure 5-11 de Schwartz, 2004 démontre les résultats pour cette expérience pour plusieurs nuances spectrales. Notez que la nuance la moins saturée est associée avec une lumière de 570 nm.

Tableau 22-1: *Comparaison de la saturation relative des différentes longueurs d'onde*

Λ	NUANCE	INTENSITÉ BLANCHE	Λ INTENSITÉ	(Λ+W)/Λ	LOG(Λ+W)/Λ
470	bleu	95	5	20	1.3
570	jaune	70	30	3.33	0.5
630	rouge	94	6	16.7	1.2

PERCEPTION NORMALE DES COULEURS (SUITE)

DISCRIMINATION DES LONGUEURS D'ONDE

Quelle est la différence minimale entre deux longueurs d'onde qui peut être discriminée? Celle-ci varie selon la longueur d'onde, tel que démontré dans la fig. 5-12 de Schwartz, 2004. Le stimulus utilisé afin d'examiner la discrimination des longueurs d'onde est démontré dans la fig. 5-12 (haut).

Une longueur d'onde est comparée à une autre qui est légèrement différente. Examinez la différence minimale entre les longueurs d'onde que le sujet peut distinguer comme étant différente.

La discrimination des longueurs d'onde en fonction de la longueur d'onde est démontrée comme étant une courbe en forme de W, dont les meilleures discriminations se trouvent à 495 et 590 nm. La discrimination maximale des longueurs d'onde se retrouvent aux longueurs d'onde dont les pentes d'absorption spectrale des photopigments ont le plus grand changement relatif, l'un à l'autre (Fig.22-6).

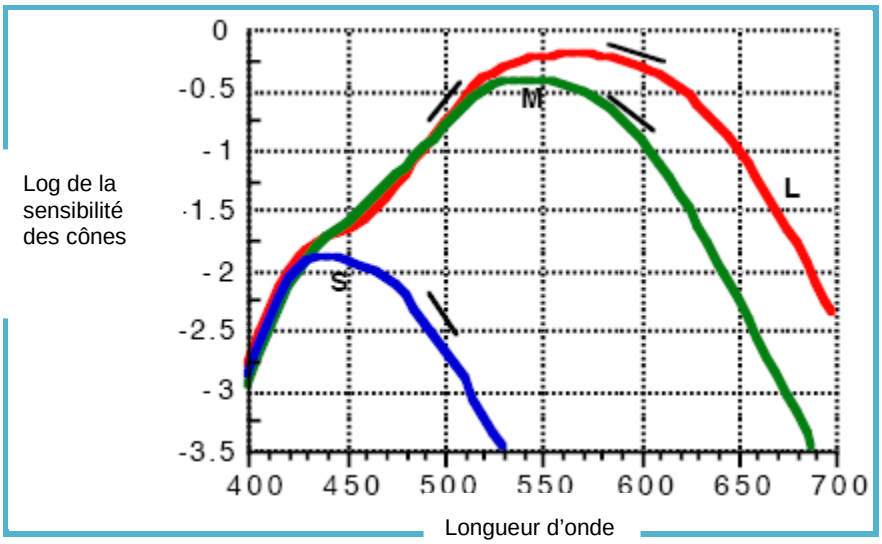

Figure 22-6: *Sensibilité des cônes S, M & L*

PHÉNOMÈNE BEZOLD-BRÜCKE

Les nuances de plusieurs longueurs d'onde varient légèrement selon une différence de luminance. Voir la Fig. 5-13 de Schwartz, 2004). Le stimulus biparti dans la figure 22-7 est utilisé afin de mesurer cet effet, connu comme étant le **phénomène de Bezold-Brücke**. λv représente une longueur d'onde qui peut varier; λc représente une lumière qui maintient une longueur d'onde et une luminance constante. Initialement, λv et λc ont la même longueur d'onde et luminance. La luminance de λv est ensuite augmentée graduellement, causant une variation de nuance dans le cas de plusieurs longueurs d'onde. Le sujet doit ajuster la longueur d'onde de λv afin de maintenir la même nuance que λc; donc, le sujet essaye de maintenir une nuance constante, la nuance de λc.

Par exemple, λv = 550 nm (vert) apparait plus jaune (comme 580nm) lorsque l'intensité augmente. Afin de compenser, le sujet l'ajuste à une longueur d'onde plus courte. Donc, le tableau démontre une ligne originaire à 550 nm qui penche vers la gauche (Fig. 22-7).

