Colorimétrie

Hermine Chatoux

Polytech Dijon

2023-2024

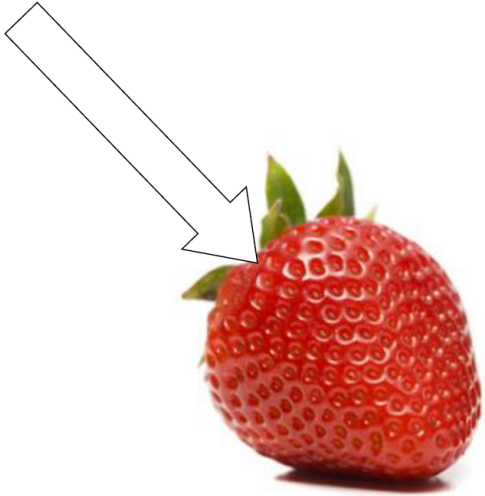
Analyse de la couleur

Plan

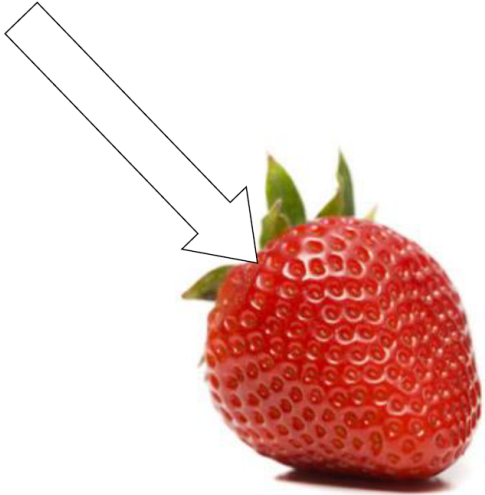
1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

Pourquoi une fraise est rouge ?

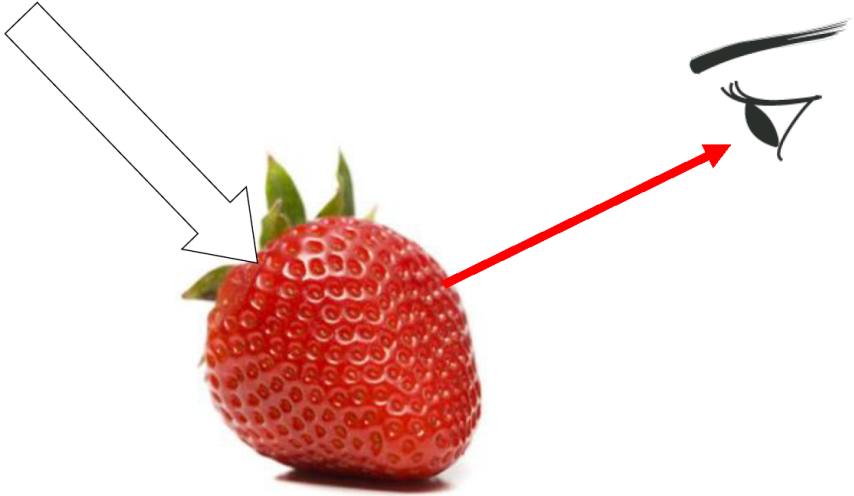
Pourquoi une fraise est rouge ?



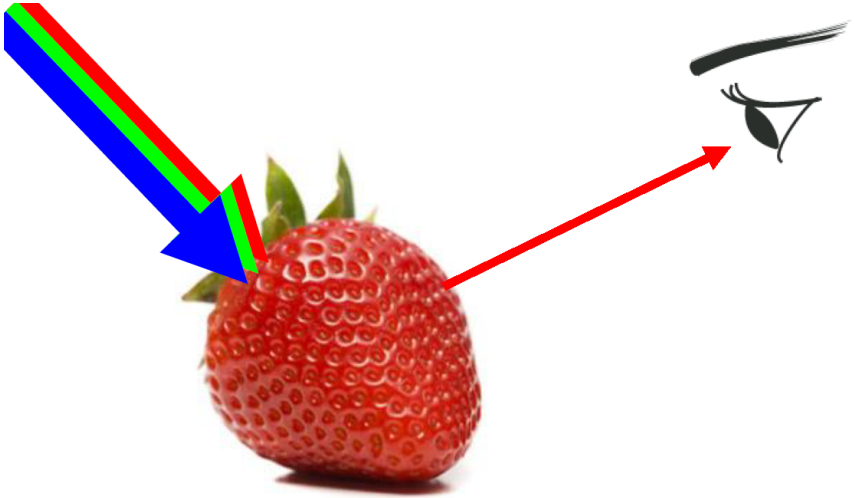
Pourquoi une fraise est rouge ?



Pourquoi une fraise est rouge ?



Pourquoi une fraise est rouge ?



Pourquoi une fraise est rouge ?

