



**Université
Jean Monnet**
Saint-Étienne

Comprendre la couleur

Mathieu Hébert



**LABORATOIRE
HUBERT CURIEN**

UMR • CNRS • 5516 • SAINT-ÉTIENNE



Couleur : un terme polysémique

2

« Le peintre ayant sur sa palette des **couleurs**, peint de la **couleur** » Claude Monnet



Couleur : un terme polysémique

3

Le Dictionnaire de l'Académie Française donne trois acceptions principales:

1. Attribut visuel caractéristique d'un objet

« Une robe couleur bleu ciel »

2. Substance

« Couleurs à l'huile »

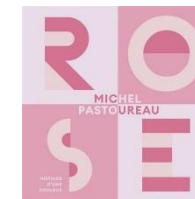
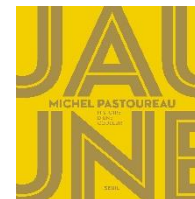
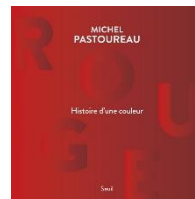
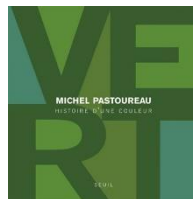
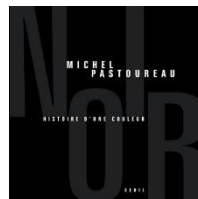
Broyer. Piler, casser, réduire en poudre. Broyer du poivre. Broyer des couleurs.
Broyer menu.

3. Manifestation d'un état physique ou moral

« Reprendre des couleurs », « Couleur d'une musique »

Dimension symbolique et culturelle

Michel Pastoureau



Qu'est-ce que la couleur ?

4

Les trois hypothèses d'Euler

1. La couleur provient de la lumière
2. La couleur provient de la matière
3. La couleur provient de l'âme



Leonhard Euler (1707 – 1783)

Qu'est-ce que la couleur ?

5

Petit Robert

- ◇ Sensation traduisant l'impression reçue par l'œil humain lorsqu'il reçoit de l'énergie électromagnétique dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 800 nanomètres (lumière visible).
 - ◇ Caractère d'une lumière, de la surface d'un objet (indépendamment de sa forme), selon l'impression particulière qu'elles produisent.
- La couleur implique la lumière, la matière, et le système visuel humain

Lumière

Perception



Matière

Lumière

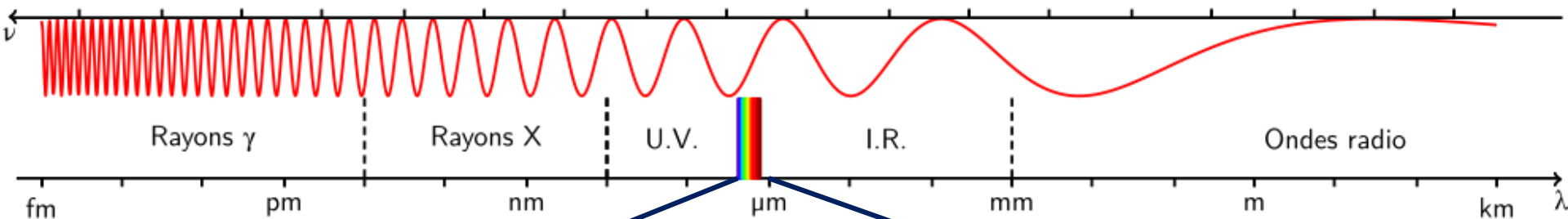


Le spectre de la lumière visible

8

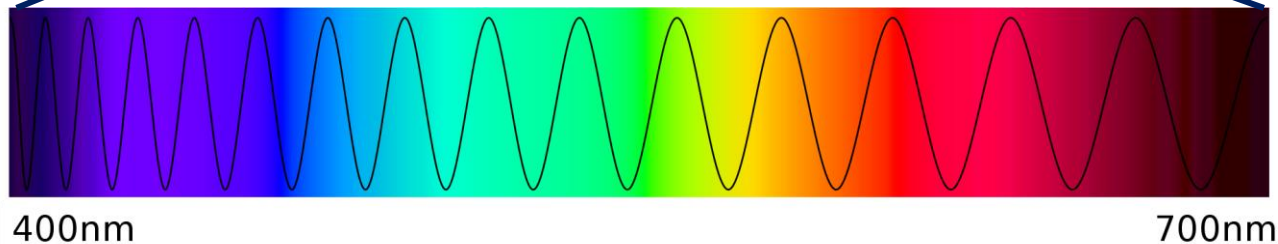
La lumière est une vibration du champ électromagnétique perceptible par l'œil humain

Les ondes électromagnétiques



© wikipedia

Le spectre de la lumière visible

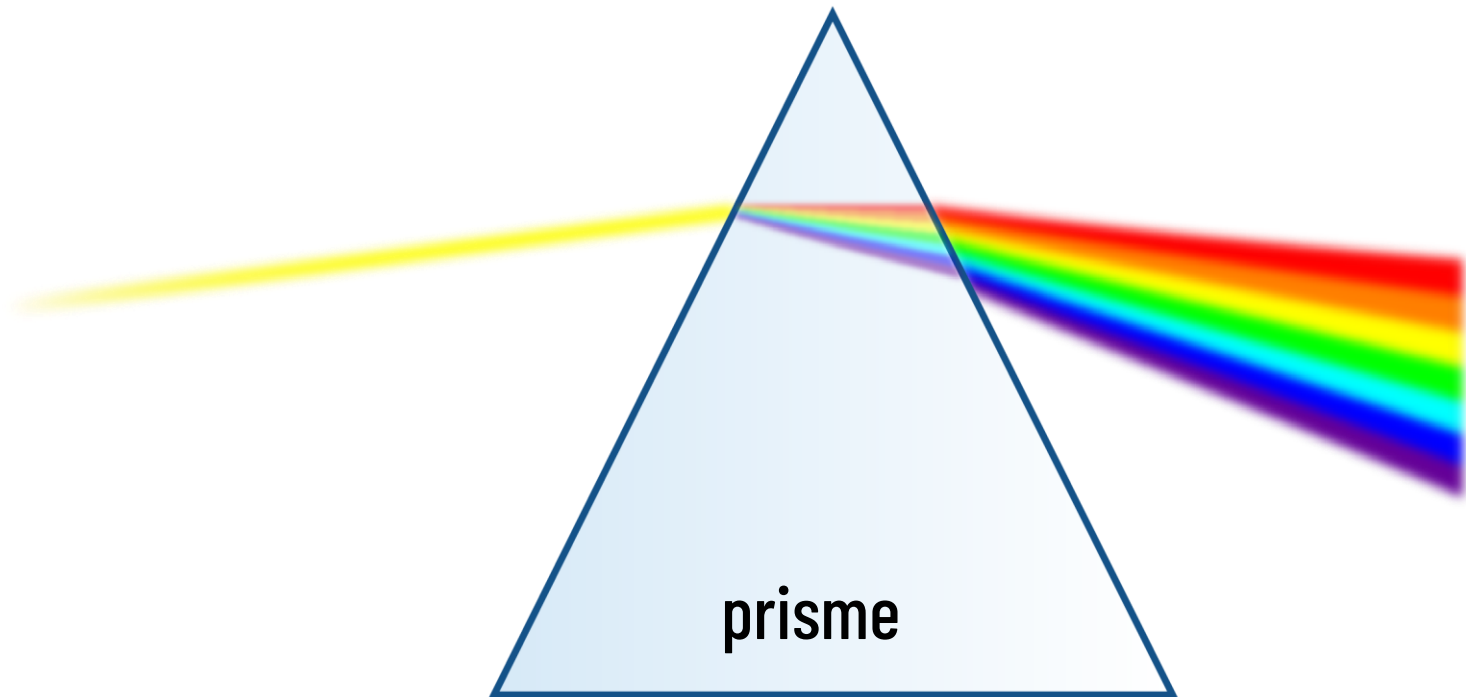


La lumière « blanche »

9

La lumière blanche est la superposition d'ondes visibles

On peut décomposer le spectre de la lumière avec un prisme, pour faire apparaître les différentes ondes

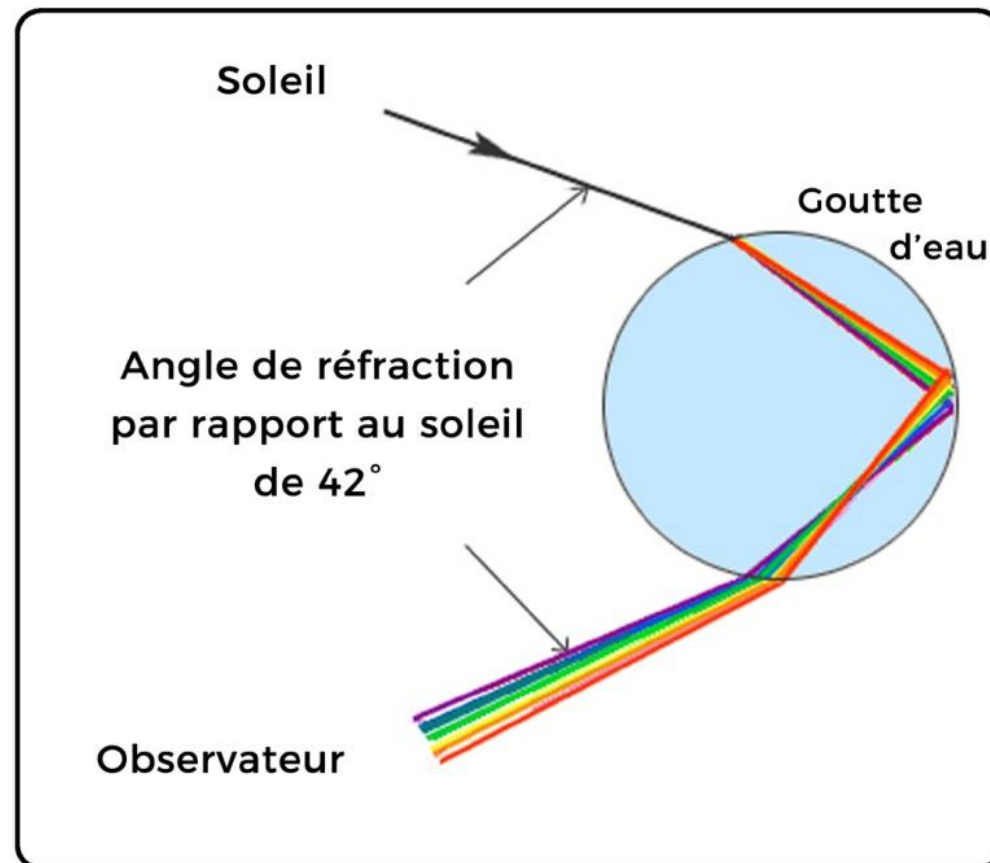


La lumière « blanche »

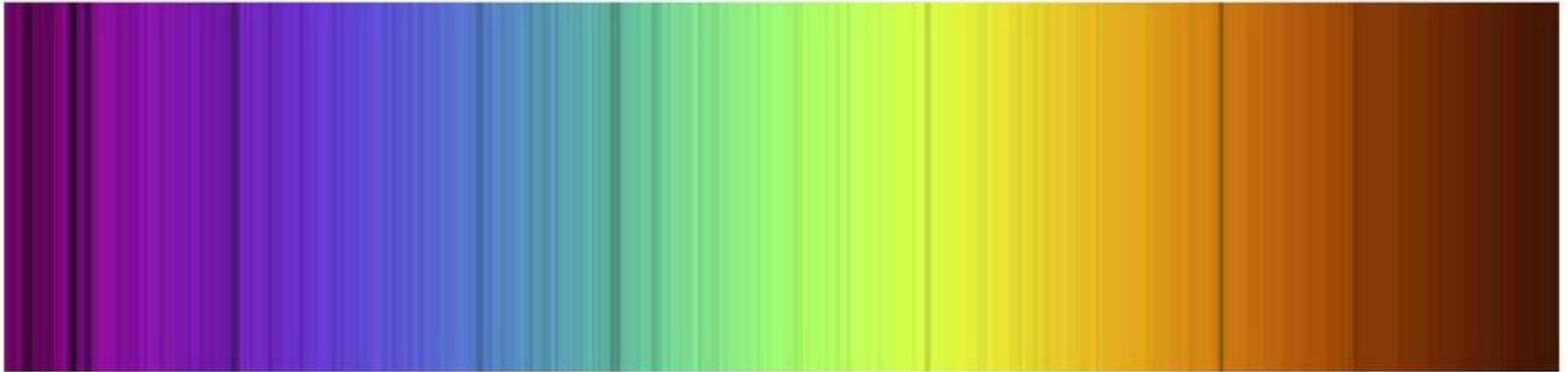
10

La lumière blanche est la superposition d'ondes visibles

On peut décomposer le spectre de la lumière avec une **goutte d'eau**

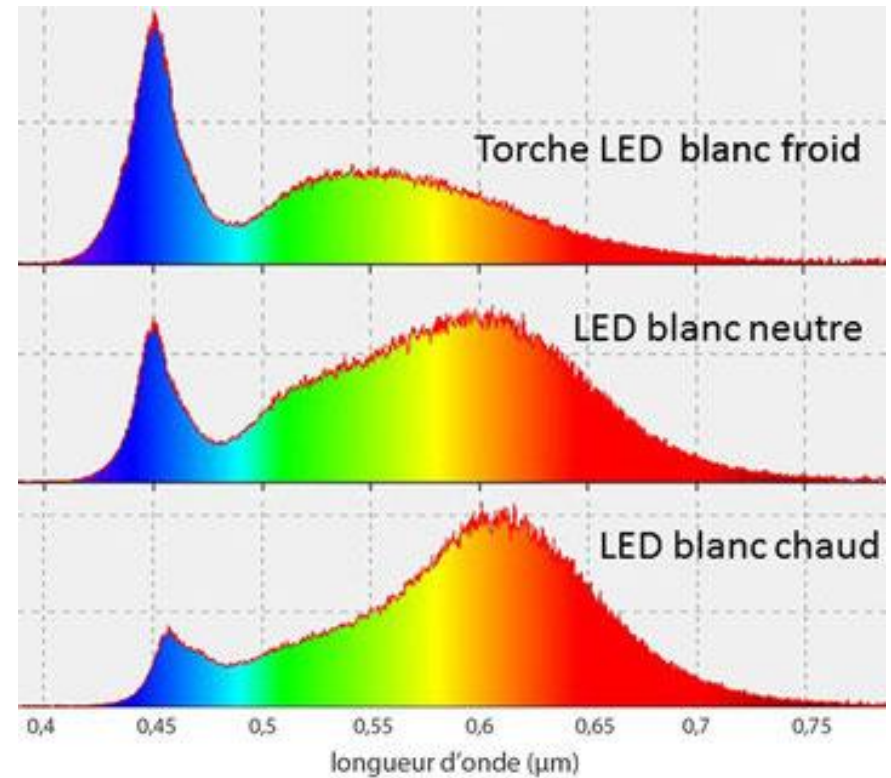
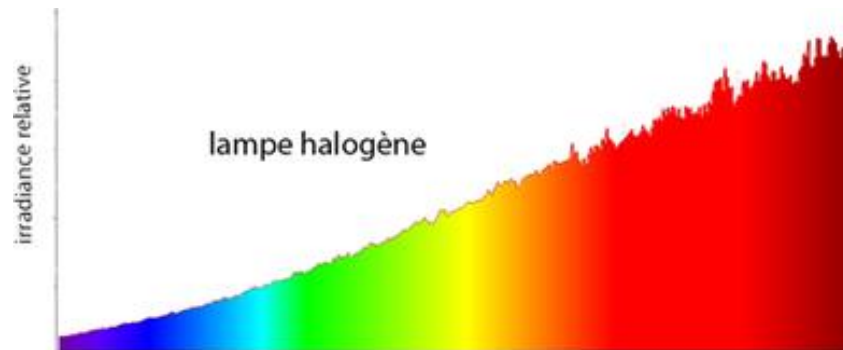
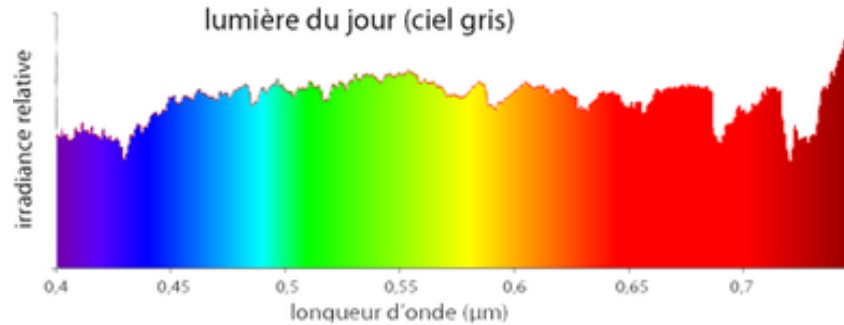


Spectre visible du soleil,
avec ses raies découvertes par Fraunhofer en 1814



Spectre d'éclairages

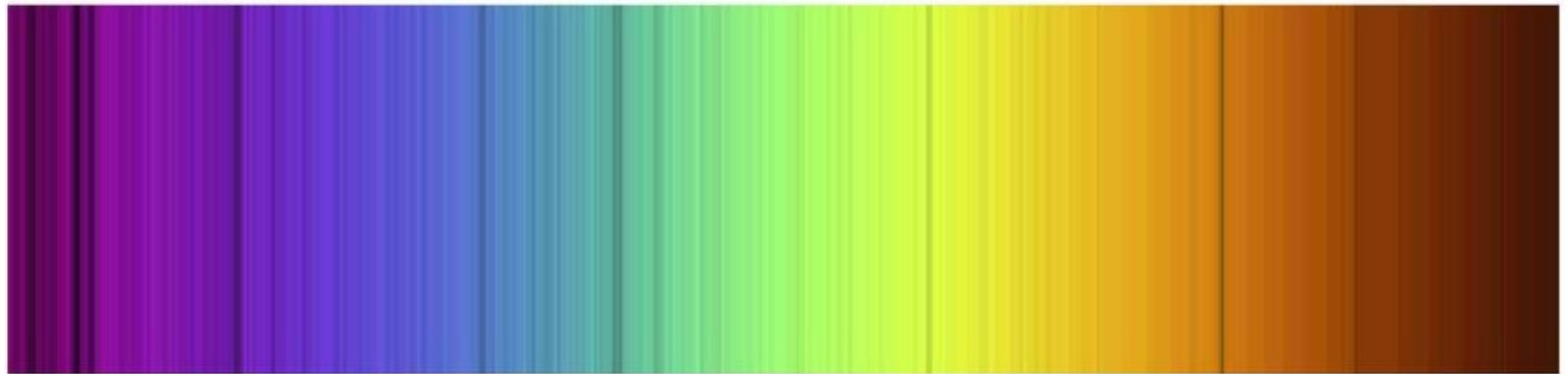
12



Superposition de lumières colorées

13

La superposition de lumières colorées donne une nouvelle couleur



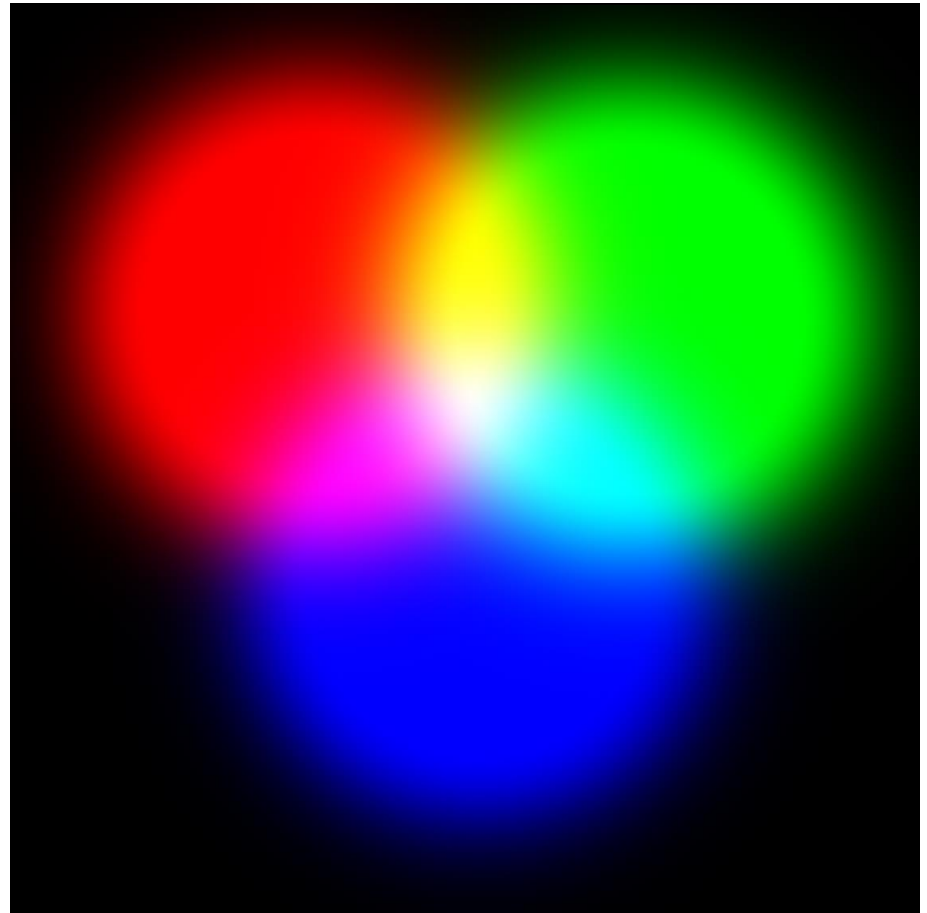
si on superpose tous ces rayons, on retrouve la lumière blanche du soleil