PERCEPTION NORMALE DES COULEURS (SUITE)

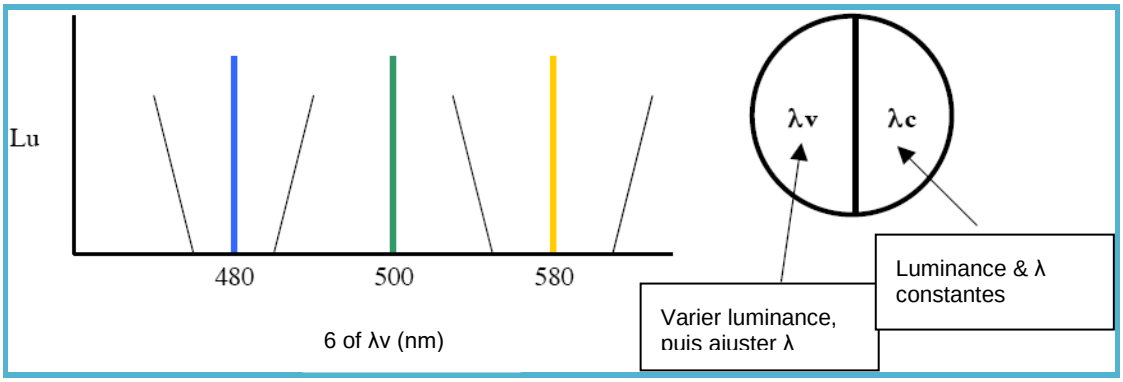

Figure 22-7: *Les trois longueurs d'ondes sont ~480, ~500 et ~580 nm. Les lignes penchées indiquent les longueurs d'onde qui gardent une nuance constante avec une luminance qui augmente.*

Les lignes dans le graphique représentent les longueurs d'onde qui ont l'air d'avoir la même nuance avec l'intensité qui augmente. Elles s'appellent des **lignes de contour de nuance**. À trois longueurs d'onde (478, 503, 578 nm), il n'y a pas de changement dans la perception de la nuance avec l'intensité qui augmente. Celles-ci s'appellent **les longueurs d'onde invariables**, **points invariables** ou **nuances uniques**.

Pour résumer le phénomène Bezold-Brücke, retenez qu'avec l'intensité qui augmente, les longueurs d'onde en-dessous de ~500 nm changent d'apparence vers le bleu (~480), et au dessus de ~500 nm, les nuances changent d'apparence vers le jaune (~580).

Par exemple, 490 nm (bleu-vert) devient plus bleu (plus près de 480 nm). Afin de compenser λv est changée à des longueurs d'onde plus longues, causant l'inclinaison vers la droite de la ligne de contour de nuance.

Un stimulus avec 450 nm (violet) devient plus bleu (plus près de 480 nm). Donc, λv doit être changée à une longueur d'onde plus courte afin de compenser. Donc, la ligne de contour de nuance penche à gauche.

Un stimulus de 525 nm (vert-bleu) devient plus jaune (plus près de 580 nm) et λv doit être ajustée à une longueur d'onde plus courte afin de compenser (ligne de contour de nuance penche à gauche).

Un stimulus de 590 nm (jaune-orange) devient plus jaune (plus près de 580 nm) et λv doit être ajustée à une longueur d'onde plus longue afin de compenser (ligne de contour de nuance penche à droite).

Phénomène d'Abney décrit un changement de nuance minime qui accompagne un changement de saturation pour quelques longueurs d'onde. Les longueurs d'onde de près de 488 nm (bleu-vert) deviennent plus différentes de la nuance de 488 nm avec une saturation qui augmente. Les longueurs d'onde de près de 577 nm (jaune) deviennent plus semblables à la nuance de 577 nm avec une saturation qui augmente.

CONSTANCE DES COULEURS

Lorsque des lumières de couleurs différentes illuminent un objet, il y a un changement dans le contenu spectral de la lumière réfléchie. Malgré cela, il semble souvent avoir la même couleur. Ceci représente la **constance des couleurs.**

LECTURES RECOMMANDÉES/OUVRAGES DE RÉFÉRENCE

- Schwartz SH. **Visual Perception - A Clinical Orientation, 3rd Edition**. Appleton & Lange, Stamford, Connecticut, 2004