La règle de trois

$$E = \int_{\Omega} I(\lambda) O(\lambda) R(\lambda) d\lambda,$$

où

- Ω : domaine spectral des longueurs d'onde visibles ;
- λ : la longueur d'onde observée ;
- E : l'énergie ;
- I : le spectre de la lumière ;
- O : le spectre de réflectance de l'objet observé ;
- R : le spectre de sensibilité du récepteur.

Quelques définitions

- Couleur
  - pour un physiologiste, c'est sensation colorée.
  - pour un physicien, c'est le résultat de la décomposition de la lumière blanche.
  - pour un peintre, teinturier ou imprimeur, c'est une matière colorée utilisé pour produire la colorisation.
- Radiométrie
  - *Étude et mesure de l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique.*
- Photométrie
  - *Étude et mesure de la lumière visible liée au système perceptuel humain.*
- Colorimétrie
  - *La colorimétrie est le moyen technique d'associer des chiffres à une couleur, de manière à la positionner dans un espace, de calculer des différences entre un standard et un échantillon.* [1]

1. www.formation-colorimetrie.fr/

Commission Internationale de l'Éclairage

- The CIE is a technical, scientific and cultural non-profit organization whose objectives are :
  - *To provide an international forum for the discussion of all matters relating to the science, technology and art in the fields of light and lighting and for the interchange of information in these fields between countries.*
  - *To prepare and publish standards, reports and other publications concerned with all matters relating to science, technology and art in the fields of light and lighting.*
- Several divisions cover the sectors of light and lighting :
  - Division 1 : Vision and Colour ;
  - Division 2 : Physical Measurement of Light and Radiation ;
  - Division 3 : Interior Environment and Lighting Design ;
  - Division 4 : Transportation and Exterior Applications ;
  - Division 6 : Photobiology and Photochemistry ;
  - Division 8 : Image Technology.

Sommaire

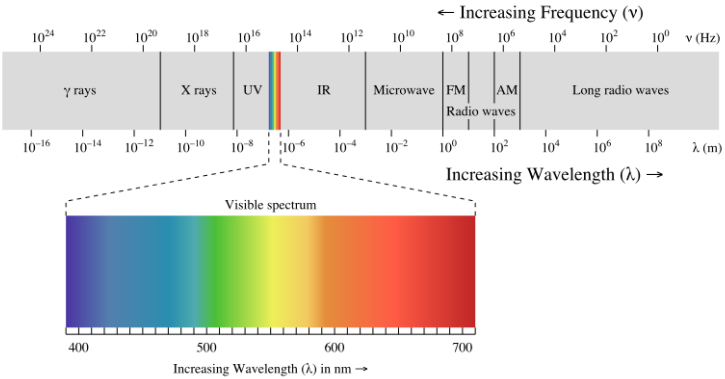
1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

Plan

1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

Le domaine du visible

- L'œil humain perçoit les longueurs d'ondes entre 380 nm et 750 nm.



Spectre de la lumière visible

La règle de trois

Énergie lumineuse perçue

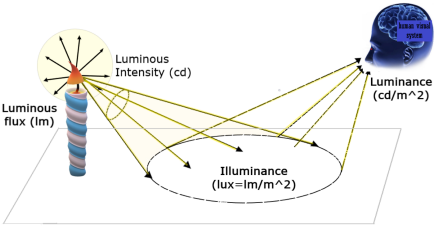
$$E = \int_{\Omega} I(\lambda) d\lambda,$$

où

- Ω : domaine spectral des longueurs d'onde visibles ;
- λ : la longueur d'onde observée ;
- E : l'énergie ;
- I : au spectre de la lumière.

- Ω dans le cas du visible est environ $[380; 720]$ nm.

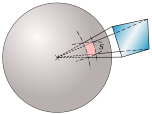
Les unités



(a) Les unités lumières

- E est une radiance/luminance.
- $I(\lambda)$ est $W.sr^{-1}.m^{-2}.nm^{-1}$.

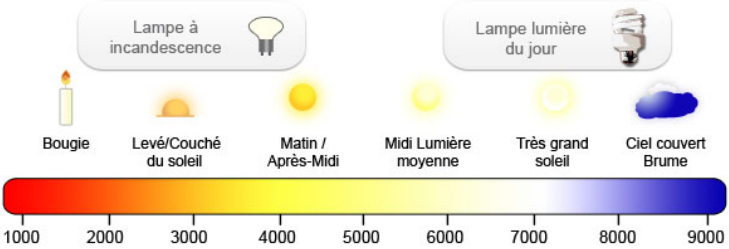
Grandeur	Symbole	Unité SI
Flux lumineux	Φ	lumen ($lm \Leftrightarrow W$)
Intensité lumineuse	I	candela ($cd \Leftrightarrow W.sr^{-1}$)
Éclairement/illuminance	E	lux ($lx = lm.m^{-2}$)
Luminance	L	$cd.m^{-2}$



(b) Stéradian

La température de couleur

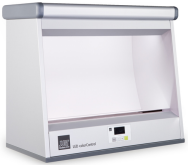
- Corps noir est un objet idéal qui absorberait parfaitement toute l'énergie qu'il reçoit.
- Son rayonnement ne dépend que de sa température.