Superposition de lumières colorées

14

La superposition de lumières colorées donne
une nouvelle couleur

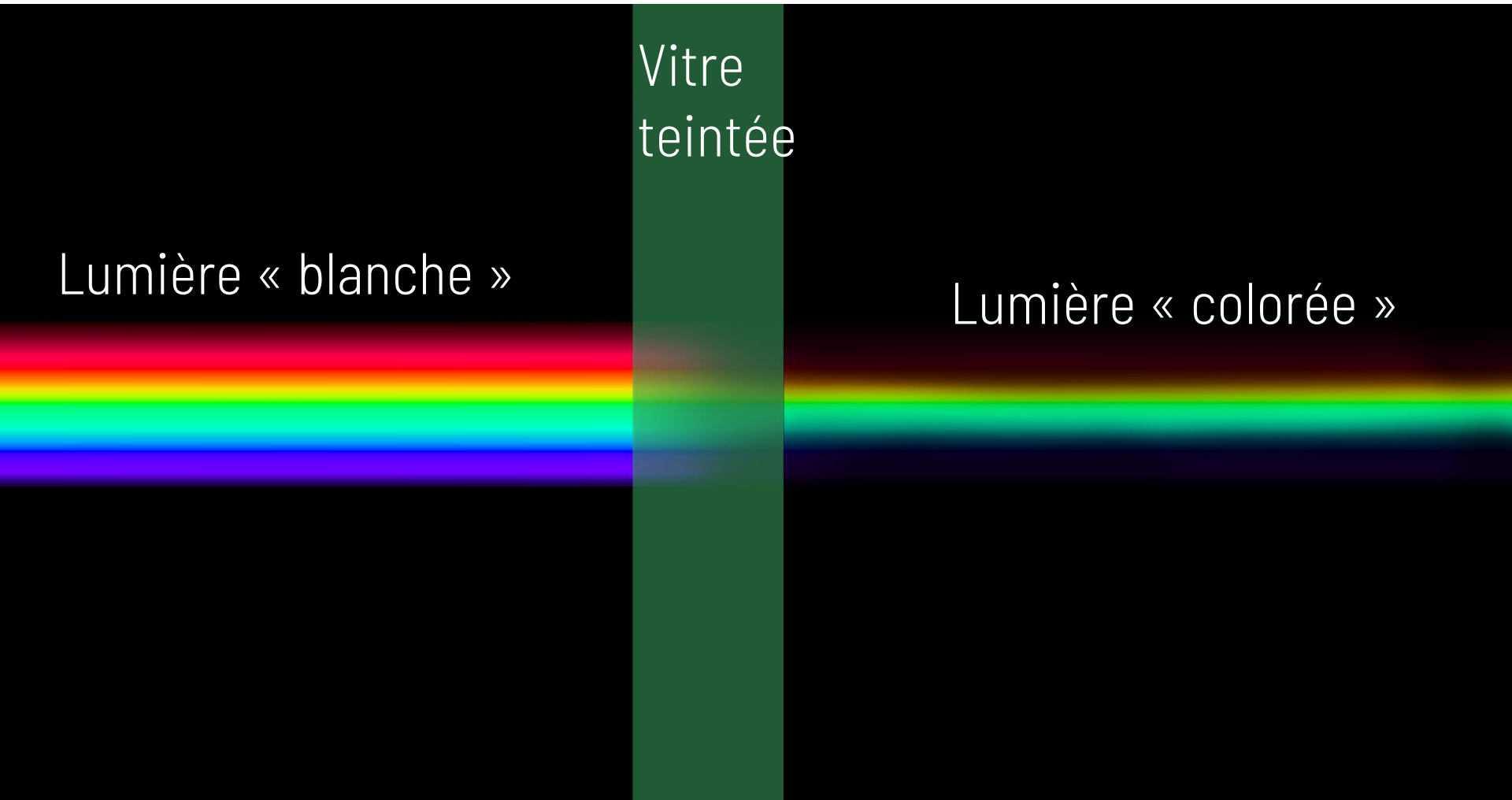
**Synthèse additive
des couleurs**



Filtrer la lumière

15

La matière peut **absorber** en partie la lumière



Les verres

16



Iron oxides



Silver nitrate

Lead (Pb)



Uranium oxide

Chromium

Iron chromite



Gold



Cobalt



Copper oxide

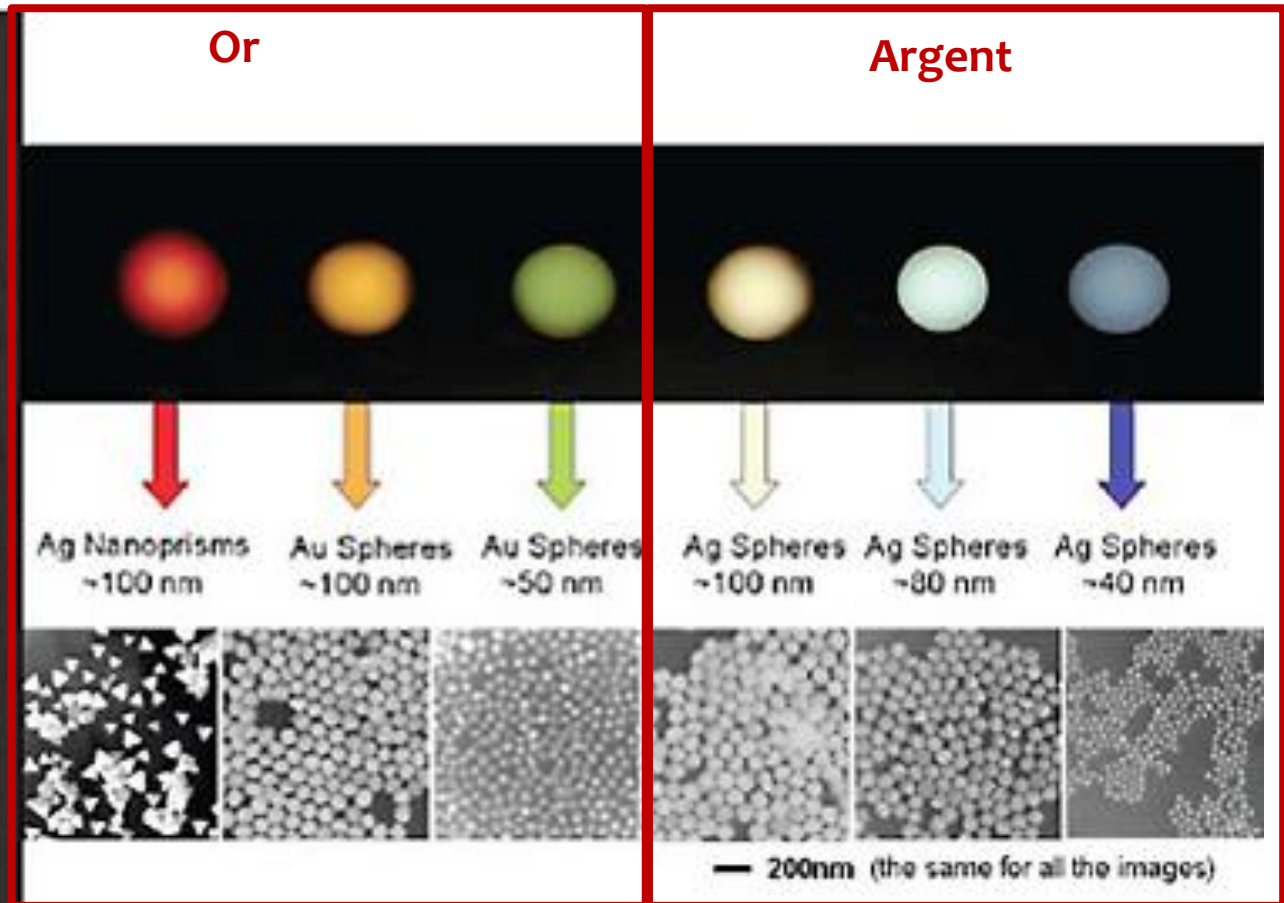
Manganese



Lors que la silice contient des ions or, une seconde cuisson (*recuit*) fait croître des **nanoparticules d'or** métallique, qui absorbent la lumière par **résonance plasmon**



La couleur obtenue dépend de la température de recuit

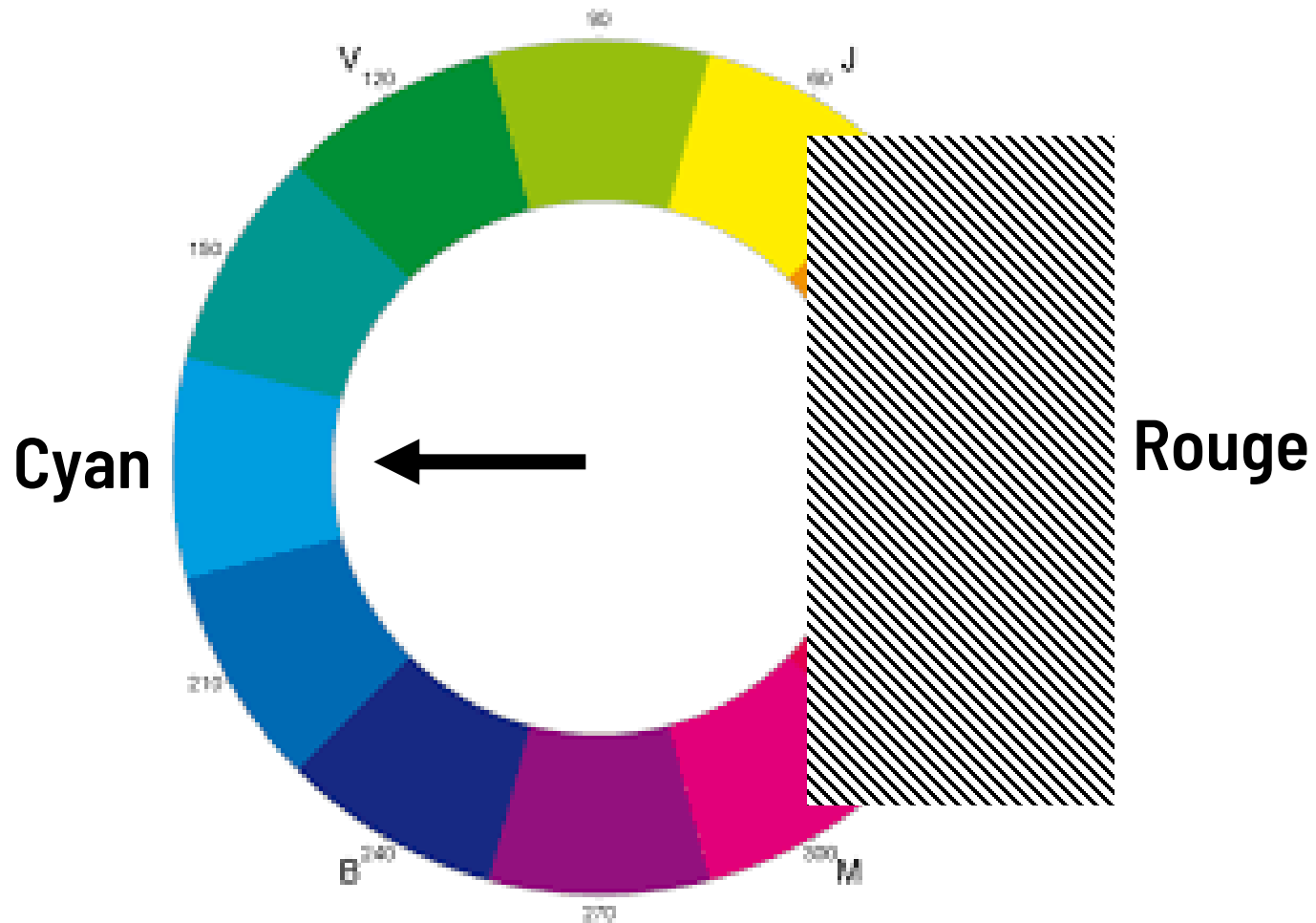


© The Science of Atoms, Molecules, and Photons (2007)

Couleurs opposées

19

Si on supprime de la lumière rouge, la couleur tend vers le vert
(couleur opposée, ou couleur complémentaire)

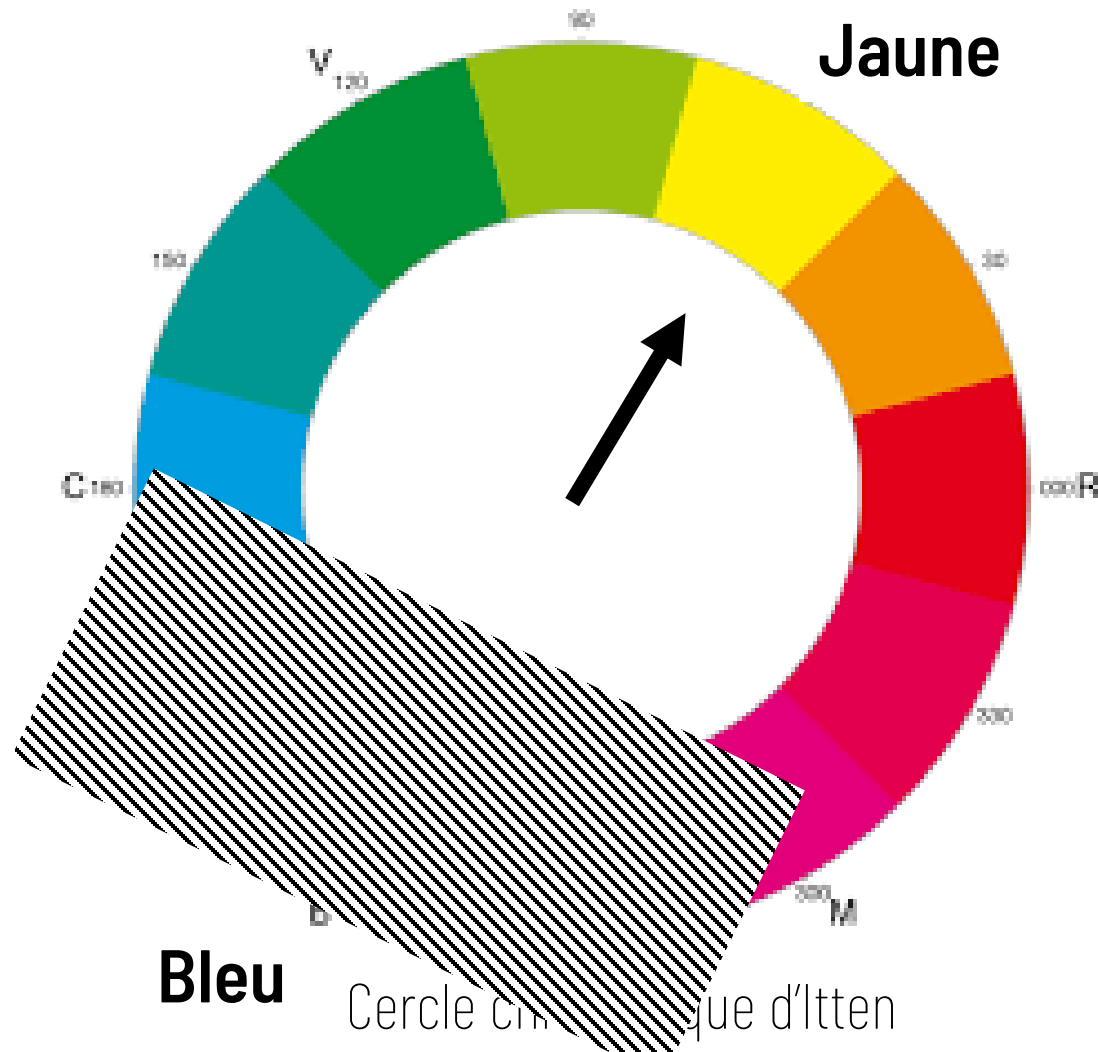


Cercle chromatique d'Itten

Couleurs opposées

20

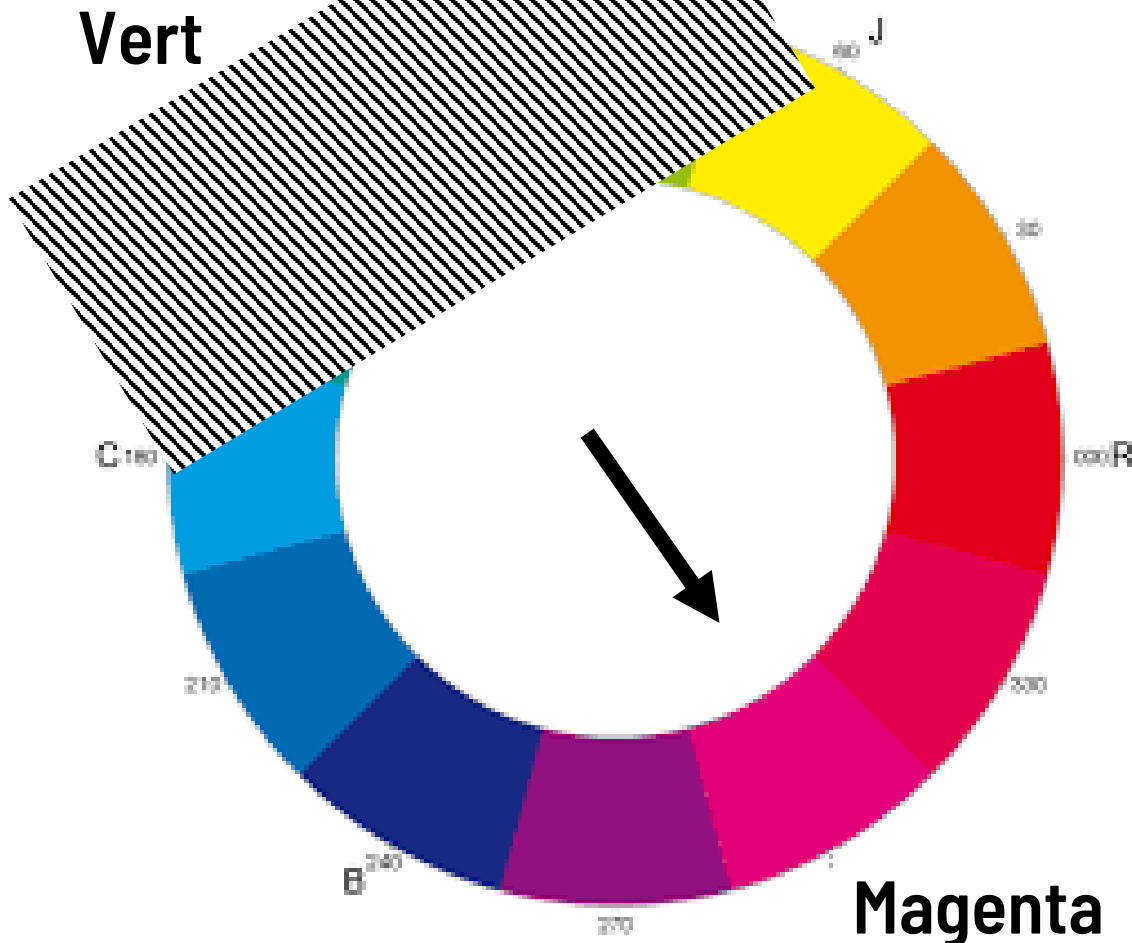
Si on supprime de la lumière rouge, la couleur tend vers le vert
(couleur opposée, ou couleur complémentaire)



Couleurs opposées

21

Si on supprime de la lumière rouge, la couleur tend vers le vert
(couleur opposée, ou couleur complémentaire)



Cercle chromatique d'Itten

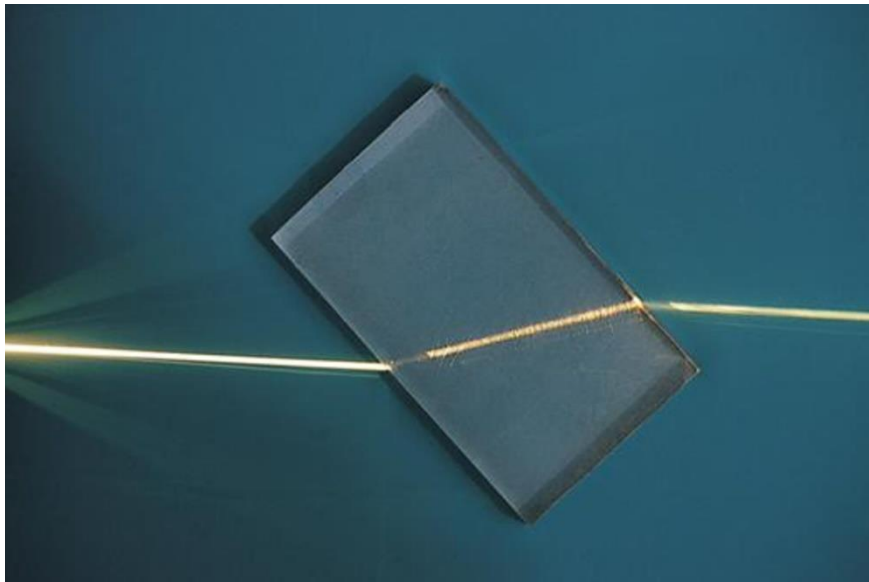
Matière



Dans la vide, la lumière se propage en ligne droite.

Mais la matière peut modifier la course de la lumière,
et faire apparaître des couleurs

Réfraction



© wikipedia

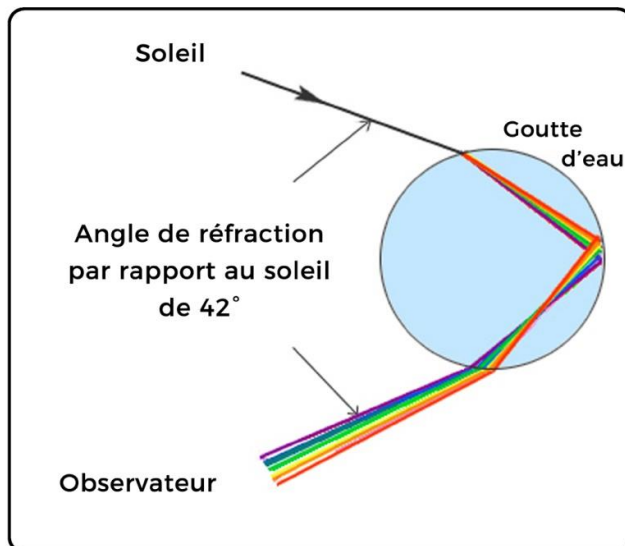


© fr.dreamstime.com

Dans le vide, la lumière se propage en ligne droite.

Mais la matière peut modifier la course de la lumière, et faire apparaître des couleurs

Dispersion



Dans la vide, la lumière se propage en ligne droite.

Mais la matière peut modifier la course de la lumière,
et faire apparaître des couleurs

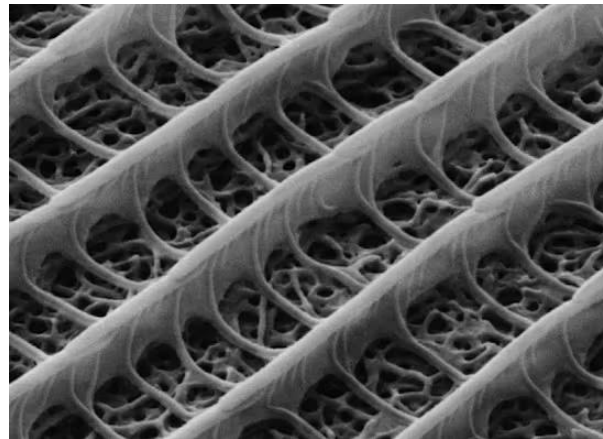
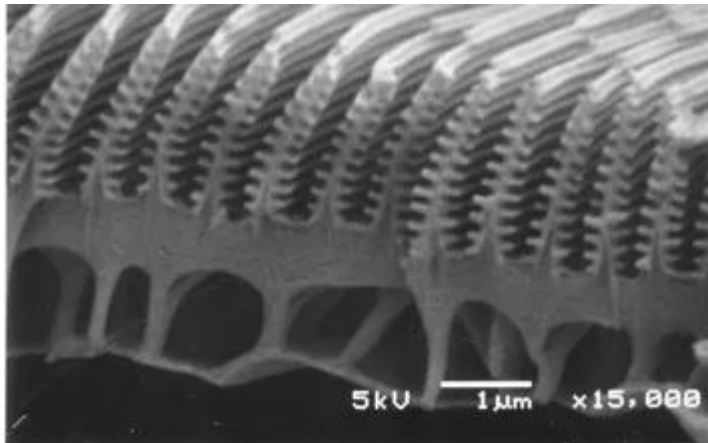
Diffraction



Dans la vide, la lumière se propage en ligne droite.