Température de couleur

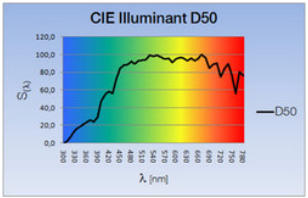
Illuminant standard

- Illuminant A : lumière Tungstène
- Illuminant D50 : lumière du jour à 5000 K.
- Illuminant D65 : lumière du jour à 6500 K.

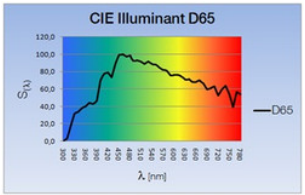


Cage de lumière

(a) Illuminant A

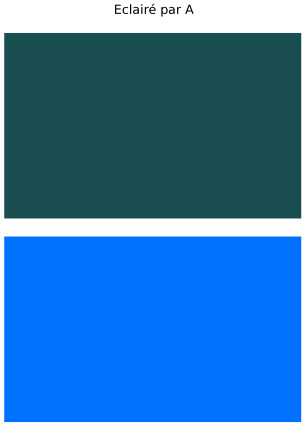


(b) Illuminant D50



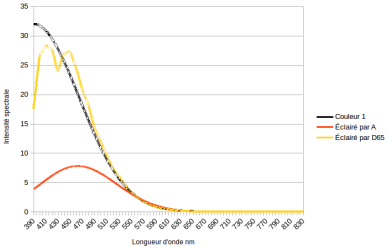
(c) Illuminant D65

Exemples



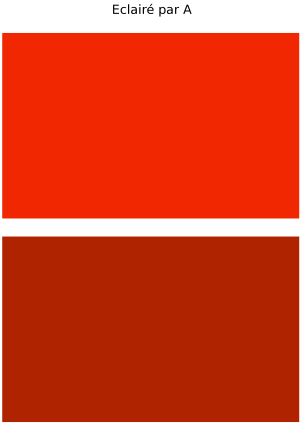
(a) Apparence colorée

(b) Couleur théorique



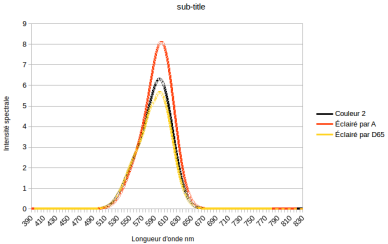
(c) Spectre

Exemples



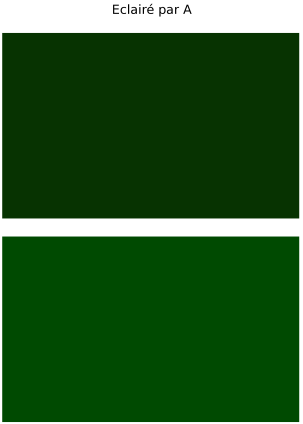
(a) Apparence colorée

(b) Couleur théorique



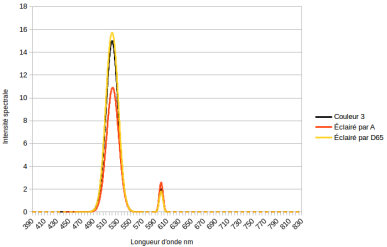
(c) Spectre

Exemples



(a) Apparence colorée

(b) Couleur théorique



(c) Spectre

Mesure de lumière

- Spectroradiomètre
  - données spectrale,
  - luminance ou chromaticité,
  - transportable.

Spectroradiomètre

- Luminancemètre
  - éclairement lumineux (lx),
  - multi-capteur,
  - portable.

Luminancemètre

Plan

1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

La règle de trois

Énergie perçue

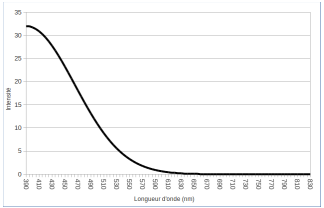
$$E = \int_{\Omega} I(\lambda) O(\lambda) d\lambda,$$

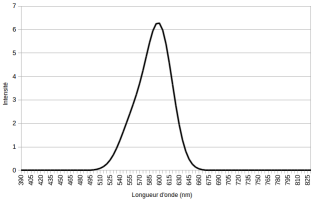
où

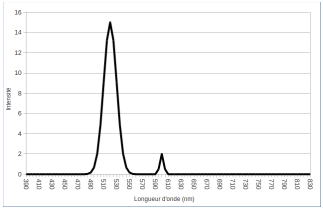
- Ω : domaine spectral des longueurs d'onde visibles ;
- λ : la longueur d'onde observée ;
- E : l'énergie ;
- I : au spectre de la lumière ;
- O : le spectre de réflectance de l'objet observé.

Exemples

Apparences colorées





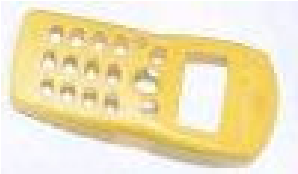


Spectres

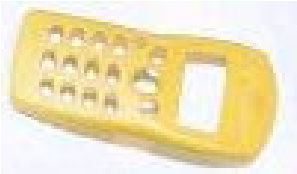
Le métamérisme

Deux objets métamères :

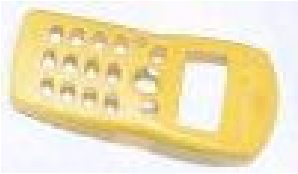
- couleur similaire sous un illuminant,
- différente sous un autre.



(a) Objet 1 Illuminant D65



(b) Objet 2 Illuminant D65



(c) Objet 1 Illuminant A

(d) Objet 2 Illuminant A

Mesure de couleur

- Photomètre
  - luminance et chromaticité,
  - information trichromatique,
  - sans contact.

(a) Spectrophotomètre

- Colorimètre
  - chromaticité,
  - information trichromatique,
  - comparateur de couleur,
  - lumière intégrée,
  - avec contact.

(b) Colorimètre

Plan

1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

La règle de trois

Énergie perçue

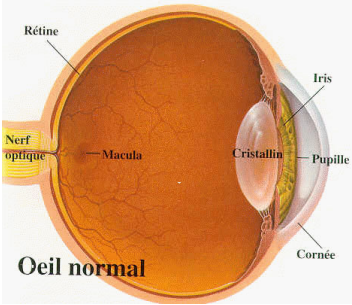
$$E = \int_{\Omega} I(\lambda) O(\lambda) R(\lambda) d\lambda,$$

où

- Ω : domaine spectral des longueurs d'onde visibles ;
- λ : la longueur d'onde observée ;
- E : l'énergie ;
- I : au spectre de la lumière ;
- O : le spectre de réflectance de l'objet observé ;
- R : le spectre de sensibilité du récepteur.

L'œil humain

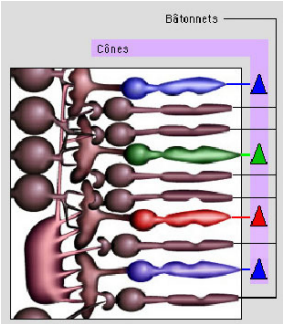
- Le cristallin accommode la profondeur de champ.
- L'iris ajuste la quantité de lumière reçue par la rétine.
- La rétine reçoit la sensation visuelle.
- Le nerf optique transmet l'information.



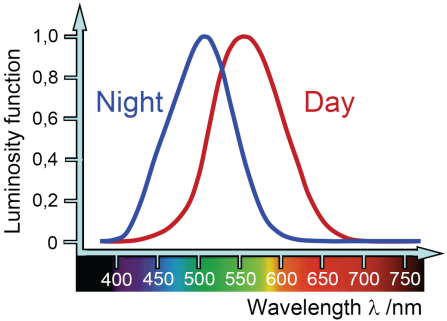
(a) Schéma de l'œil

La sensibilité à la lumière

- Vision scotopique
  - bâtonnets.
- Vision photopique
  - cônes.



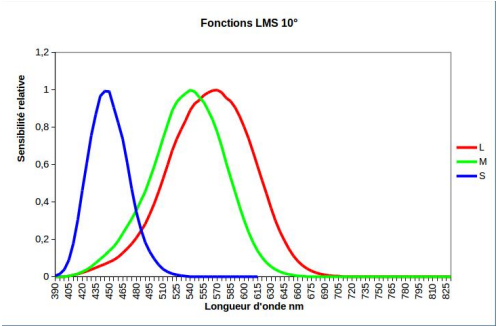
(b) Cellule de la rétine



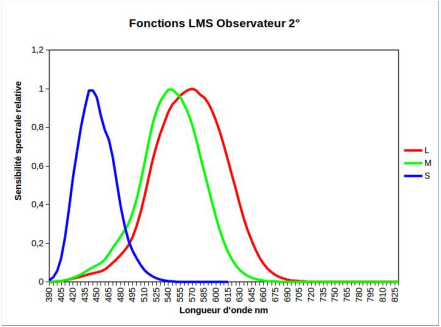
(c) Sensibilité spectral des cônes

La sensibilité à la lumière

- Bâtonnets
  - sensible à l'intensité lumineuse,
  - 120 millions.
- Cônes
  - 3 types (S, M et L),
  - 7 millions présent uniquement sur la macula.