Mais la matière peut modifier la course de la lumière,
et faire apparaître des couleurs

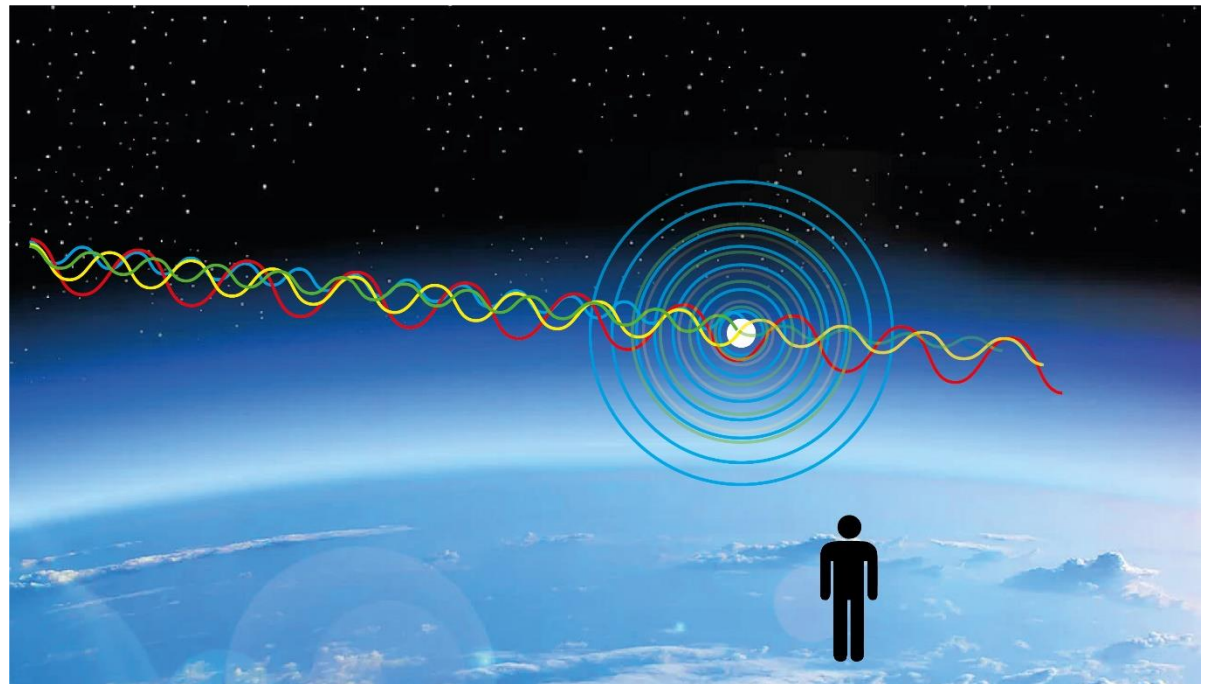
Diffraction



Dans la vide, la lumière se propage en ligne droite.

Mais la matière peut modifier la course de la lumière,
et faire apparaître des couleurs

Diffusion (rayleigh)



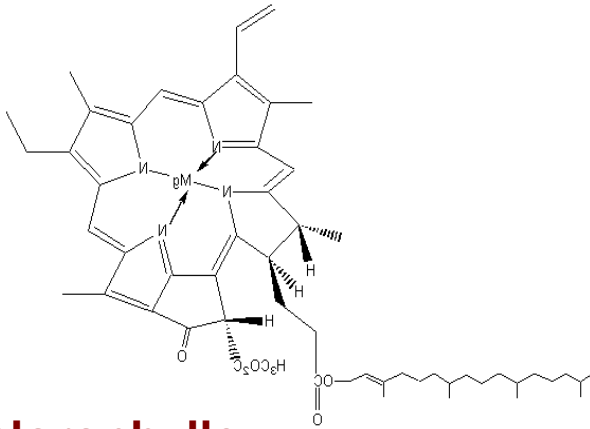
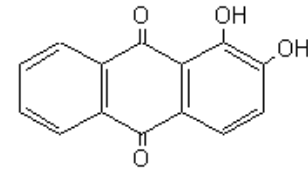
Dans la vide, la lumière se propage en ligne droite.

Mais la matière peut modifier la course de la lumière,
et faire apparaître des couleurs

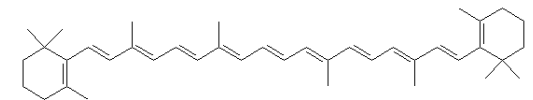
Interférences



Alizarine



Chlorophyll



Carotène



Les pigments



FeO(OH)

Ocre

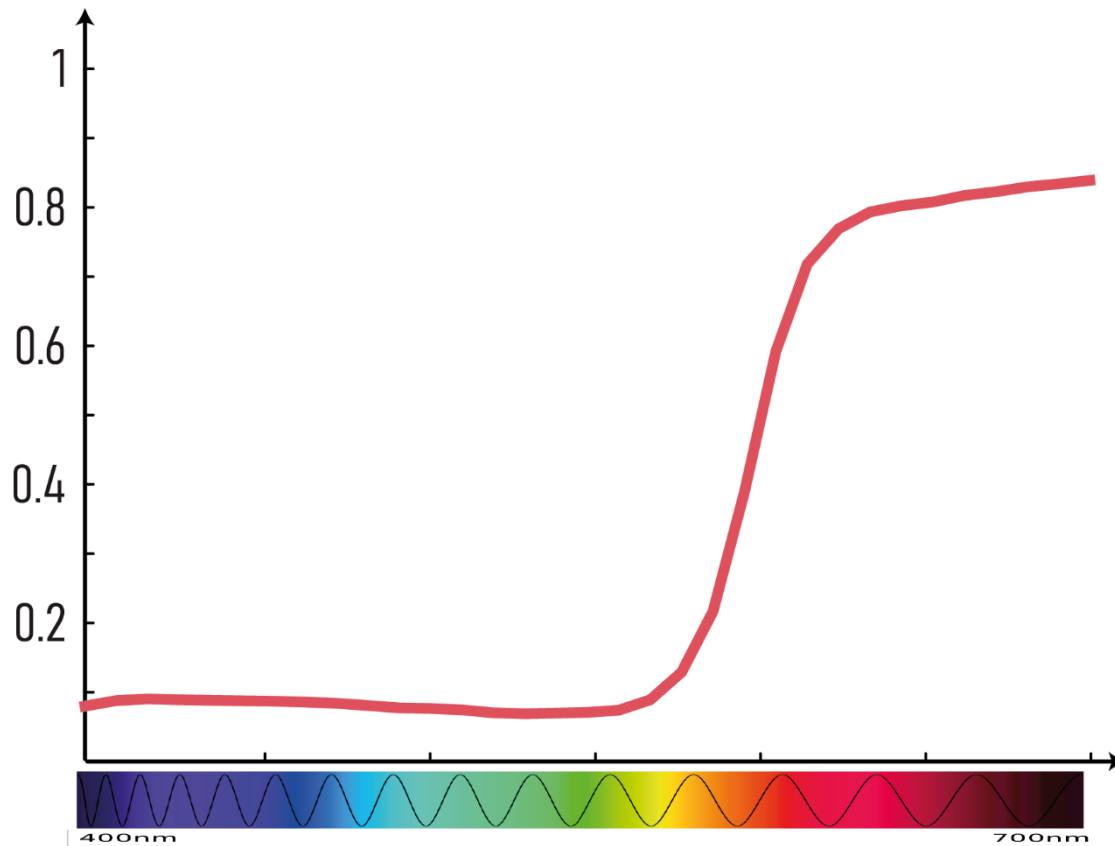
CdS

Jaune de cadmium

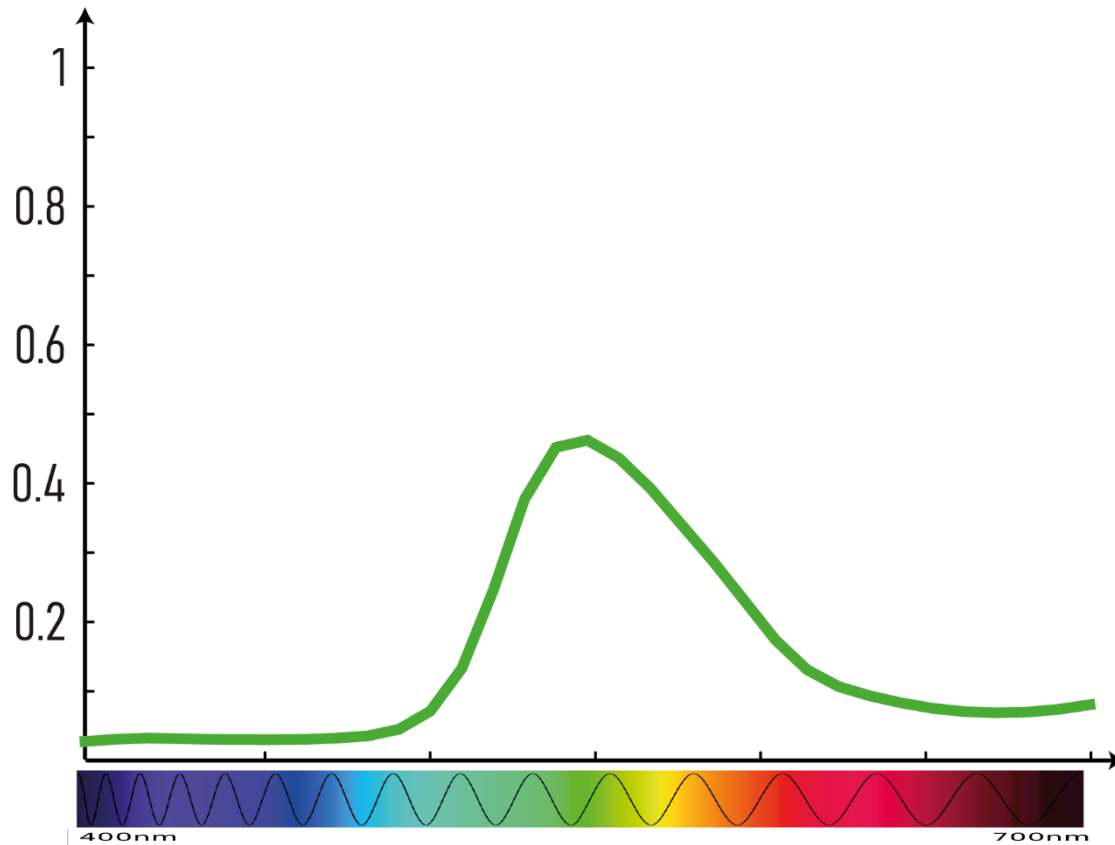
Cd(S,Se)

Rouge de cadmium

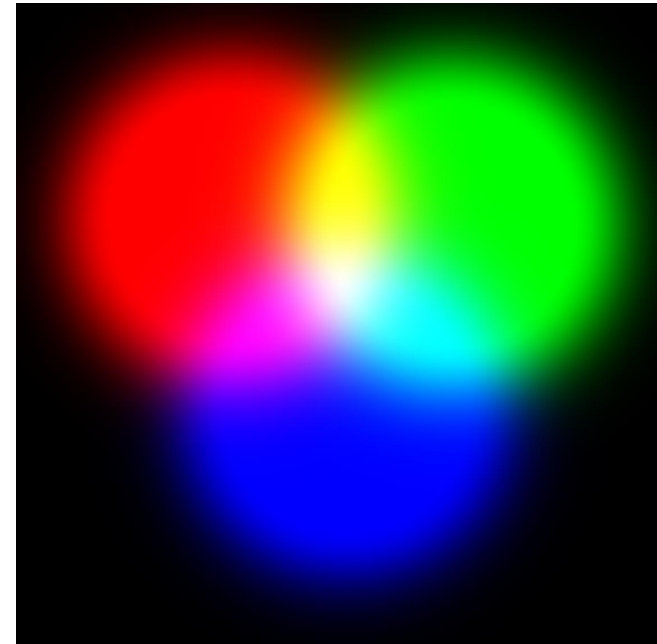
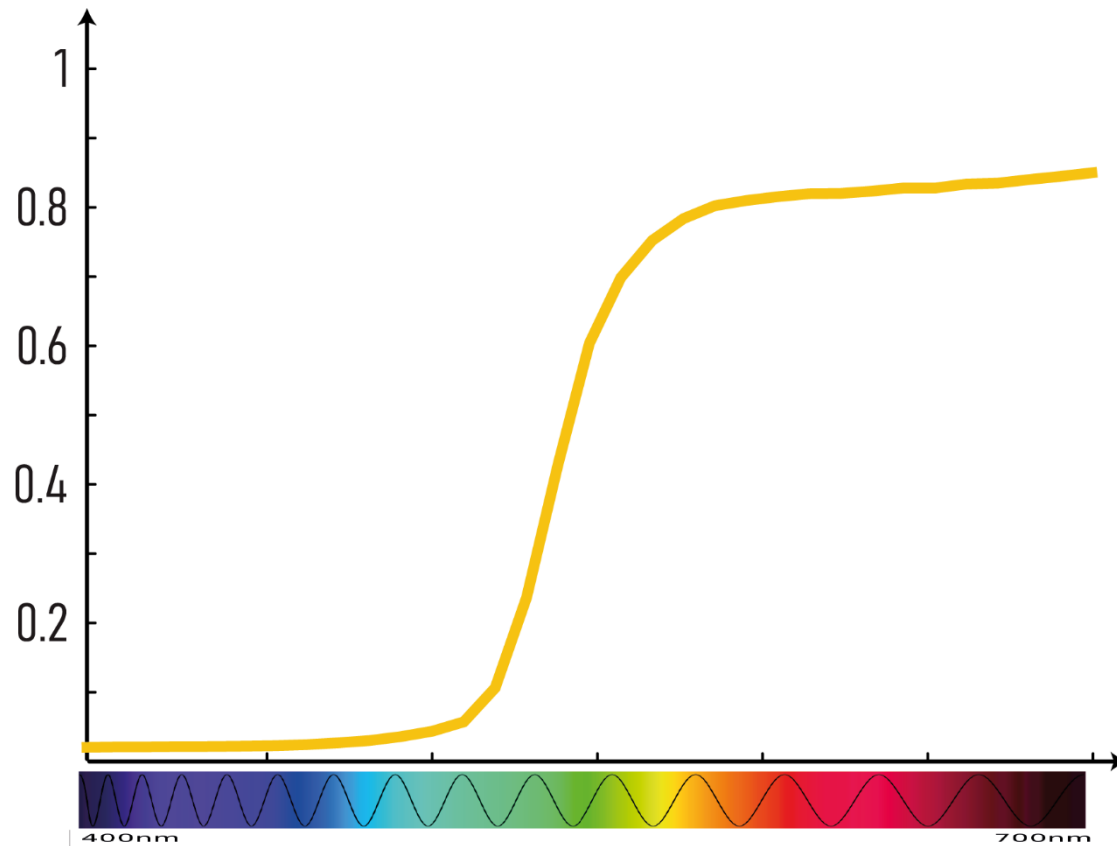
Spectre d'une surface rouge



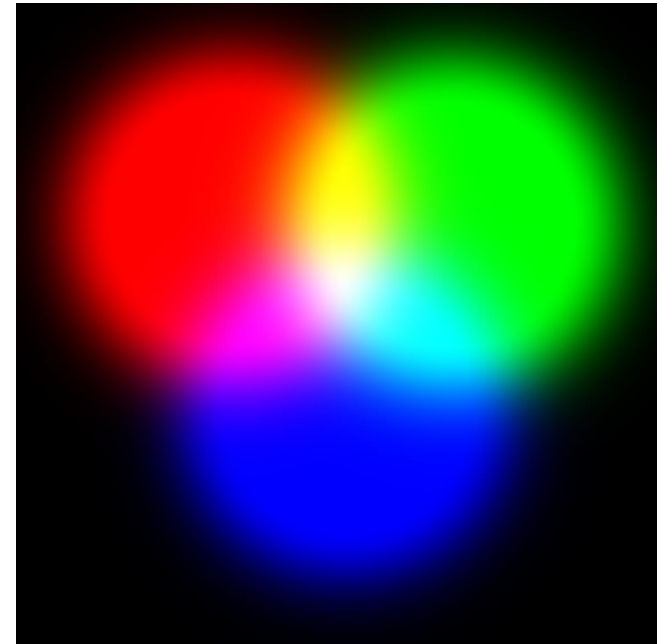
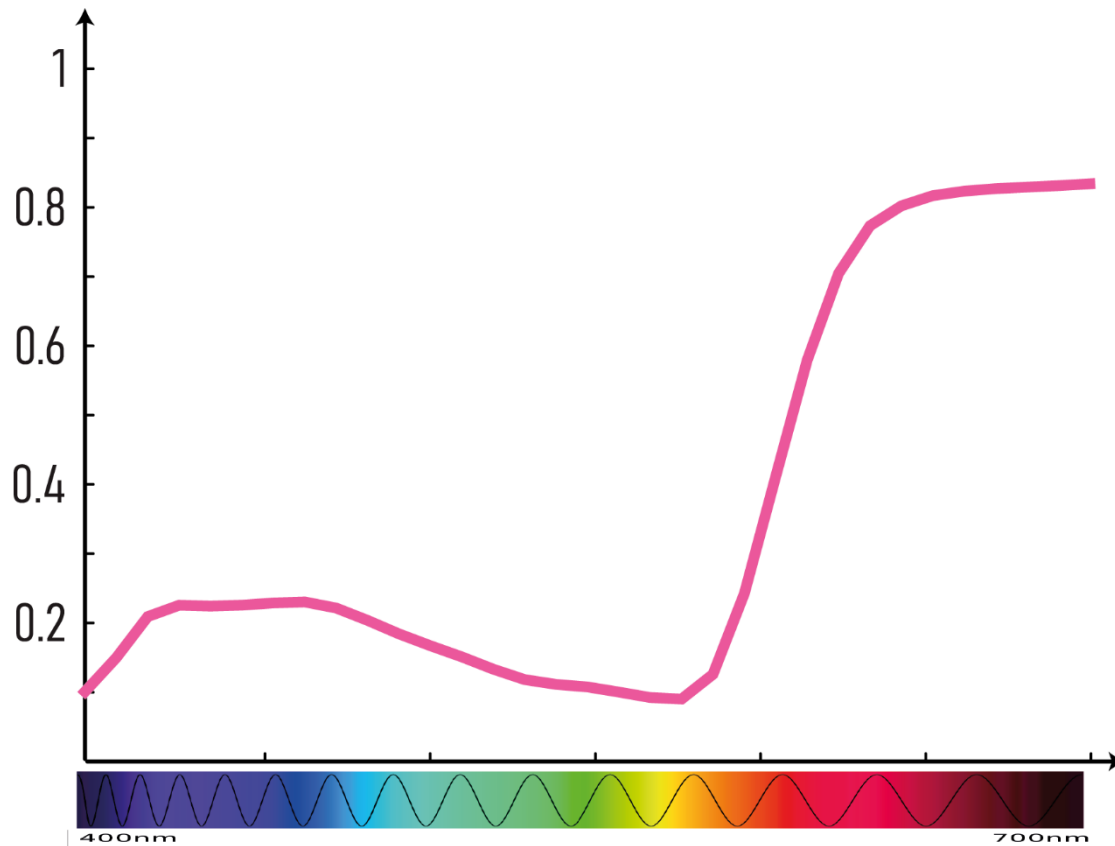
Spectre d'une surface verte



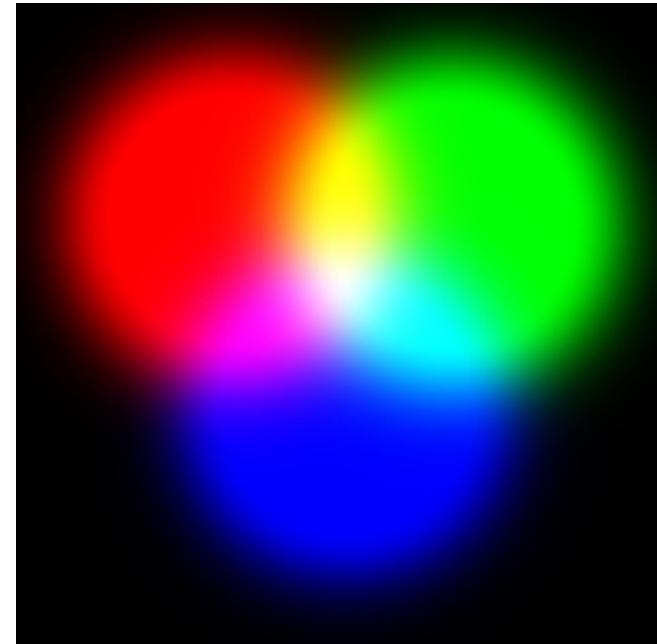
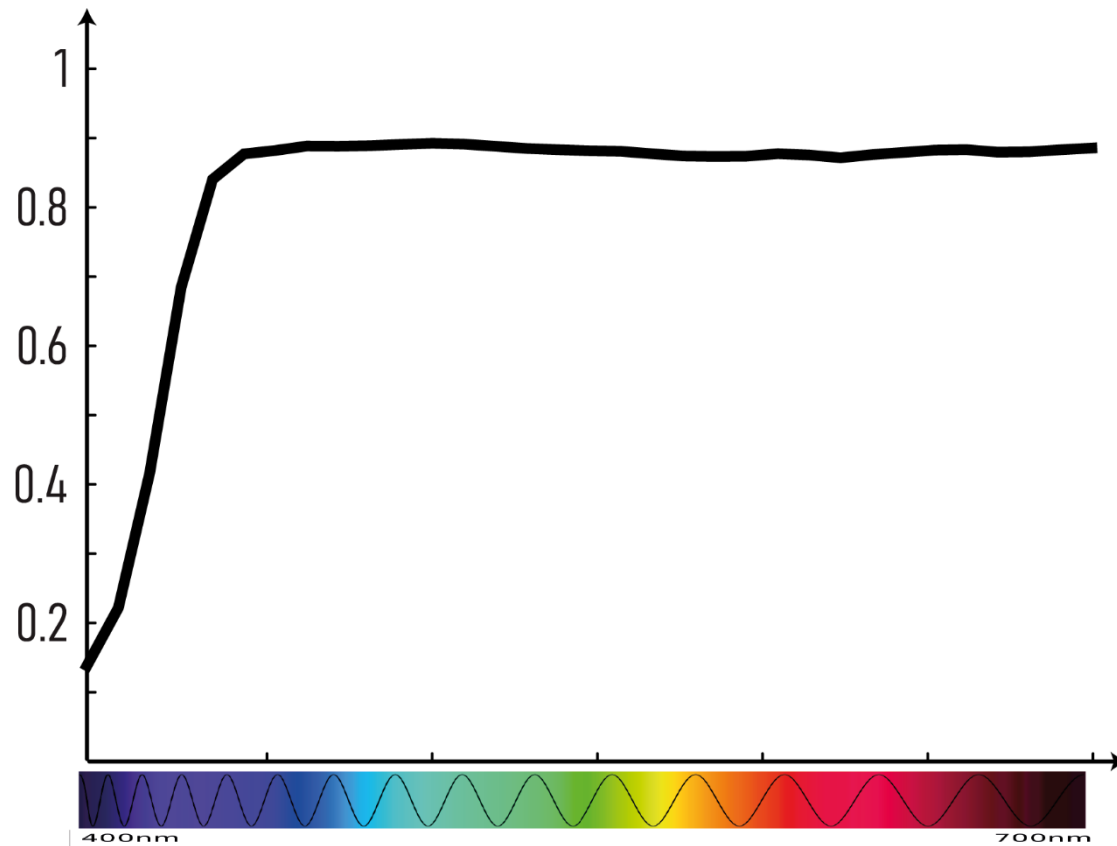
Spectre d'une surface jaune