(d) 10° de vision



(e) 2°de vision

Sensibilité spectrale des cônes

L'observateur standard

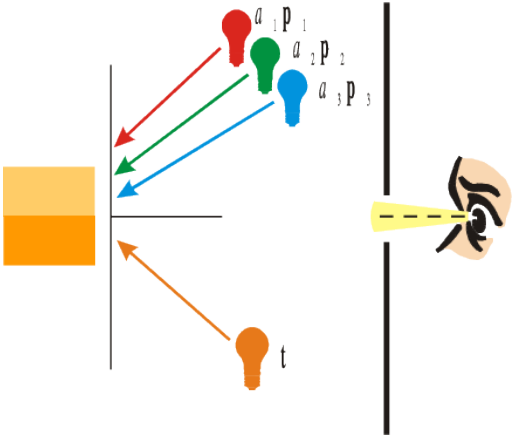
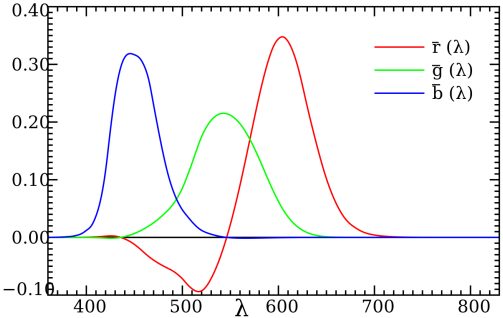


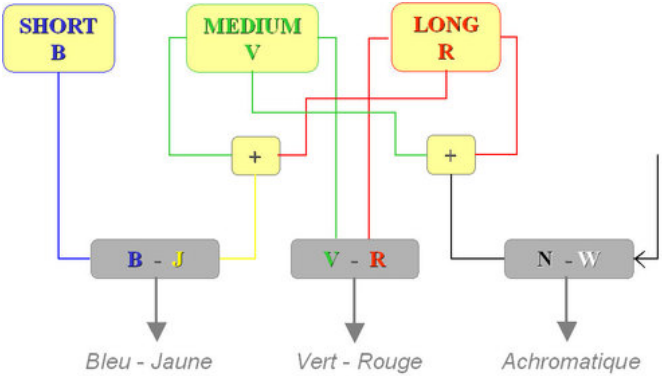
Schéma de l'expérience



Résultat de l'expérience

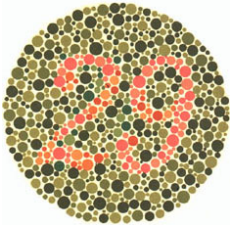
Le nerf optique

- Transformation de l'information au passage dans le nerf optique.

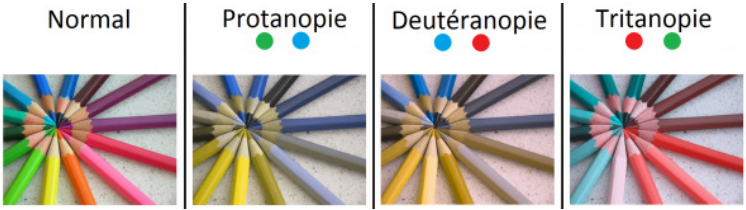


Anomalies de perception couleur

- Dychromatopsie
  - thrichromatisme anormal,
  - dichromatisme,
  - achromatisme.

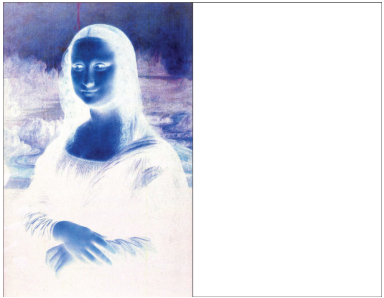


Le test d'Ishihara



Illusions d'optiques

- Sensibilité au temps de fixation.

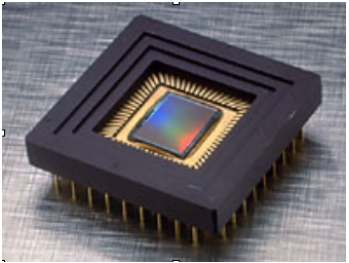


- Sensibilité à l'environnement. [2]

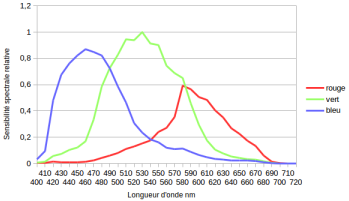
2. Quelques illusions.

Les capteurs photos ou vidéos

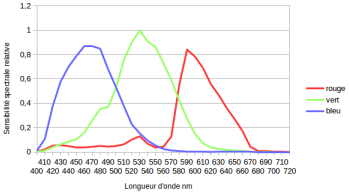
- Différents capteurs donc différentes sensibilités
- Calibrage à faire



(a) Capteur

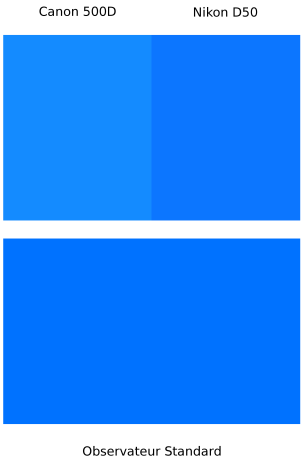


(b) Canon 500D

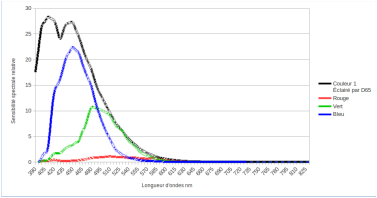


(c) Nikon 50

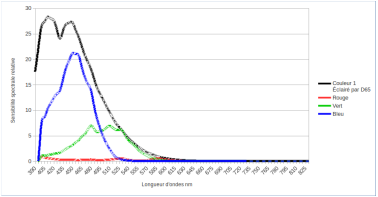
Exemples



(a) Apparence colorée

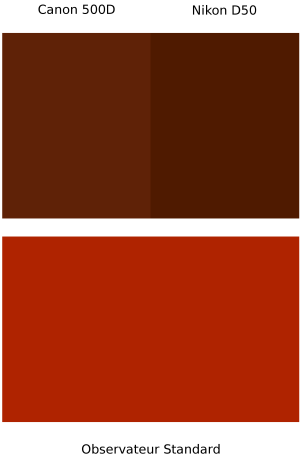


(b) Canon 500D

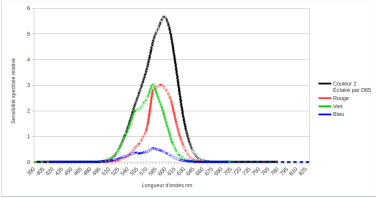


(c) Nikon 50

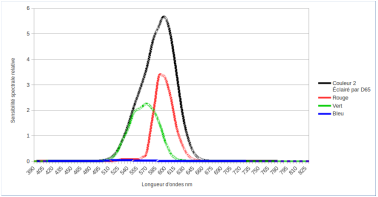
Exemples



(a) Apparence colorée

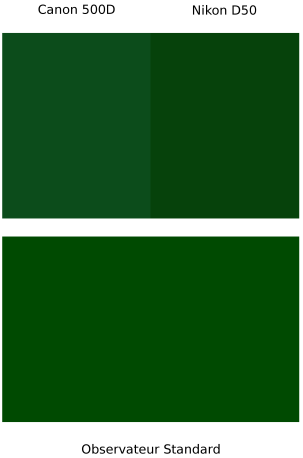


(b) Canon 500D

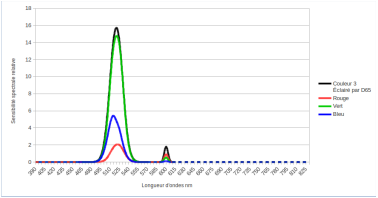


(c) Nikon 50

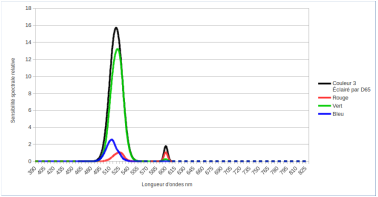
Exemples



(a) Apparence colorée



(b) Canon 500D



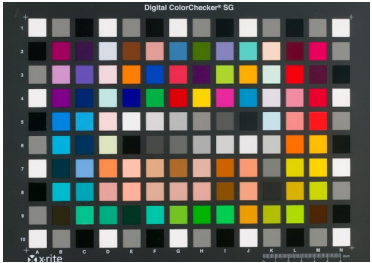
(c) Nikon 50

Calibrage

- Appareil photo.

Sonde de calibrage

- Appareil photo.

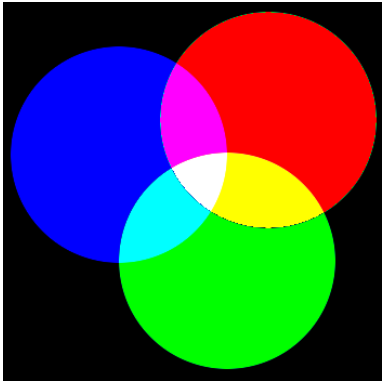


Mire couleur

Plan

1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

Synthèse additive

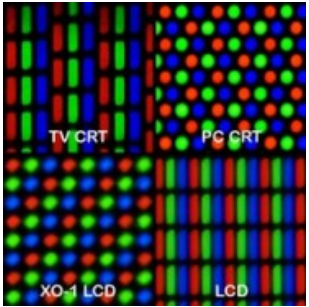


(a) Synthèse additive

- Fonctionnement des sources primaires.
- Primaires :
  - rouge,
  - vert,
  - bleu.