Spectre d'une surface magenta



Spectre d'une surface blanche (papier)



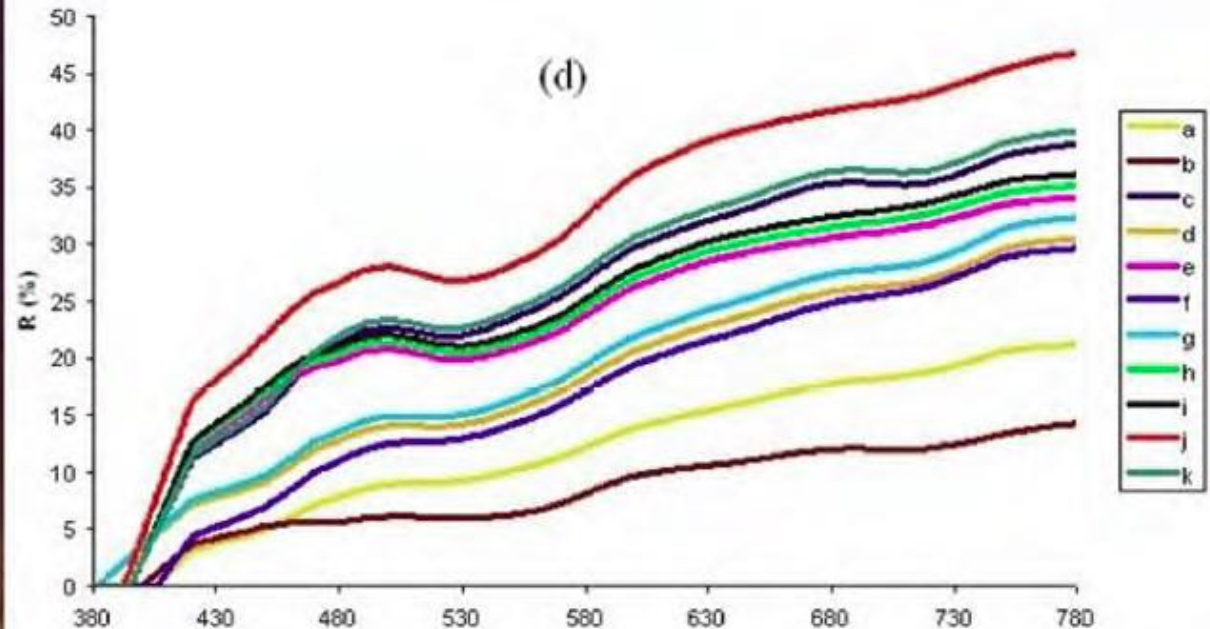
Le spectre est très riche en information pour le physicien. Il indique la composition de la matière



Le spectre est très riche en information pour le physicien. Il indique la composition de la matière



Le spectre est très riche en information pour le physicien. Il indique la composition de la matière



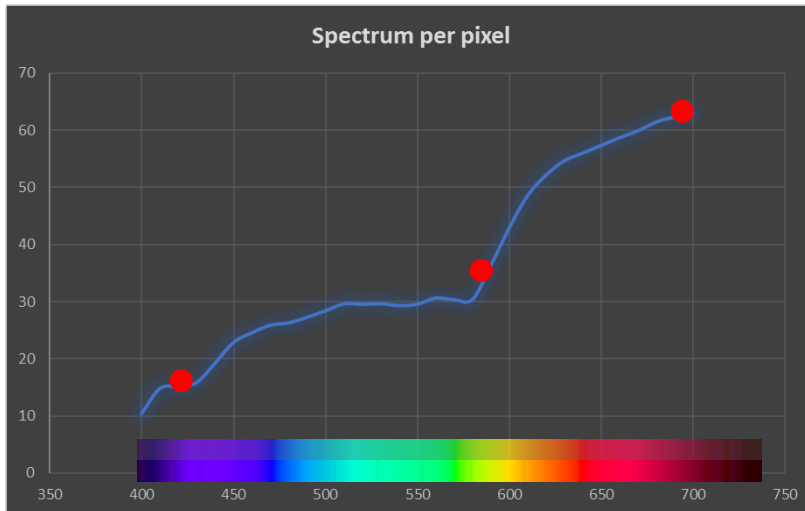
Le spectre est très riche en information pour le physicien. Il indique la composition de la matière.



Exemple: la peau humaine
(caucasienne)

Spectre de réflexion lumineuse

40



$\lambda=420$ nm



$\lambda=590$ nm



$\lambda=700$ nm

Le spectre est très riche en information pour le physicien. Il indique la composition de la matière.



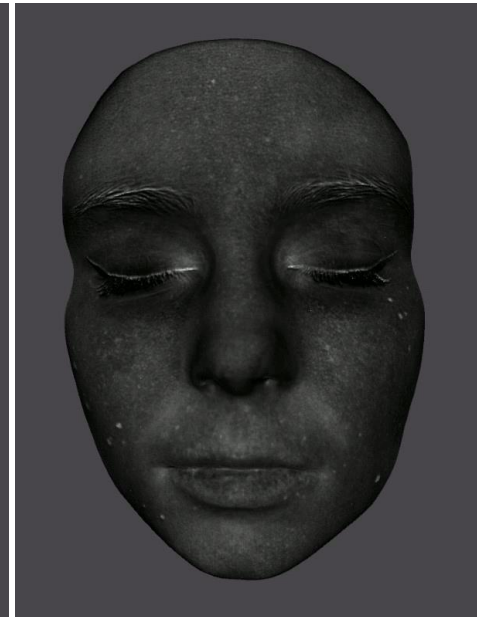
Couleur
(lumière du jour)



Oxygénation du sang



Vascularisation

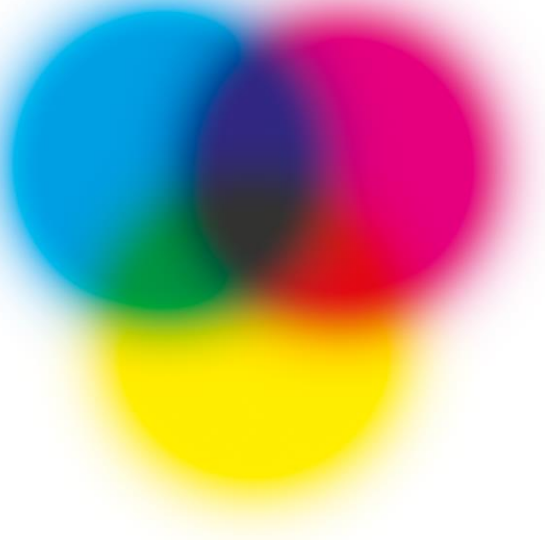


Mélanine

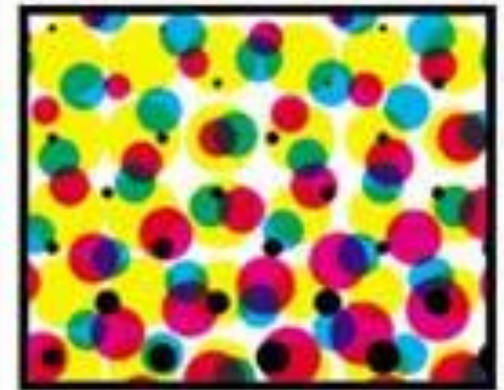
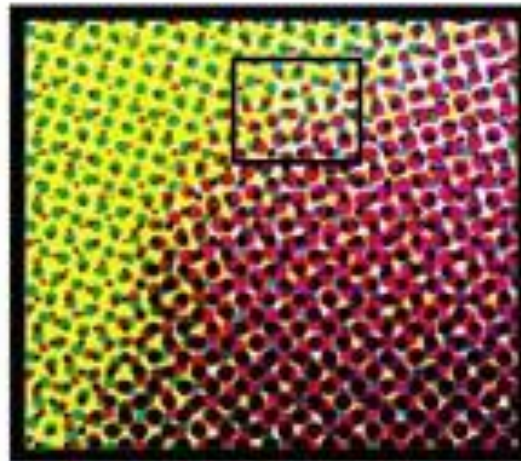
Synthèse soustractive des couleurs

42

Avec des encres

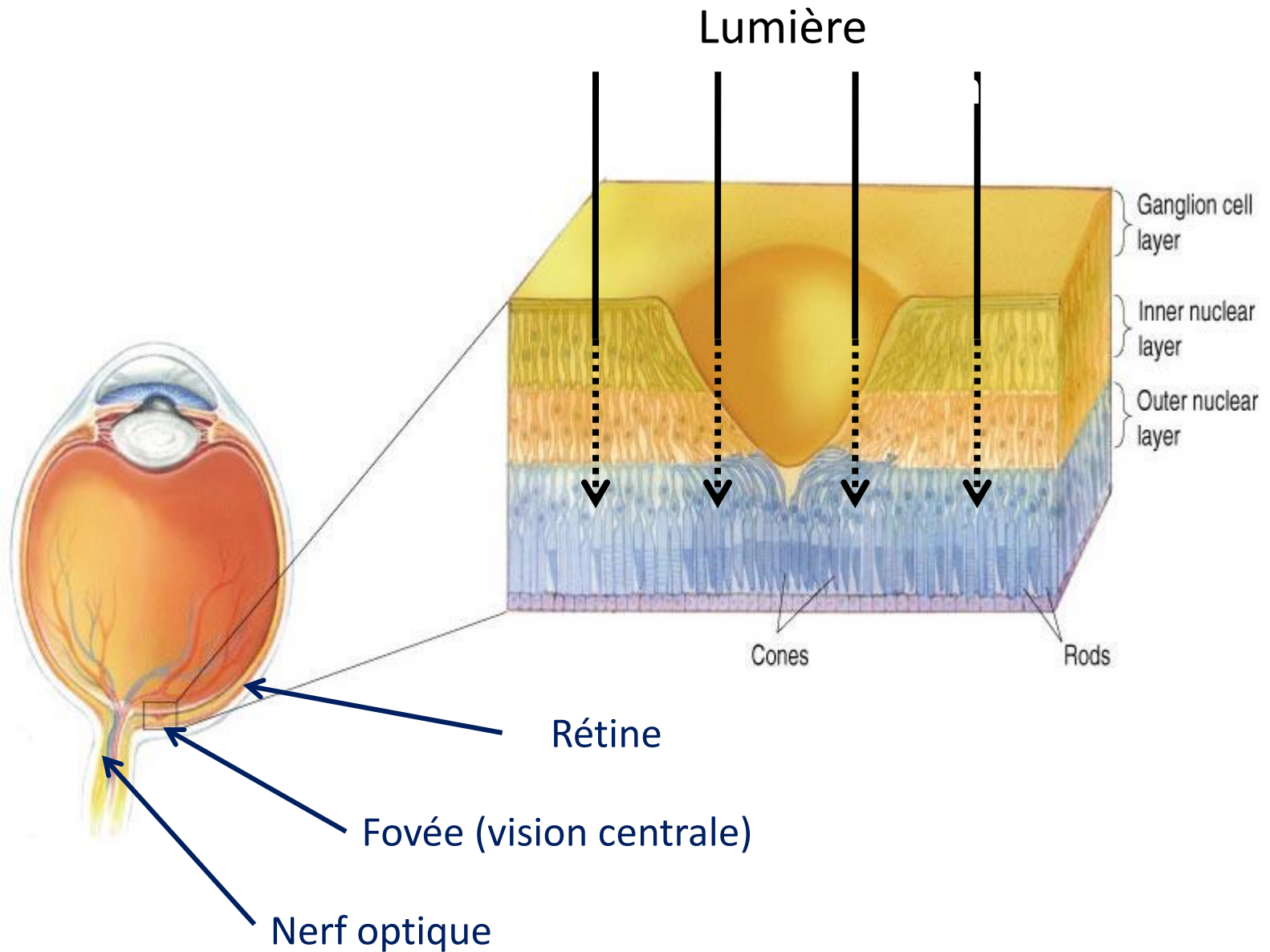


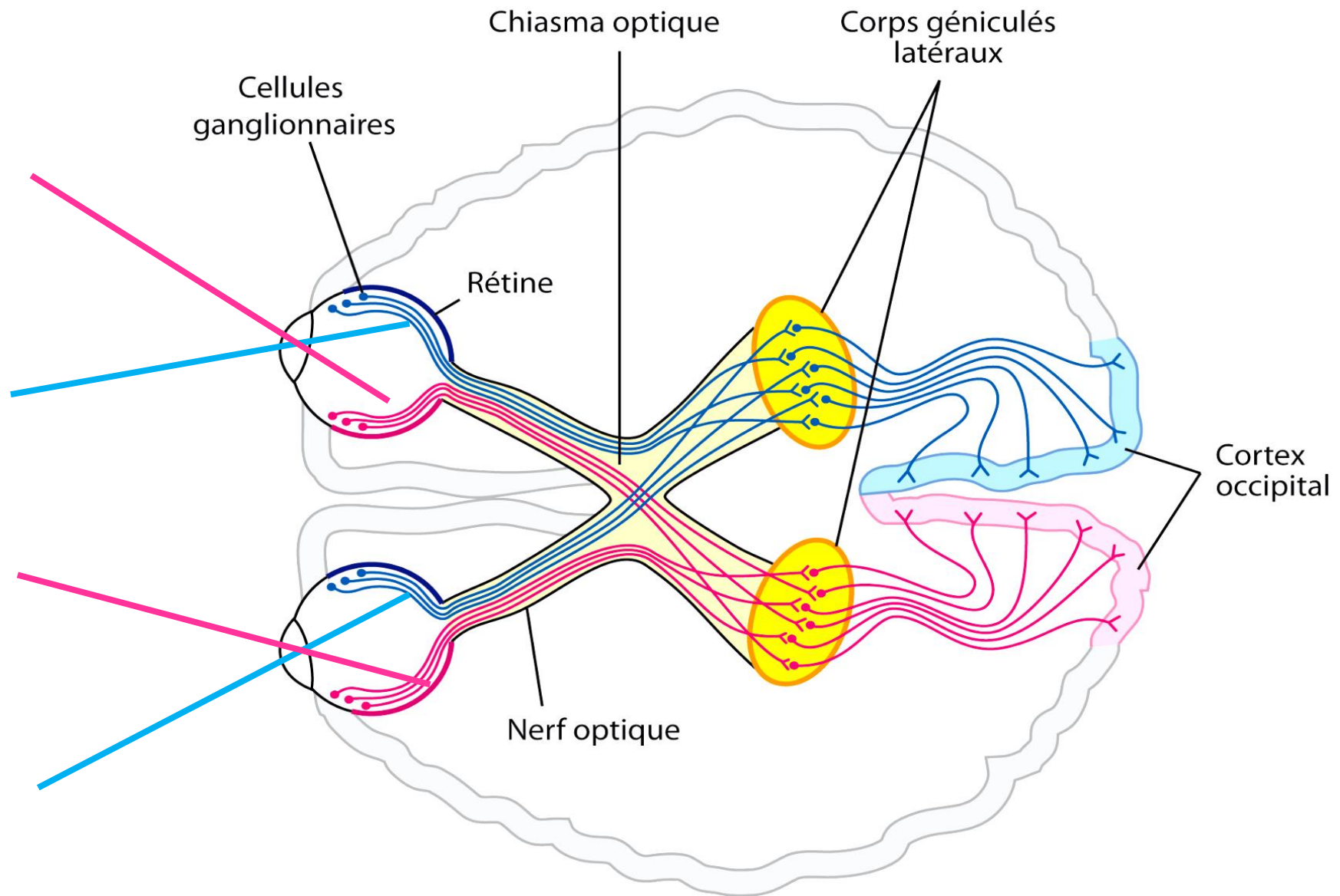
Couleurs en demi-teinte L'illusion du mélange

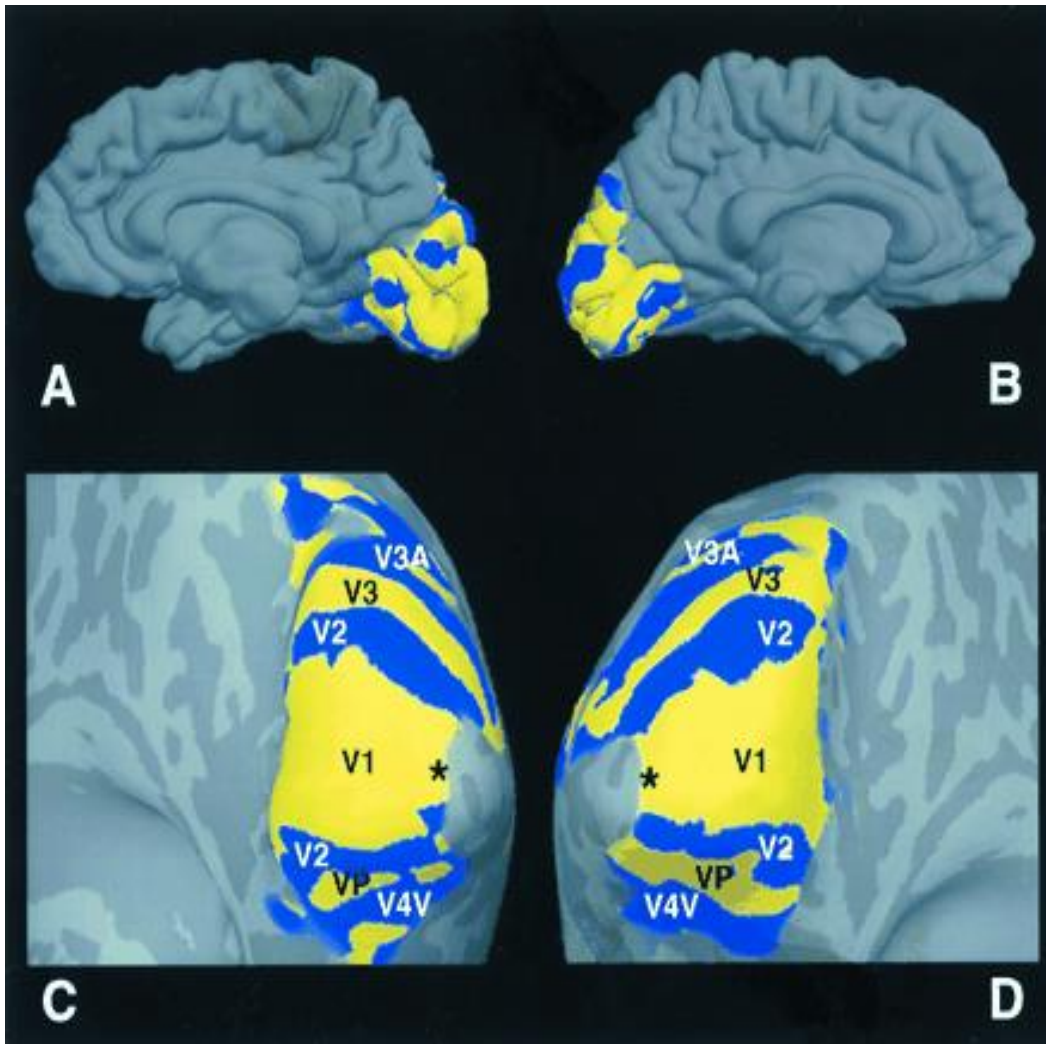




Perception







V1 : cortex visuel primaire

V2, V4, ... ***Voie du quoi***

Couleur, analyse des formes
Perception consciente

V2, V3, V5 ... ***Voie du où***

Position, taille d'objets,
mobilité...

La vision s'acquiert durant un processus d'apprentissage (premières années de la vie).

Si le processus est rompu, la personne est mal-voyante ou aveugle, même avec un système physiologique sain.

Conséquence

La vision est donc une expérience **individuelle**.

Chacun peut percevoir les couleurs différemment

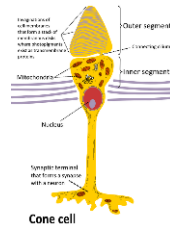
Cependant, les expériences psycho-visuelles montrent un fonctionnement étonnamment homogène pour l'ensemble de l'humanité.