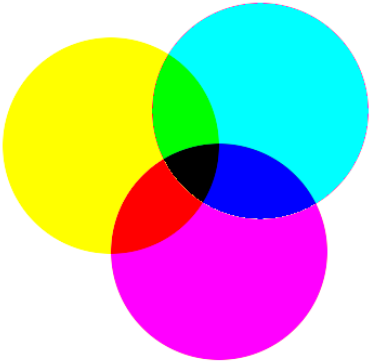
Exemples de synthèse additive

- Écran
- Vidéoprojecteur



(b) Zoom dalle d'écran

Synthèse soustractive

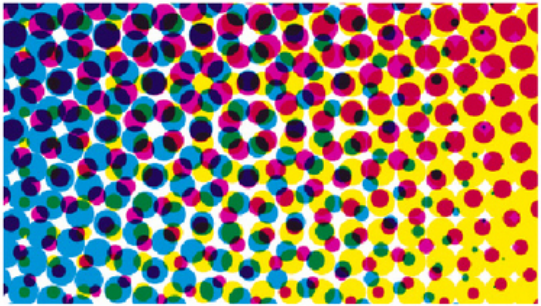


(c) Synthèse soustractive

- Fonctionnement des sources secondaires.
- Primaires :
  - cyan,
  - magenta,
  - jaune.
- Exercice.

Exemples de synthèse soustractive

- Peinture,
- Imprimerie,
- Sources secondaires.



Zoom impression offset

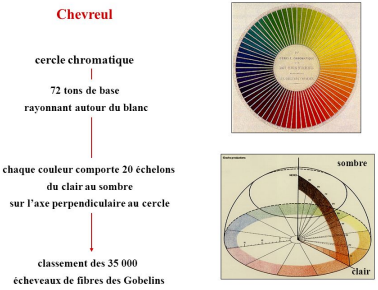
Loi de Grassman

- Trois paramètres sont nécessaires et suffisants pour définir la couleur d'une lumière ;
- toutes les échelles de mélanges colorées sont continues ;
- le résultat du mélange additif de lumières colorées ne dépend que de l'aspect de chacune des couleurs, mais reste indépendants de l'origine physique de cet aspect.

Nommer une couleur

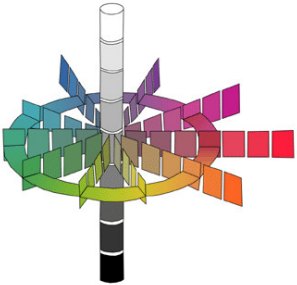
Espaces perceptuels

- Michel-Eugène Chreveul :
  - Manufacture des Gobelins,
  - Cercle chromatique.



Espace de Chevreul

- Albert Henry Munsell :
  - hauteur $\equiv$ luminosité,
  - angle $\equiv$ teinte,
  - rayon $\equiv$ saturation.



Espace de Munsell

Espaces perceptuels

(a) Initiale

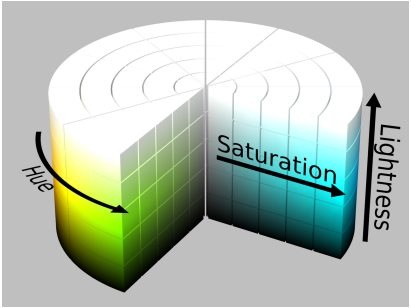
(b) Luminosité

(c) Teinte

(d) Saturation

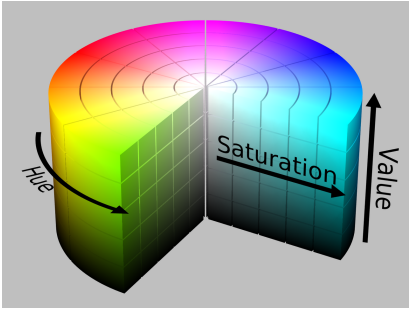
Espaces dit perceptuels

- Hue Saturation Lightness



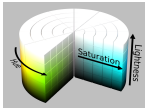
HLS

- Hue Saturation Value



HSV

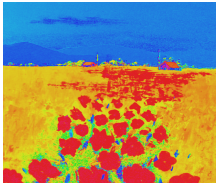
Espaces dit perceptuels



(a) HLS

(b) Intiale

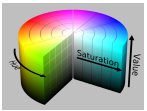
(c) Luminosité



(d) Teinte

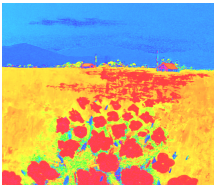
(e) Saturation

Résultat en HLS



(a) HSV

(b) Value



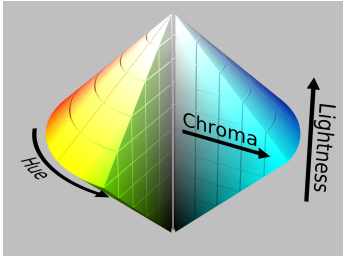
(c) Teinte

(d) Saturation

Résultat en HSV

Espaces dit perceptuels

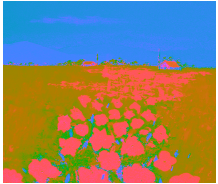
- Improved HLS



$$
\begin{aligned}
L &= 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B \\
S &= \max(R,G,B) - \min(R,G,B) \\
H' &= \operatorname{acos}\left(\frac{R - \frac{G}{2} - \frac{B}{2}}{\sqrt{R^2 + G^2 + B^2 - RG - RB - BG}}\right) \\
H &= \begin{cases} 360 - H' \text{ si } B > G, \\ H' \text{ sinon.} \end{cases}
\end{aligned}
$$