Photorécepteurs : cônes et bâtonnets

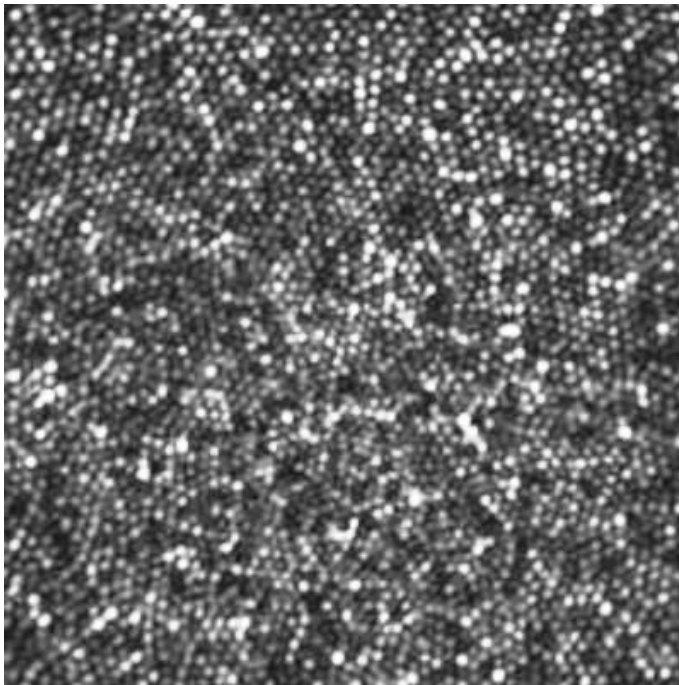
49

Une rétine normale contient deux types de cellules photosensibles

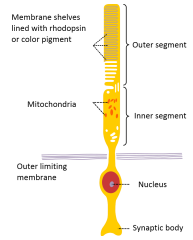
Cônes (~ 7 millions)



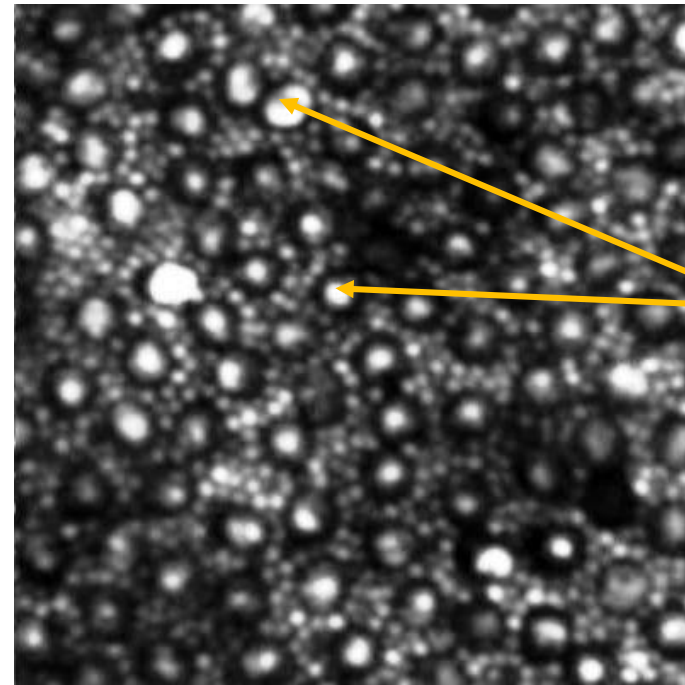
Cônes dans la fovée



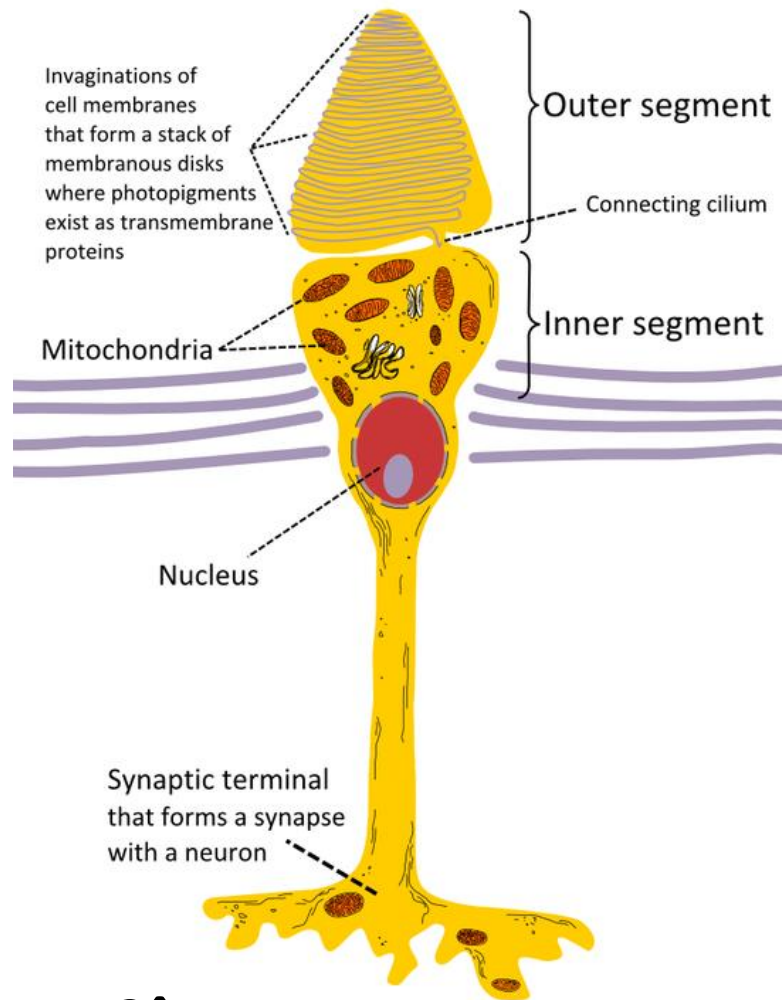
Bâtonnets (~ 100 millions)



Périphérie de la rétine



OCT + Optique adaptative (Dubra Lab at Stanford University)

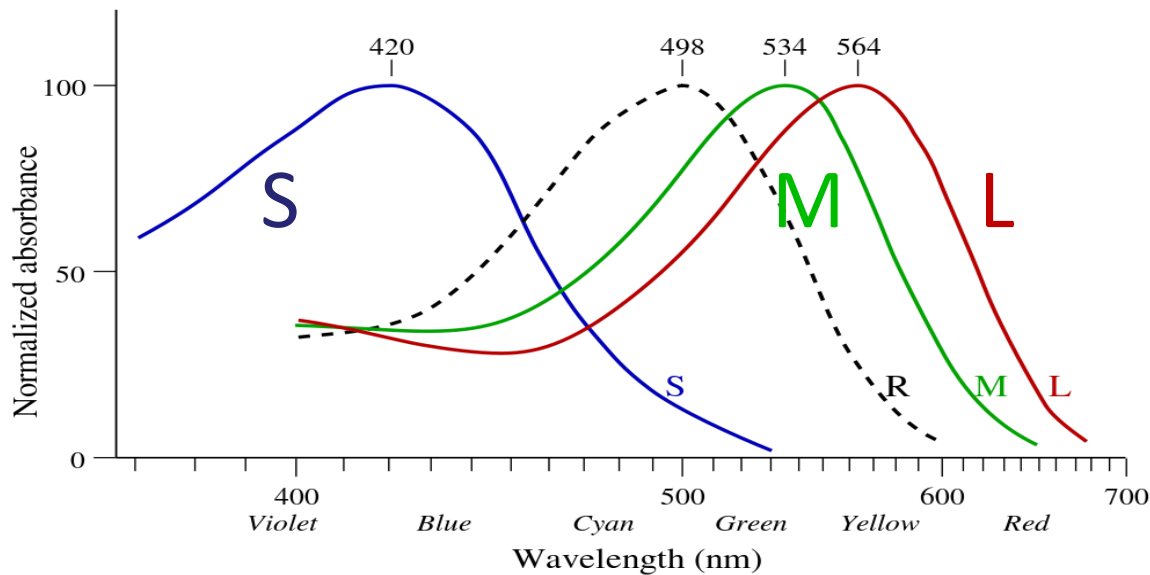


Cône

Les cônes sont responsables de la vision en couleur.

Ils participent à la **vision photopique** (ou vision de jour) : ils nécessitent une certaine quantité de lumière pour être activés.

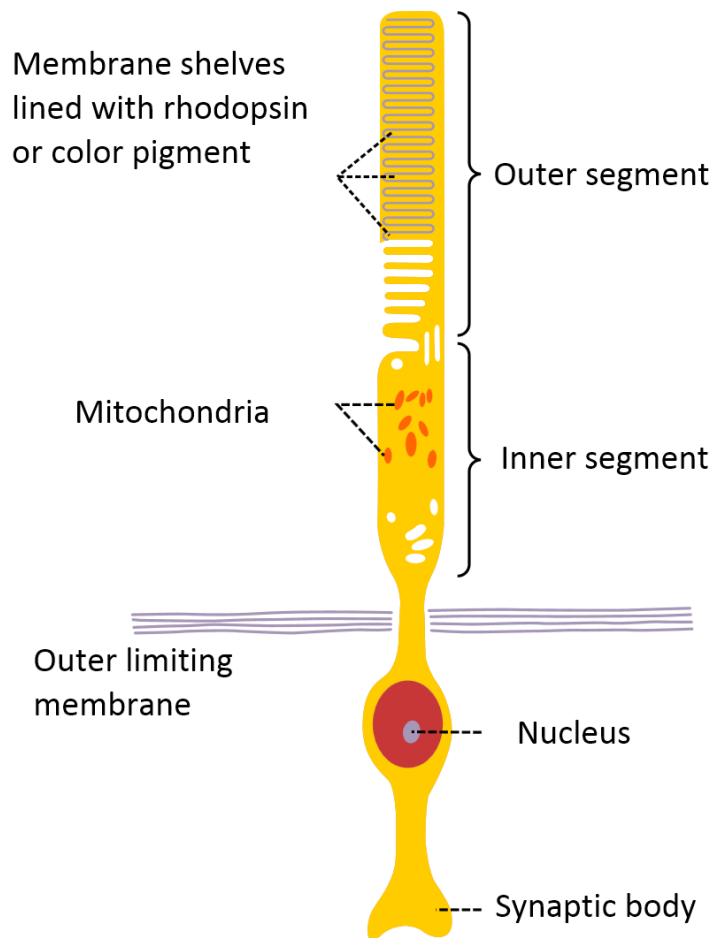
Les rétines normales possèdent **3 types de cônes (S, M et L)** avec des réponses spectrales différentes



Un humain « normal » est donc appelé **trichromate**

Le daltonisme et les autres formes de **dyschromatopsie** viennent d'anomalies dans le nombre de cônes ou dans les réponses spectrales

Bâtonnet



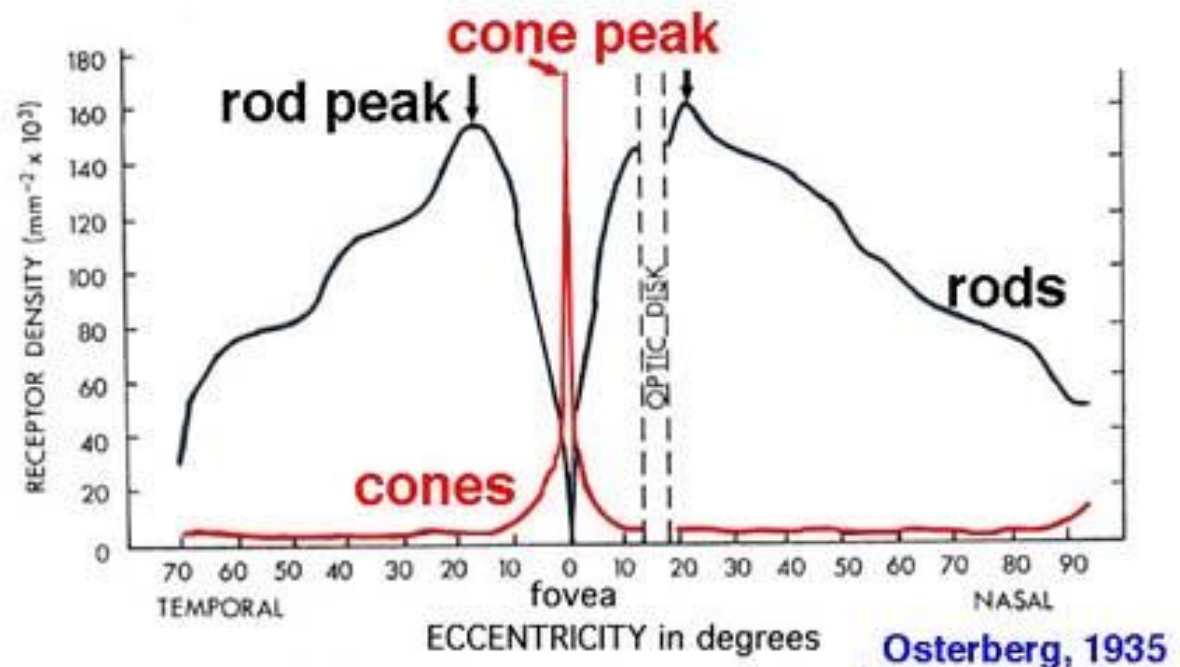
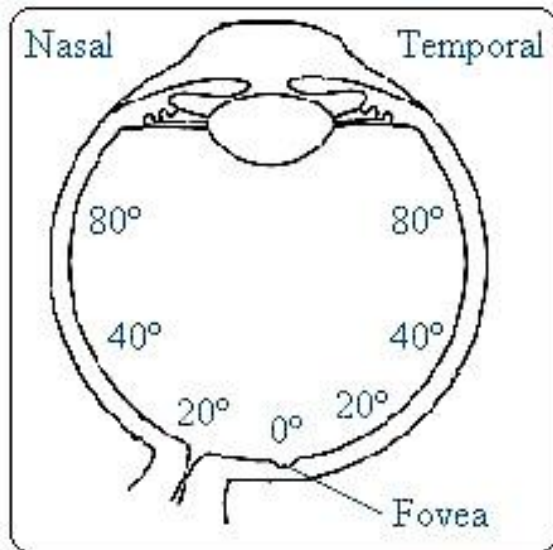
Les bâtonnets ne sont pas directement impliqués dans la vision en couleur.

Ils sont beaucoup plus sensibles que les cônes (ils peuvent répondre à un seul photon).

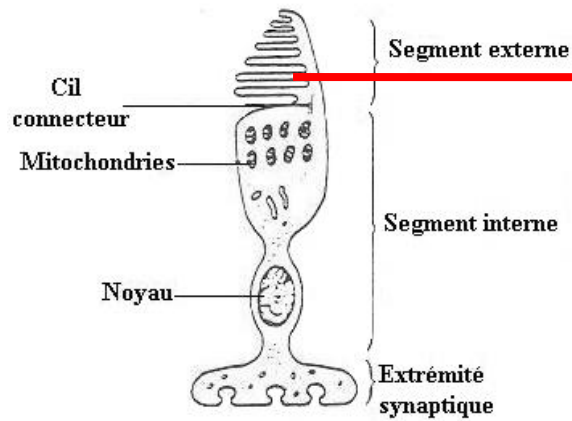
Ils sont actifs dans la **vision scotopique** (vision de nuit).

La rétine n'est pas un capteur uniforme !

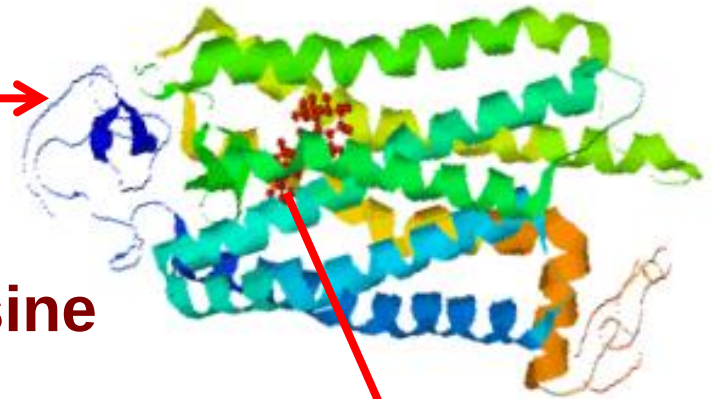
Au **centre visuel**, nous n'avons que des cônes; en **prérétinergie**, nous avons surtout des bâtonnets.



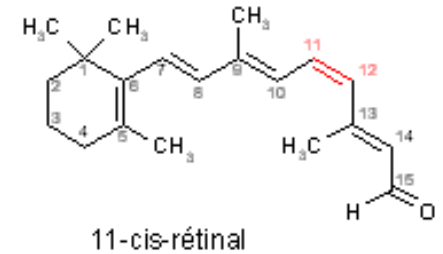
Dans l'extrême pénombre, notre vision centrale est aveugle.
The vision périphérique (>30°) ne perçoit pas les couleurs.



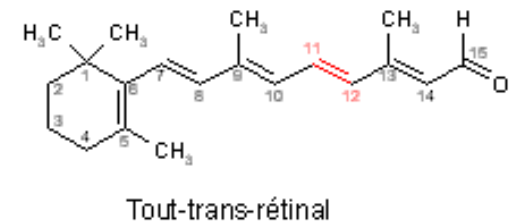
Opsine



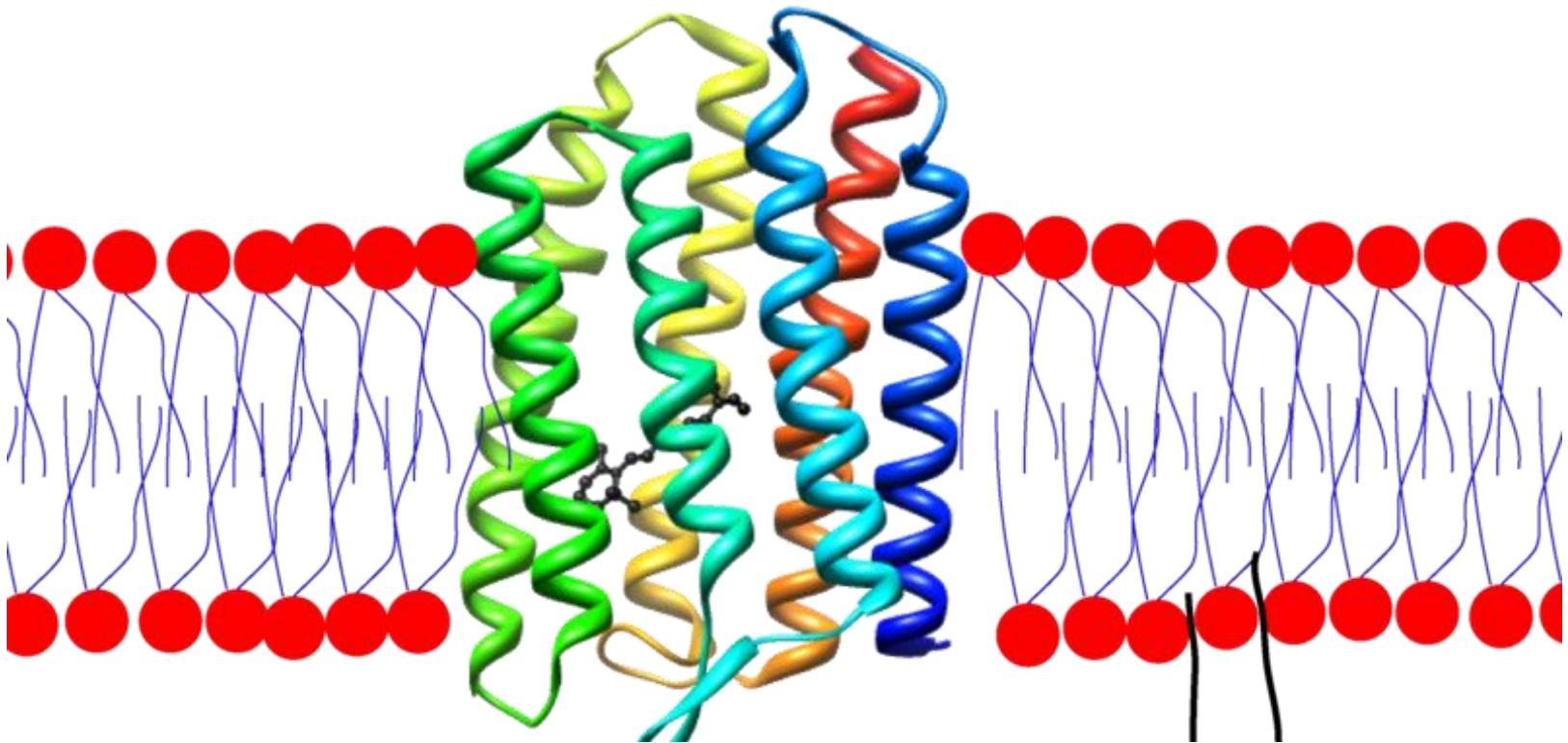
Rétinal



lumière



Les bâtonnets contiennent de la *rhodopsine*
(pourpre rétinien)

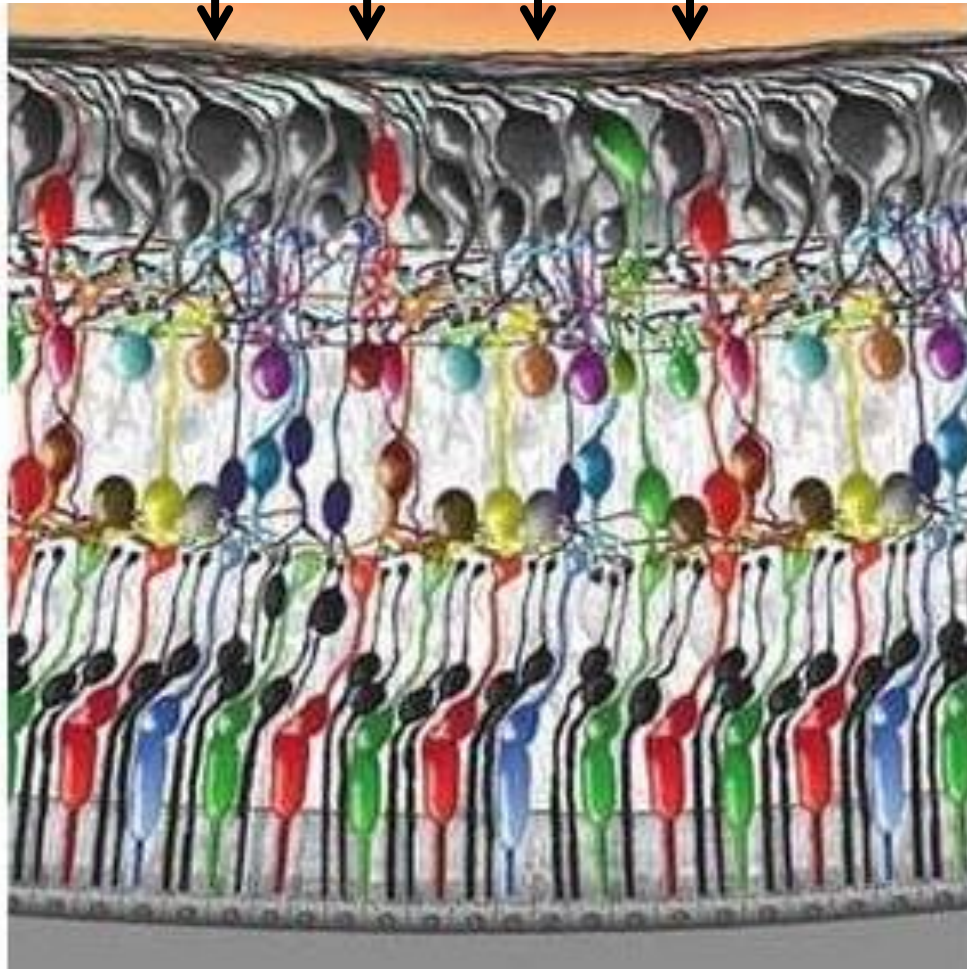


Les cônes contiennent de la *iodopsine*.

Les couches rétiniennes

56

Lumière



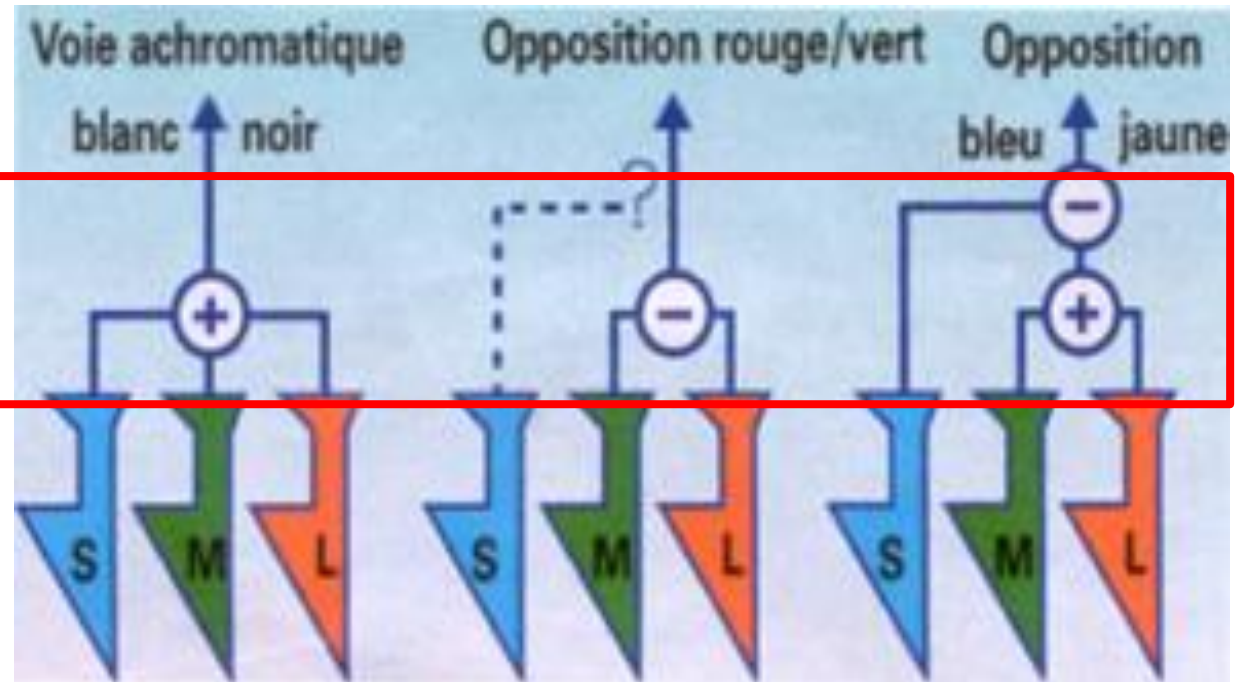
- ← Nerf optique
- ← Cellules ganglionnaires
- ← Cellules horizontales, bipolaires, amacrines
- ← Cônes et batonnets



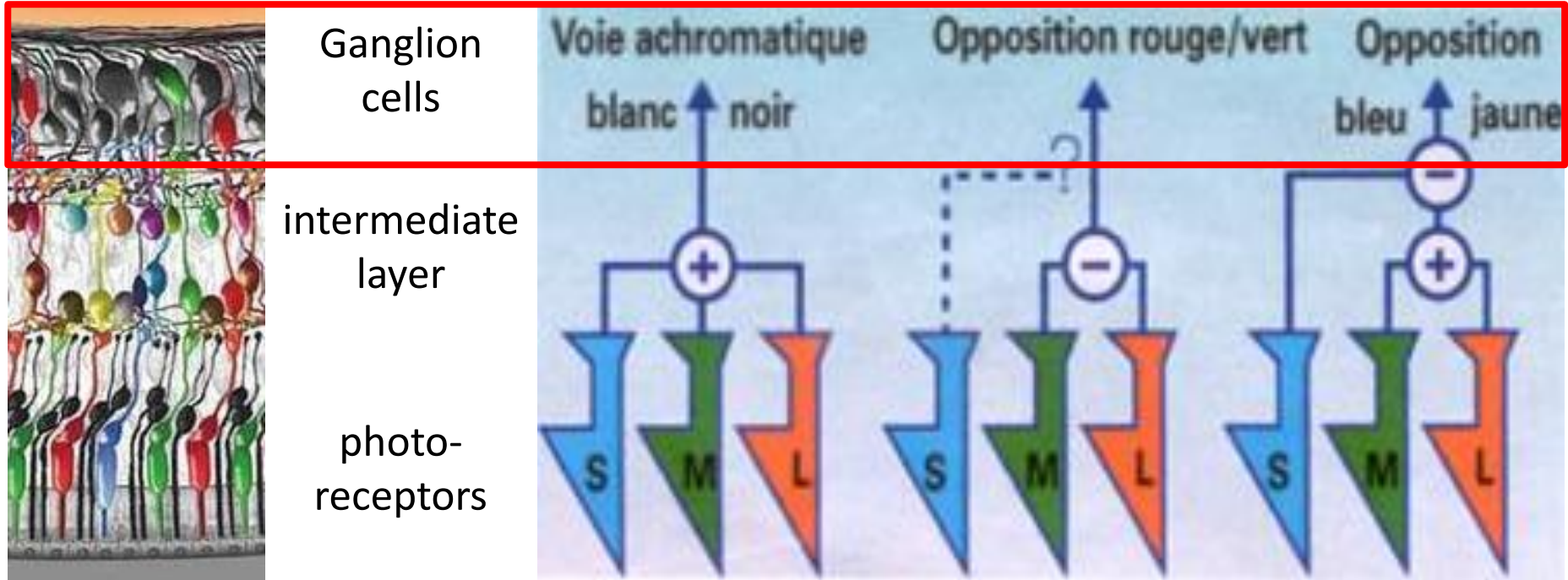
Cellules
ganglionnaires

Couche
intermédiaire

photo-récepteurs

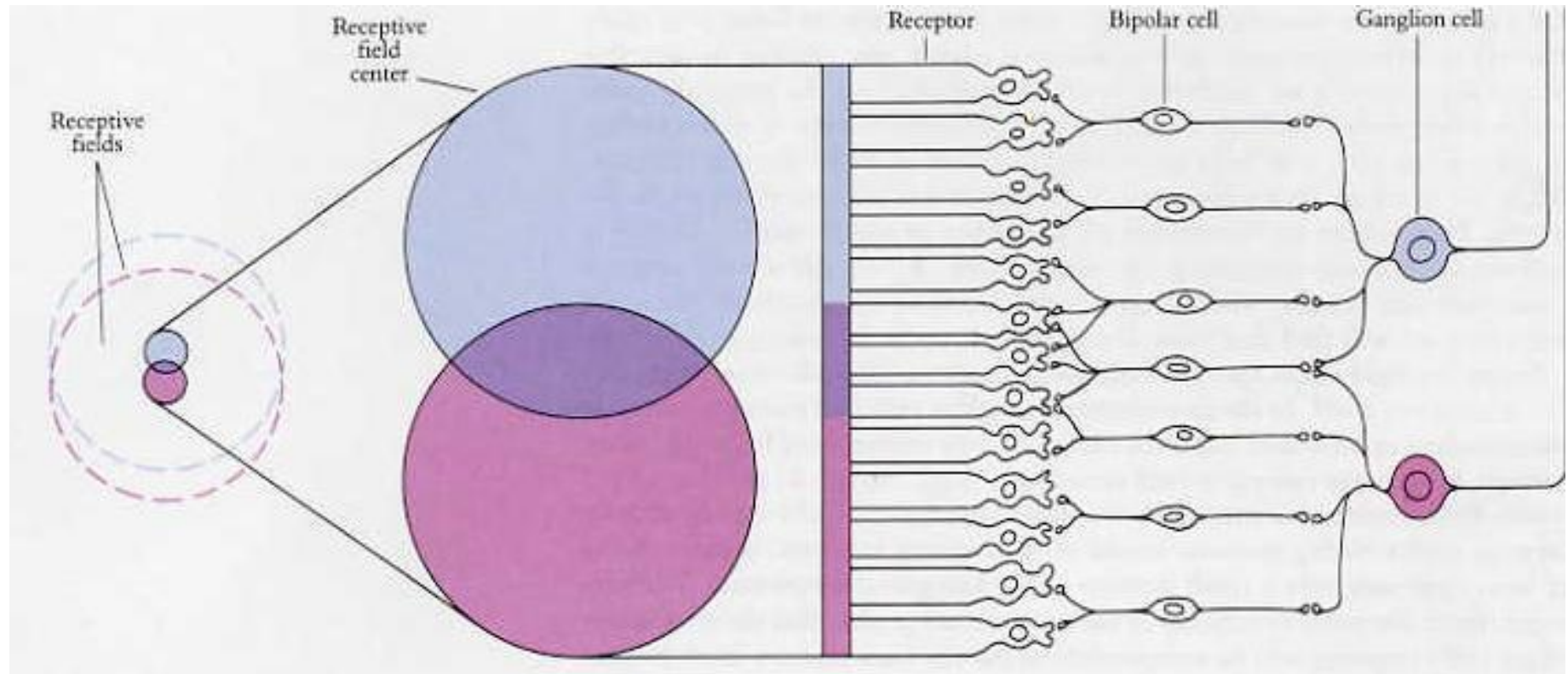


Les cellules horizontales, bipolaires et amacrines sont connectées à plusieurs photorécepteurs et effectuent des **opérations logiques**, responsables de contrastes locaux.



La couche externe de la rétine contient des **cellules ganglionnaires** dont les axones forment le nerf optique et transmettent des signaux modulés en fréquence.

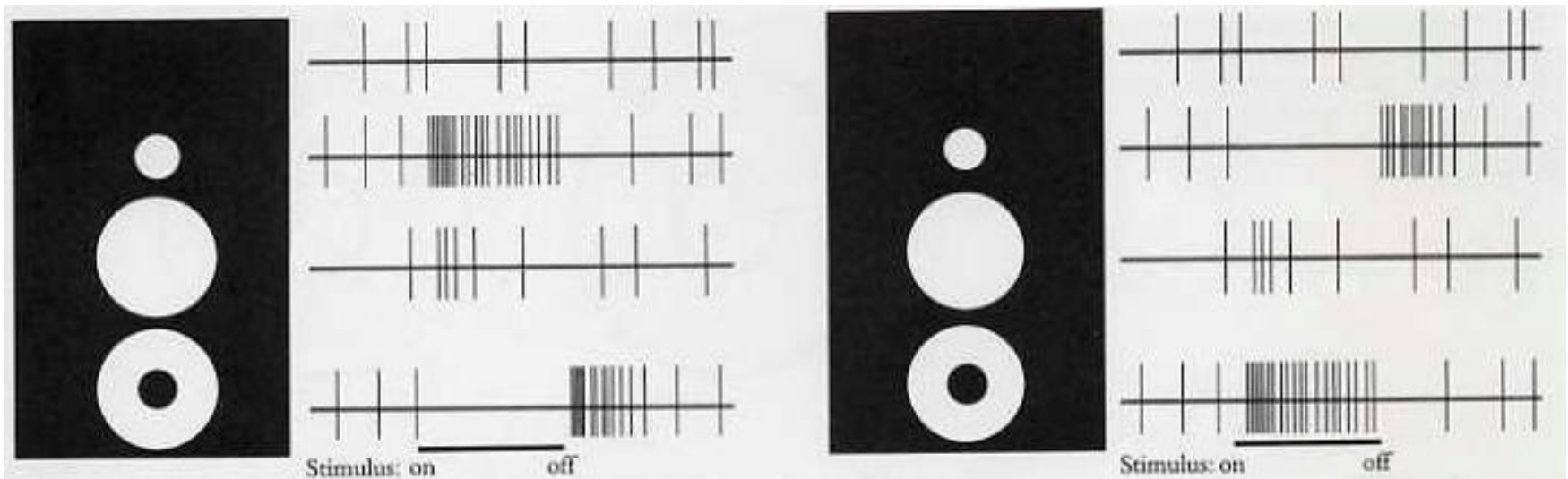
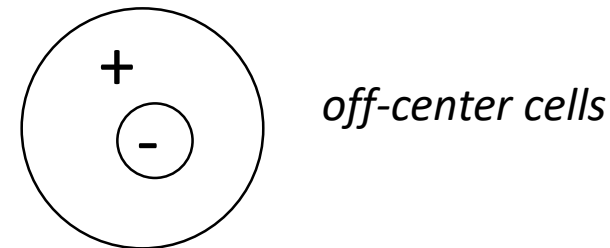
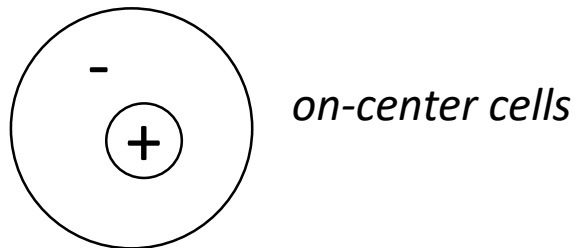
NB : certaines cellules ganglionnaires contenant de la mélanopsine sont également photosensibles. Leur connexion à des zones spécifiques du cerveau serait responsable des rythmes circadiens et du réflexe pupillaire à la lumière.



Une cellule ganglionnaire est indirectement connectée à plusieurs photorécepteurs (~1 dans la zone centrale, ~1000 dans la zone périphérique).

La zone associée à une cellule est appelée **champ récepteur**.

La réponse électrique d'une cellule β -ganglionnaire est opposée lorsque la lumière est reçue **au centre** de son champ perceptif ou **à sa périphérie**.



Réponse temporelle des cellules centrales (à gauche) et des cellules excentrées (à droite) d'un chat.

1) Seules les variations spatiales du signal lumineux dans le champ visuel sont notifiées au cerveau.



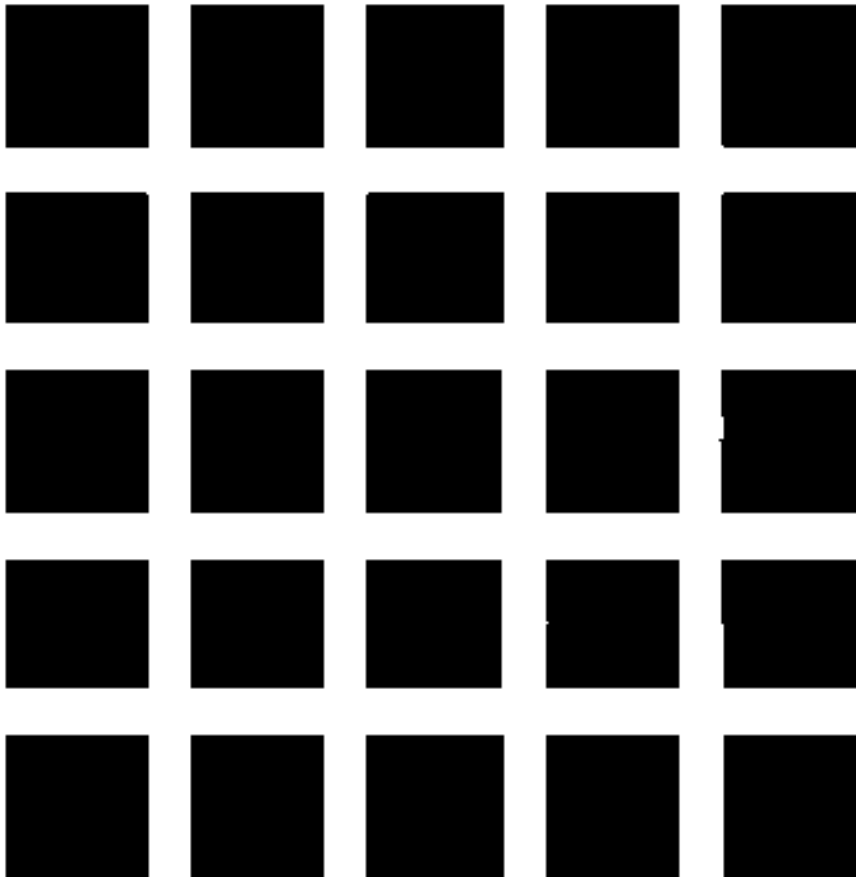
(seuls les contours de ce rectangle sont notifiés).

2) Le contraste au niveau des contours peut être amplifié (phénomène appelé inhibition latérale).



Bandes de Mach

2) Le contraste au niveau des contours peut être amplifié (phénomène appelé inhibition latérale).

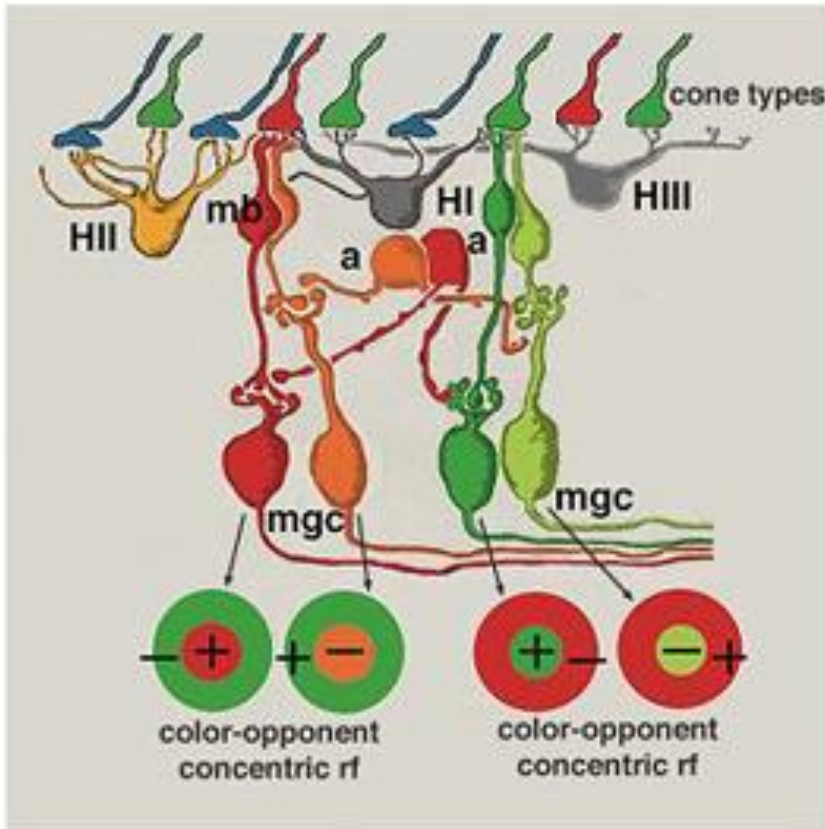


Grille d'Hermann (1870)

64

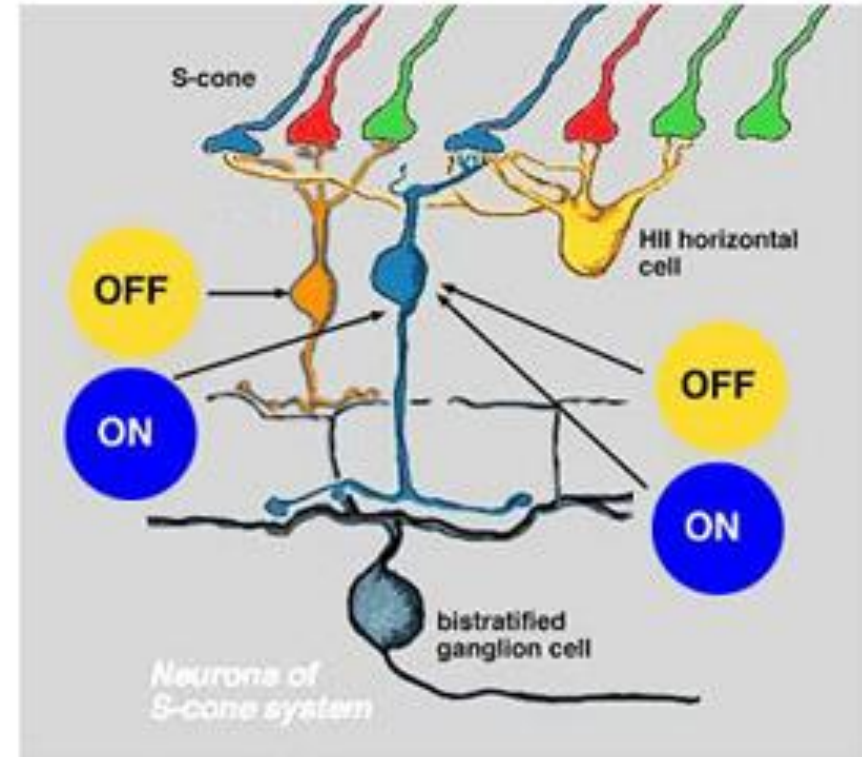
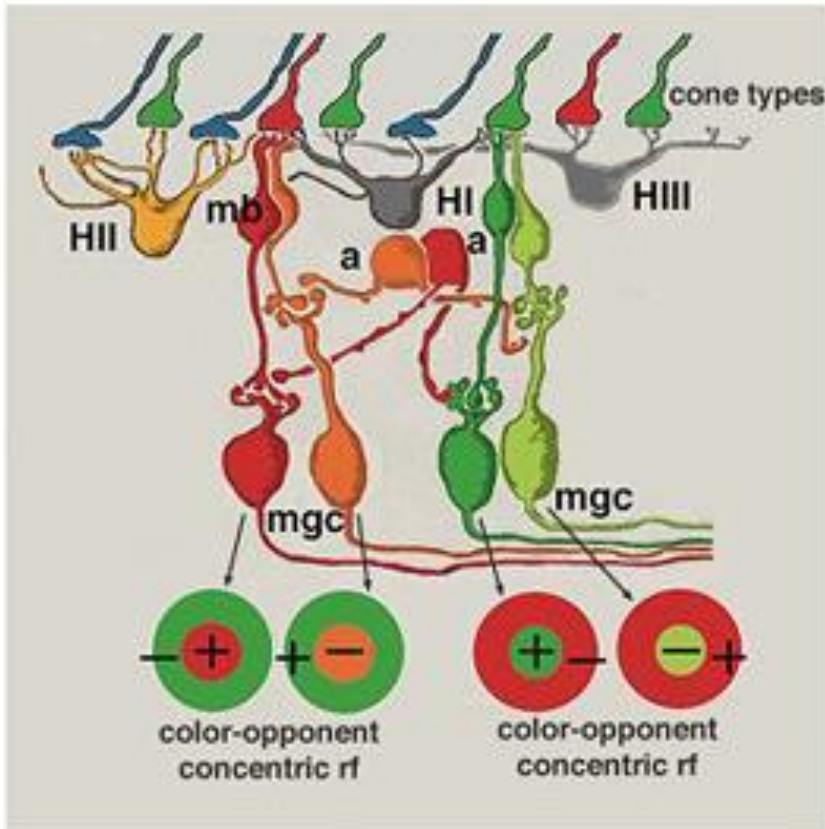
South