(a) Intiale

(b) Lumonisoté



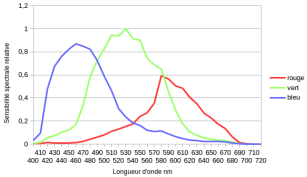
(c) Teinte

(d) Saturation

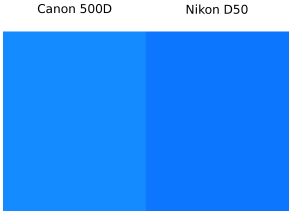
Espaces dit perceptuels

Attention !

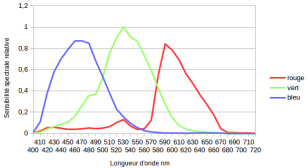
Ces espaces sont dépendant du capteur !



(a) Canon 500D



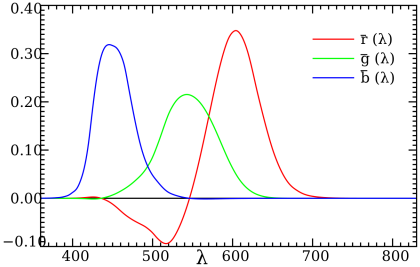
(b) Acquisitions



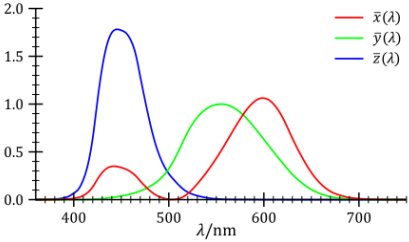
(c) Nikon D50

La comparaison d'images acquises avec deux appareils différents ne peut se faire dans les espaces *RGB* ou perceptuels !

CIE XYZ



(a) Espace *CIE rgb*



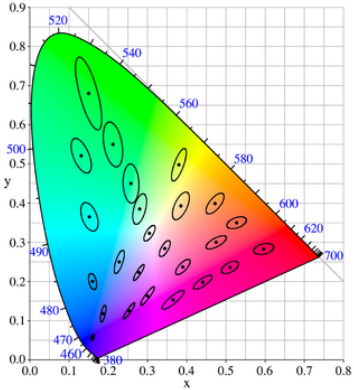
(b) Espace *CIE XYZ*

À partir de l'expérience de l'observateur standard

- Objectif : supprimer les valeurs négatives.

CIE XYZ

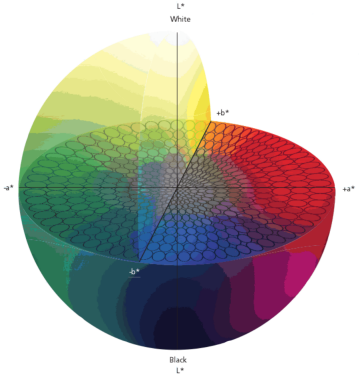
- Longueur d'onde monochromatique ;
- Droite des pourpres ;
- Localisation du blanc ;
- Ellipses de perception.



Espace *CIE XYZ*

CIELAB

- Avantages :
  - espace perceptuellement uniforme,
  - indépendant de l'éclairage.
- Inconvénients :
  - transformation non linéaire,
  - caractérisation des primaires du support à analyser.



Écart colorimétrique

Où trouver les équations ?

Plan

1. Introduction
2. La lumière
3. L'objet
4. Le récepteur
   - L'œil humain
   - L'appareil photo
5. La trichromie
   - Les différentes synthèses
   - Espaces couleur
6. Conclusion

Synthèse

- Pour percevoir/mesurer la couleur : il faut lumière, objet, et récepteur
  - pour faire une bonne mesure chacun des trois paramètres doit être étudié/mesurer.
- Les trois cônes présents dans notre œil nous permettent de représenter l'ensemble des couleurs visibles pour les humains par trois paramètres :
  - rouge, vert, bleu ;
  - teinte, luminosité, saturation ;
  - CIELAB pour mesurer des différences de couleurs perceptuelles.
- L'analyse peut être plus simple en changeant d'espace couleur
- Attention, il y a autant d'espaces RGB que de capteur et d'émetteurs RGB !

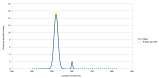
Résumé

(a) Lumière

(b) Spectre

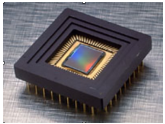
(c) Mesure

(d) Objet

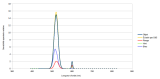


(e) Spectre

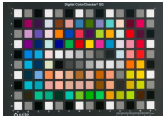
(f) Mesure



(g) Récepteur



(h) Spectre



(i) Mesure