64



Certaines cellules ganglionnaires sont connectées aux cônes rouges (centre du champ perceptif) et aux cônes verts (périphérie), ou inversement

→ **opposition rouge-vert**



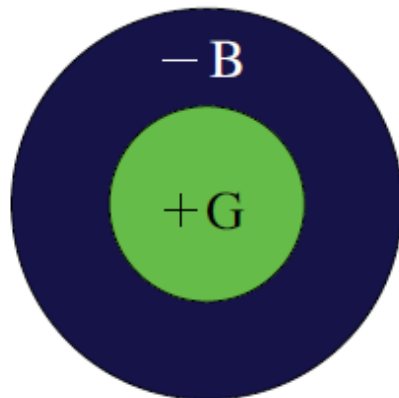
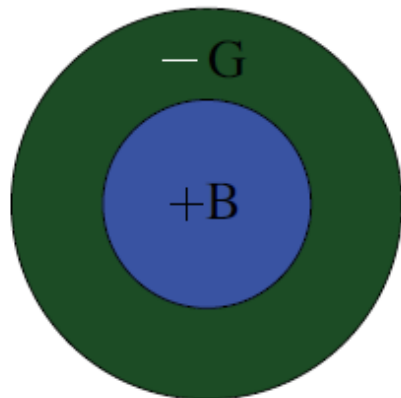
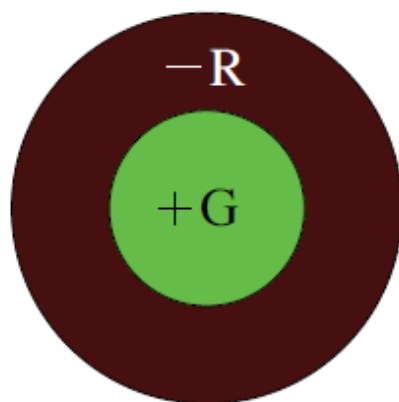
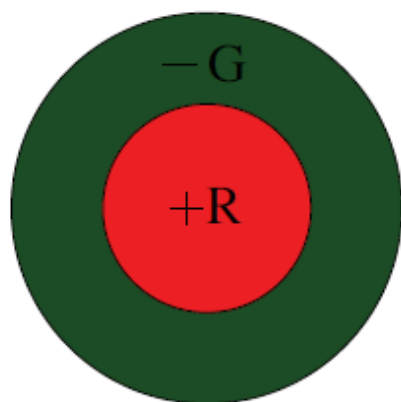
D'autres cellules ganglionnaires sont connectées aux cônes rouges et verts (centre) et aux cônes bleus (périphérie), ou inversement

→ **opposition jaune-bleu**

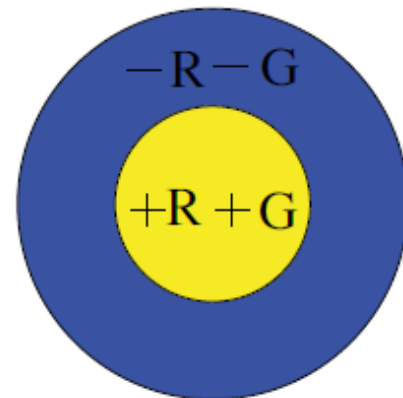
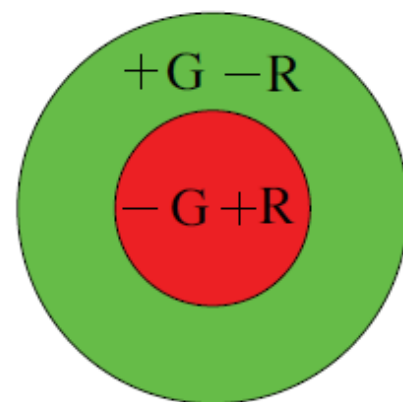
Oppositions rouge-vert et bleu-jaune

67

Single Opponent Cells

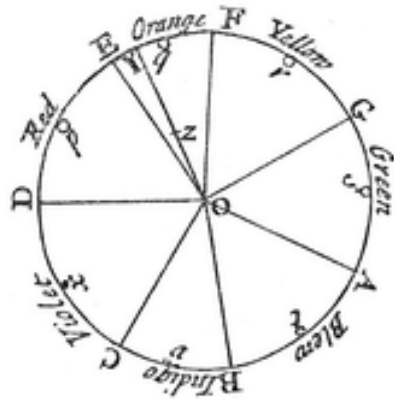


Double Opponent Cells



Les cercles chromatiques

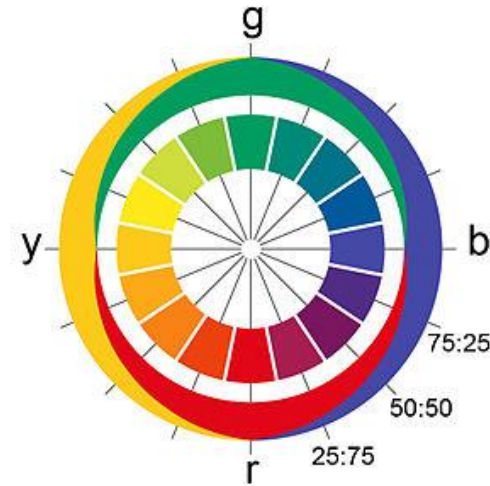
68



Newton, 1704



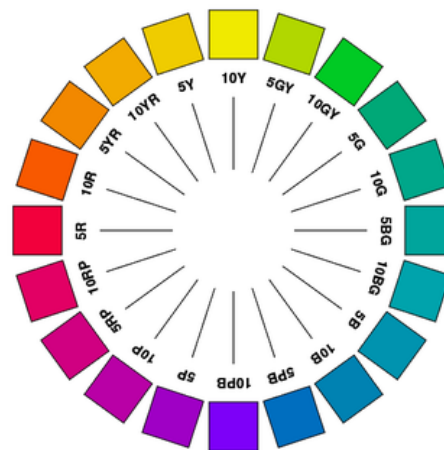
Goethe, 1810



Hering, ~1850



Chevreul, 1861



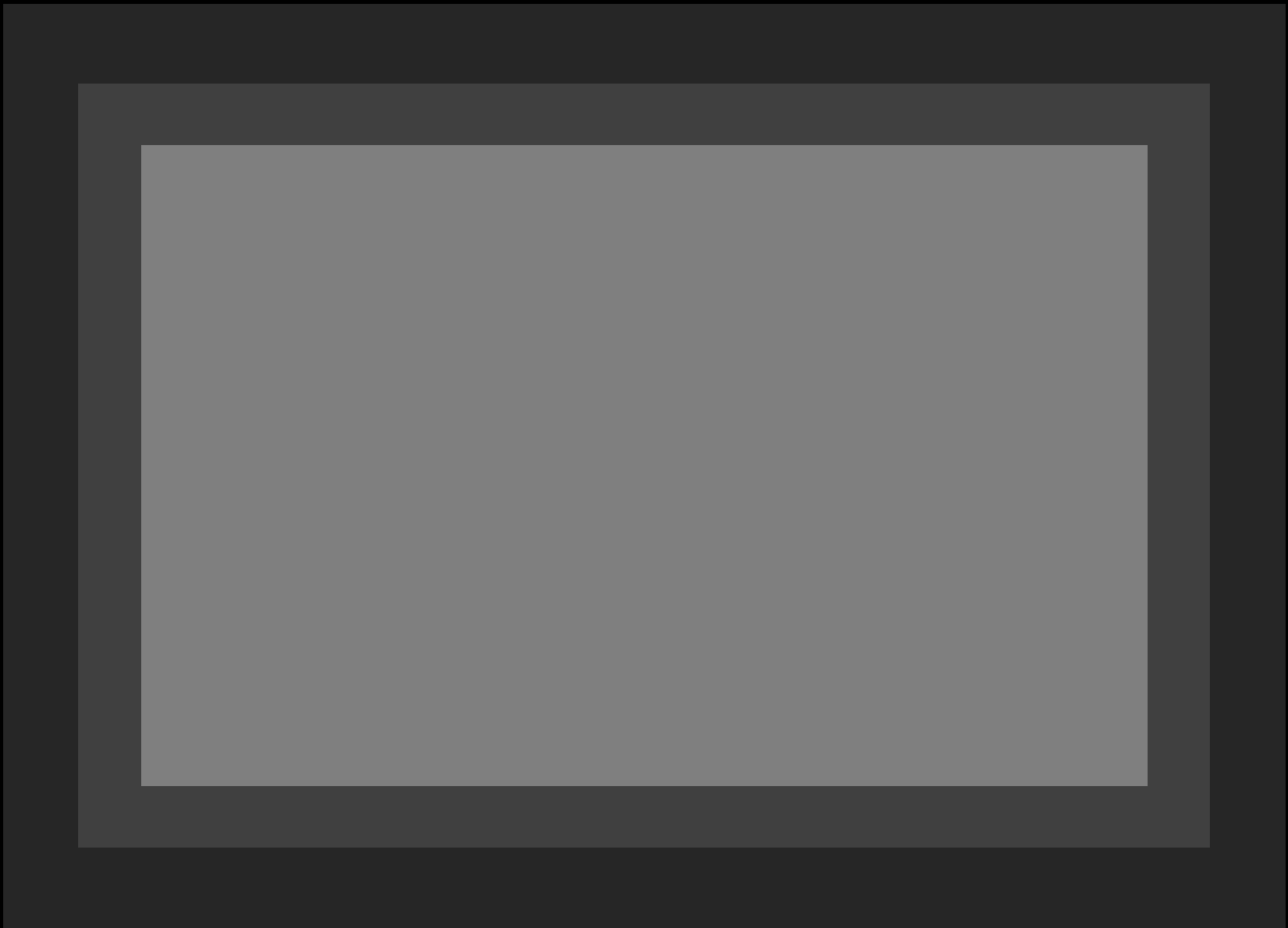
Munsell, ~1900



Itten, 1961

La vision s'adapte toujours à la luminosité du champ visuel.

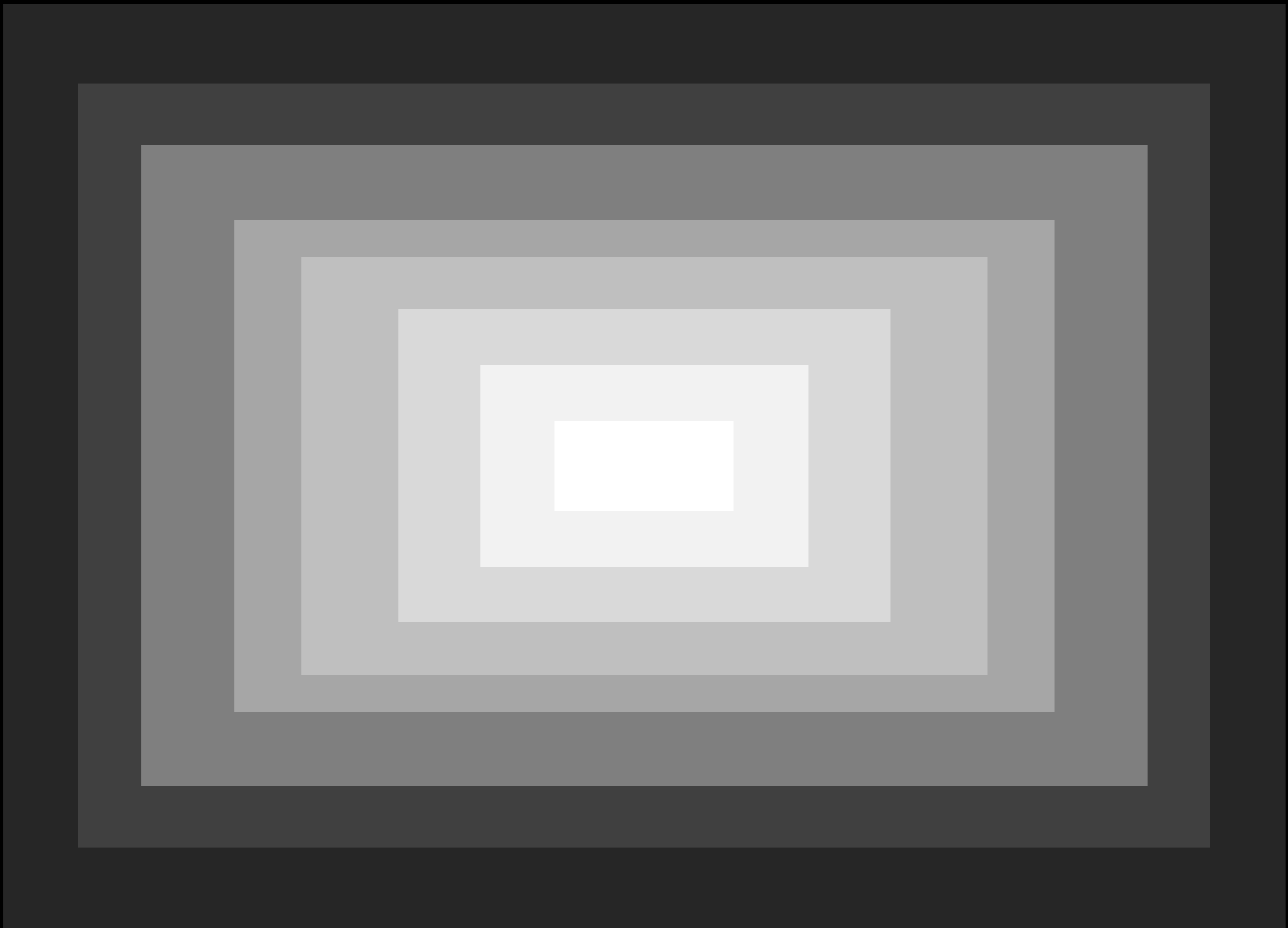
→ la partie la plus lumineuse du champ visuel paraît **blanche**.











Le « point blanc » est défini en temps réel par le cerveau, et toutes les autres couleurs sont perçues en fonction. Ce phénomène est appelé **adaptation chromatique**.

*Image prise par
un capteur optique
(sans balance des blancs)*

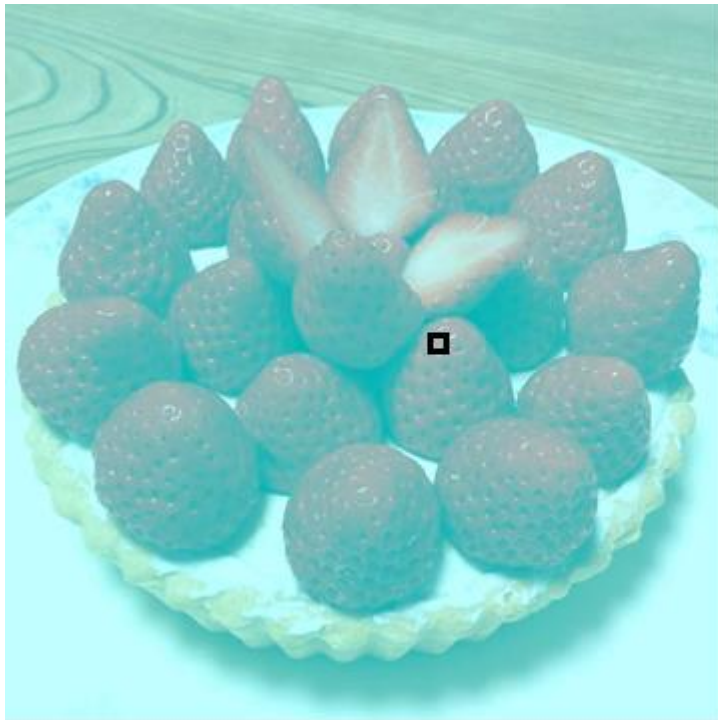


*Image vue par
un humain (grâce à
l'adaptation chromatique)*



► Fairchild, *Color Appearance models*

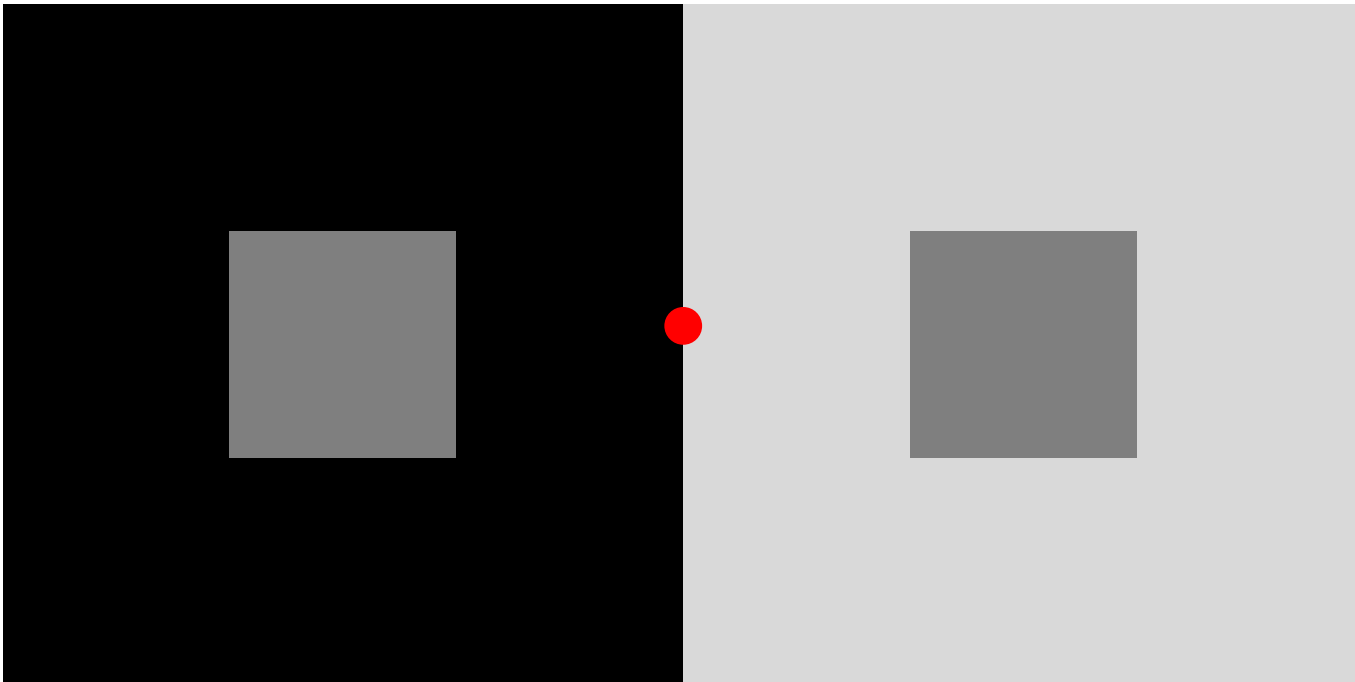
La **constance des couleurs** (*découverte par Ewald Hering*) est la capacité de la vision humaine à reconnaître aux objets une couleur stable dans des conditions d'éclairement variées.



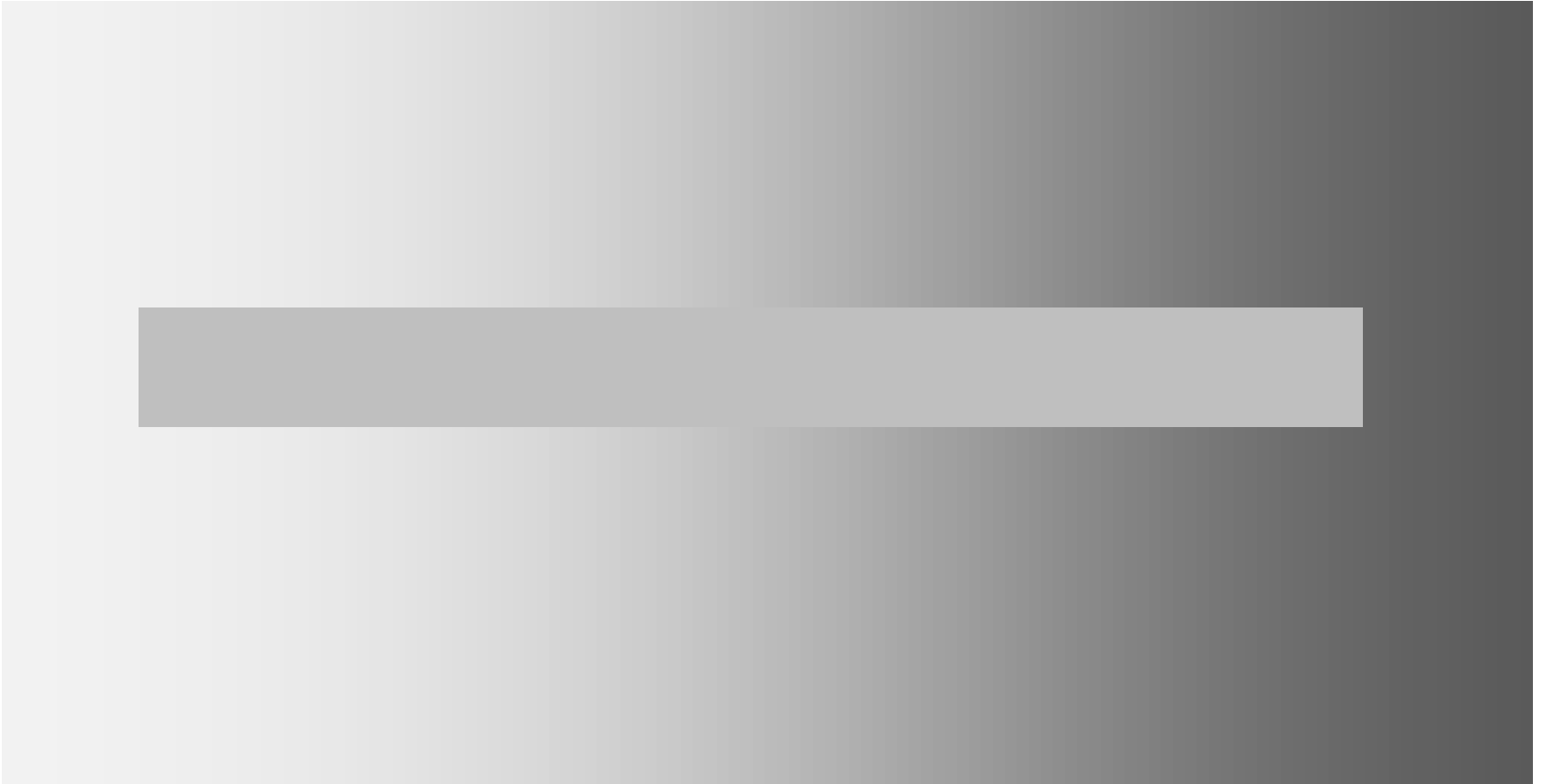


Découvert par Michel-Eugène Chevreul (1839)

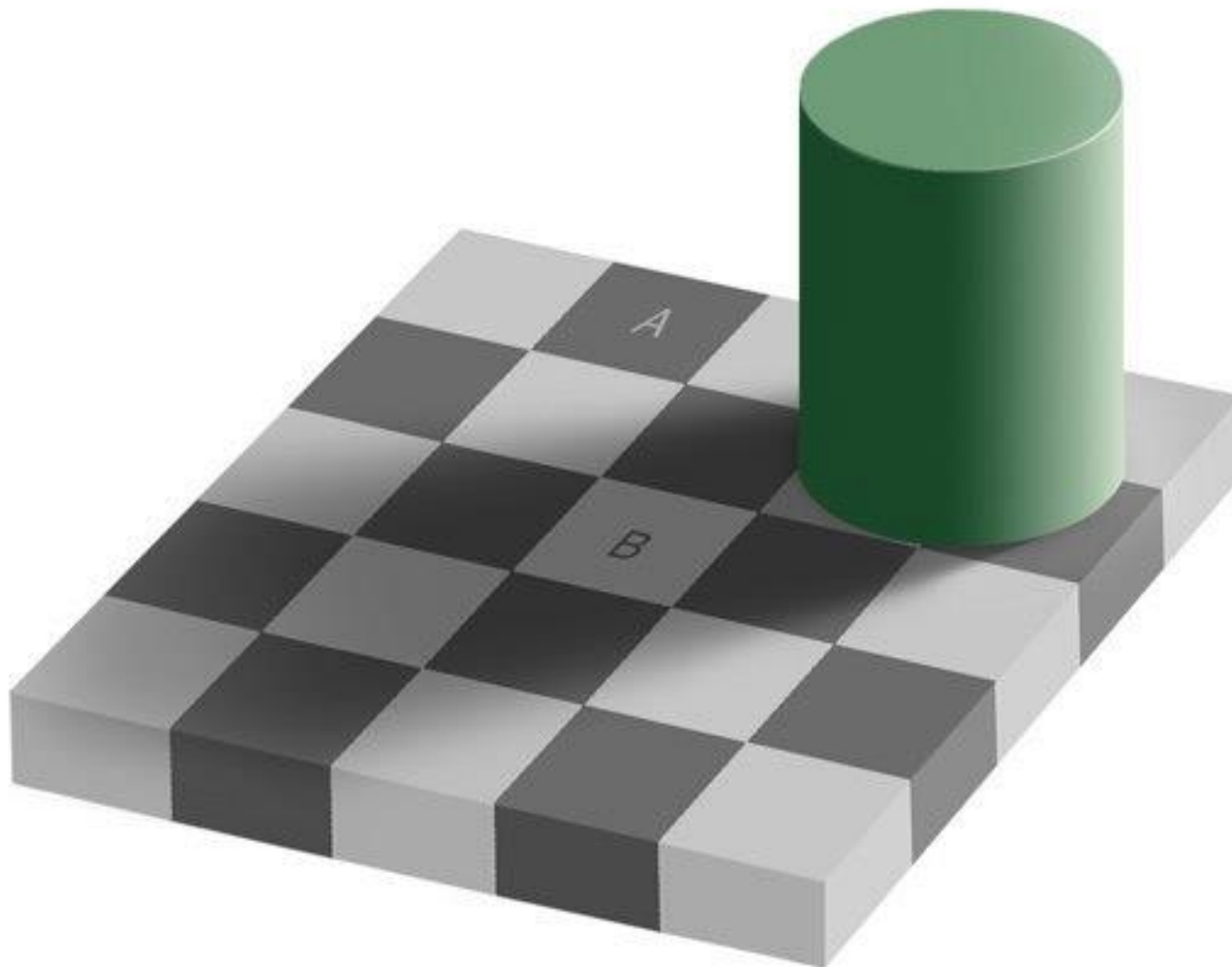
Des éléments d'image physiquement identiques peuvent avoir des apparences différentes sur **des fonds différents.**



en clarté



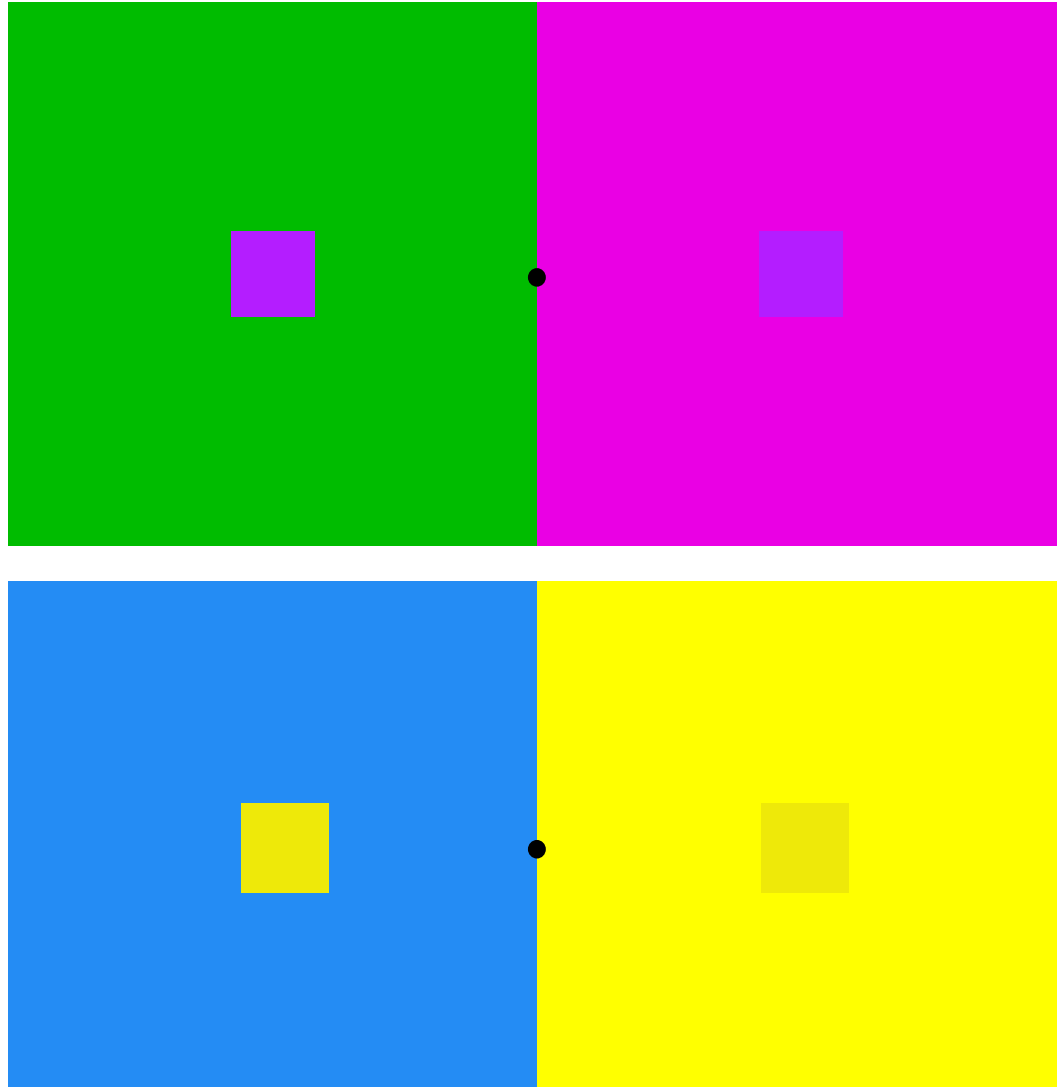
en clarté

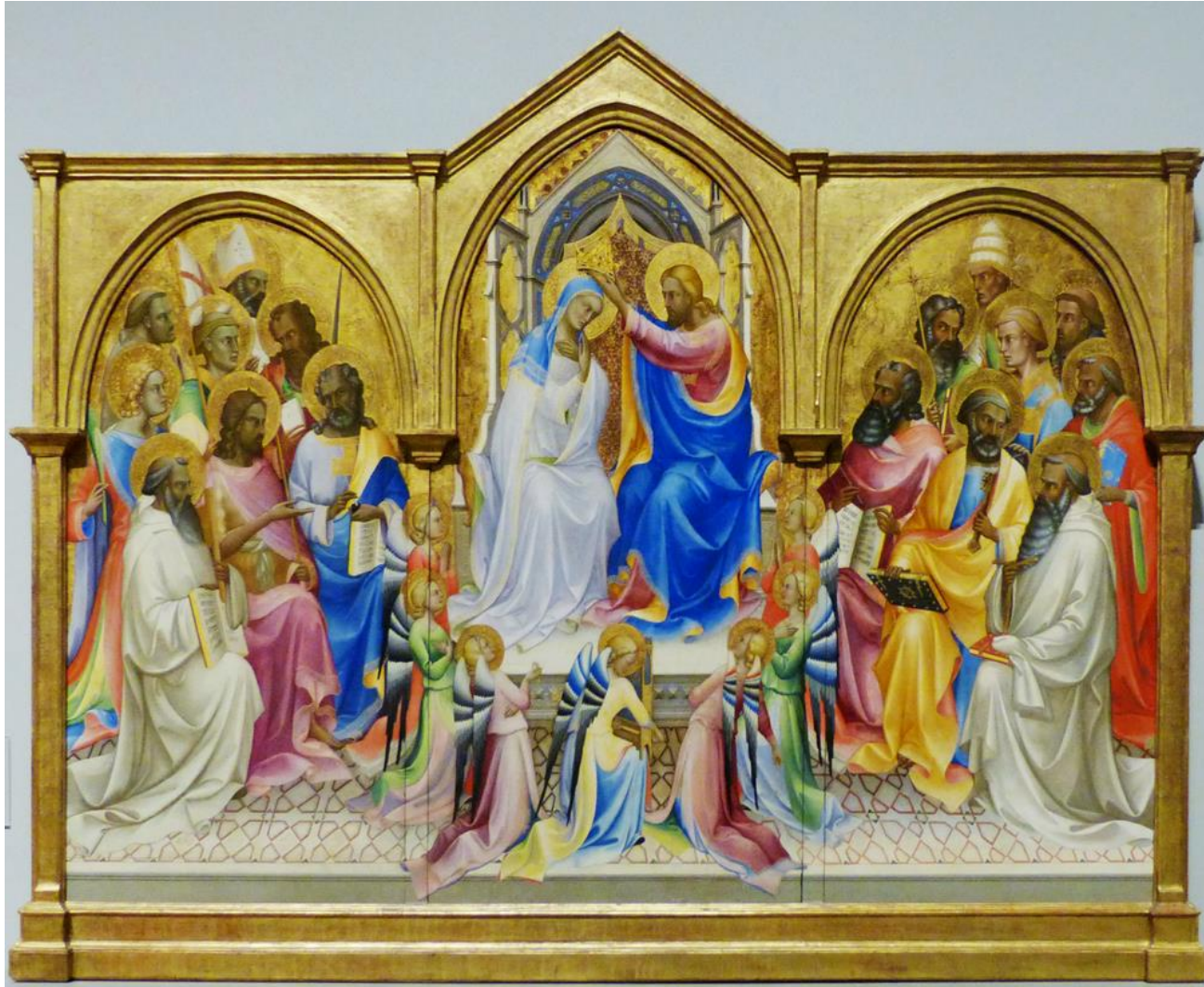


en clarté



en couleur





Lorenzo Monaco
*Le couronnement de
la Vierge avec saints.*
~1414.

Tempera à l'oeuf sur
peuplier,
182 x 105 cm (gauche),
217 x 115 cm (centre),
179 x 102 cm (droit).
Londres, National Gallery

Contraste simultané en peinture

87



Lorenzo Lotto

L'adoration de l'Enfant Jésus

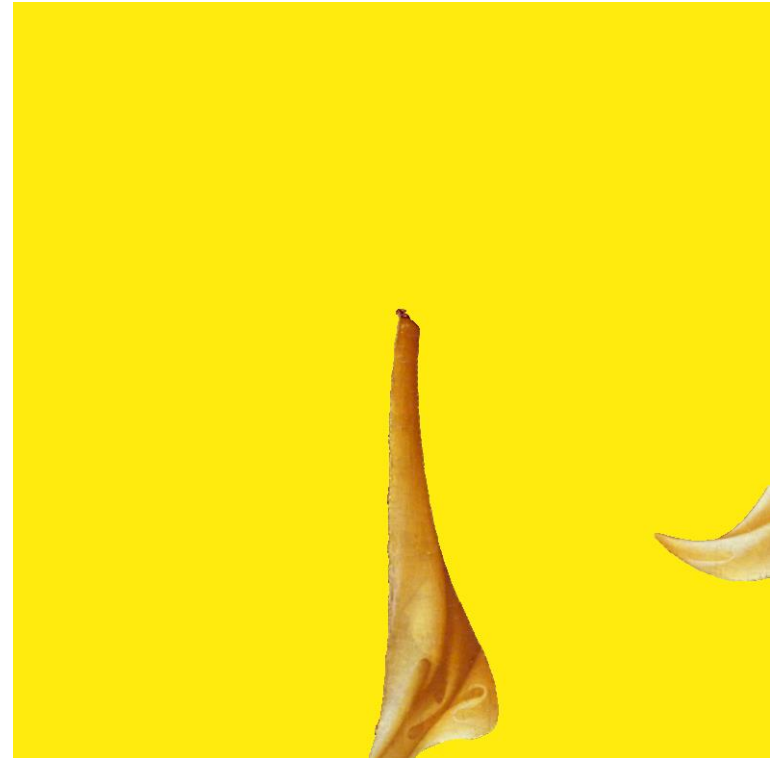
Musée du Louvre



Michelange
Plafond de la
Chapelle Sixtine
à Rome

Michelange
Annunciation





Contraste simultané en peinture

90

Vincent Van Gogh



Contraste simultané en peinture

91



Contraste en mémoire

92



Contraste en mémoire



Contraste en mémoire

94



Contraste en mémoire



Contraste en mémoire



Contraste en mémoire

97



Une description universelle des couleurs

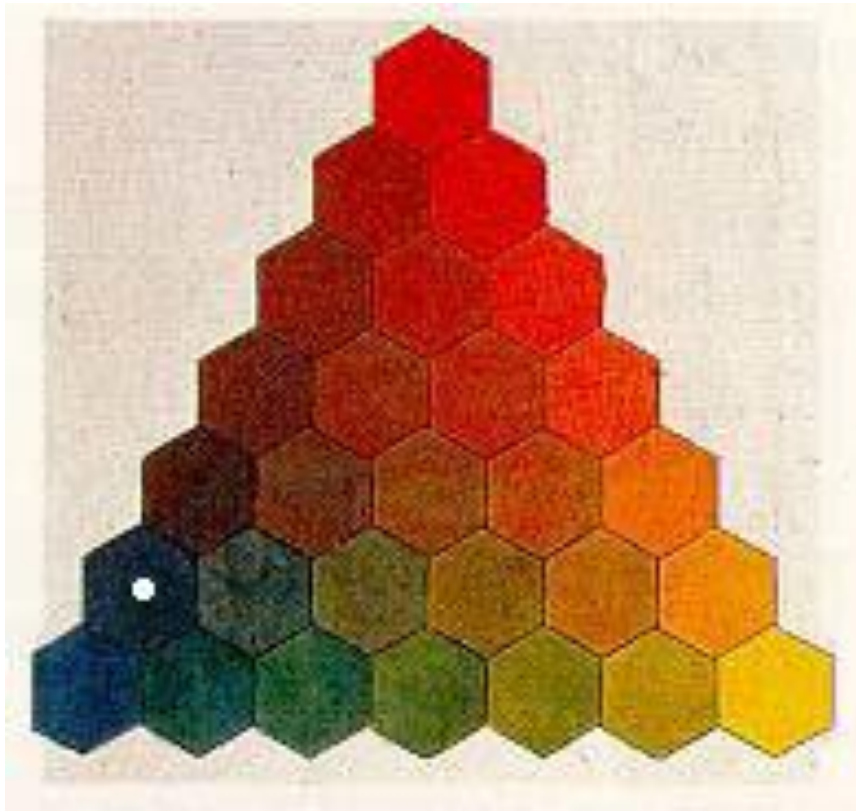




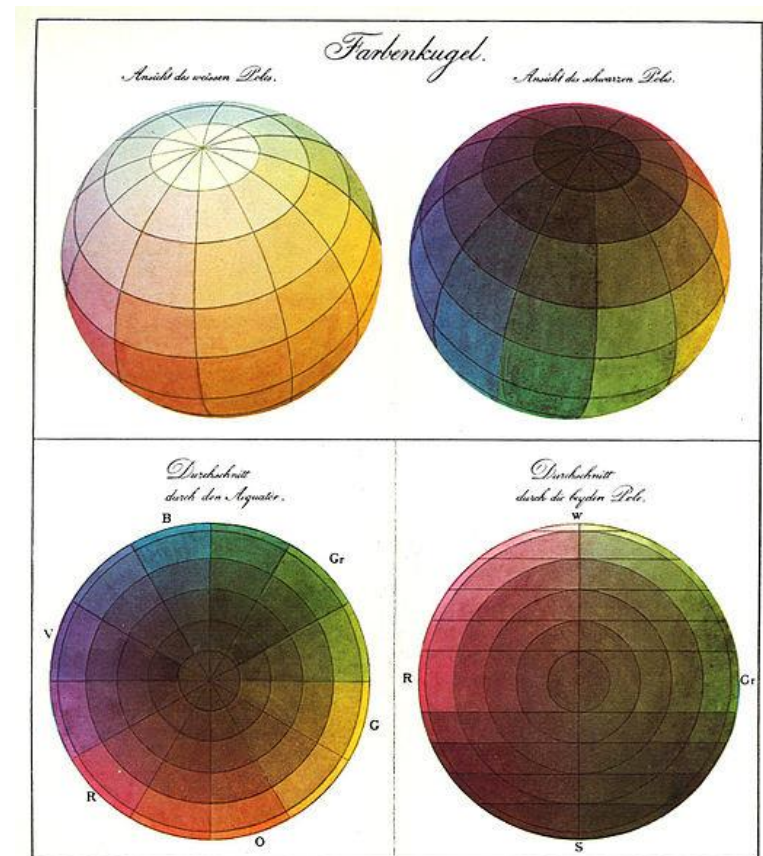
...est-elle possible ?

Trois paramètres pour décrire la couleur 100

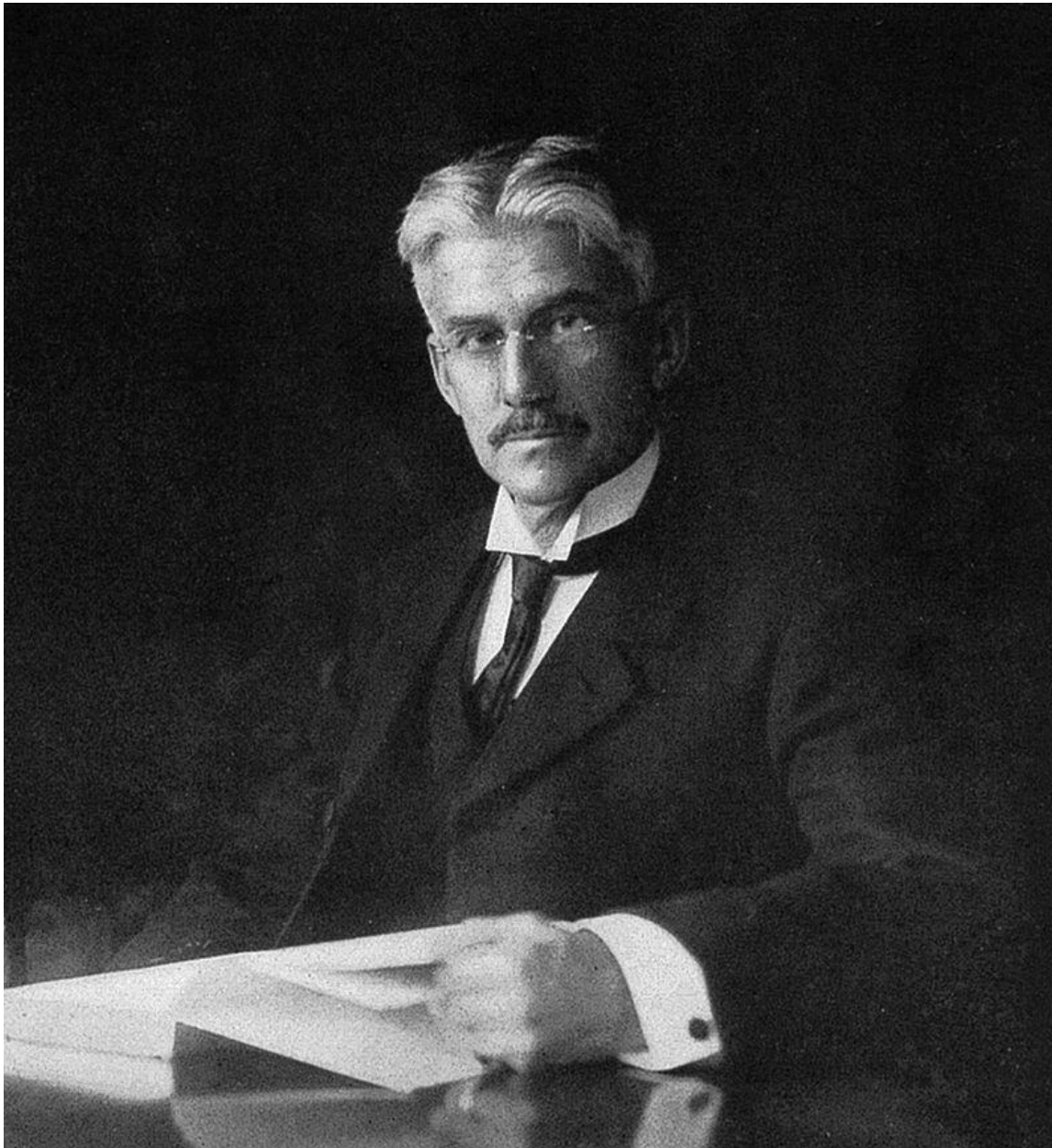
La **trichromie** du système visuel humain (normal) implique que **3 paramètres sont nécessaires et suffisants** pour classer les couleurs.



Tobias Mayer, 1758



Runge, 1810



Créé en 1905, puis modifié depuis 1976. Encore largement utilisé dans l'industrie graphique et le design.

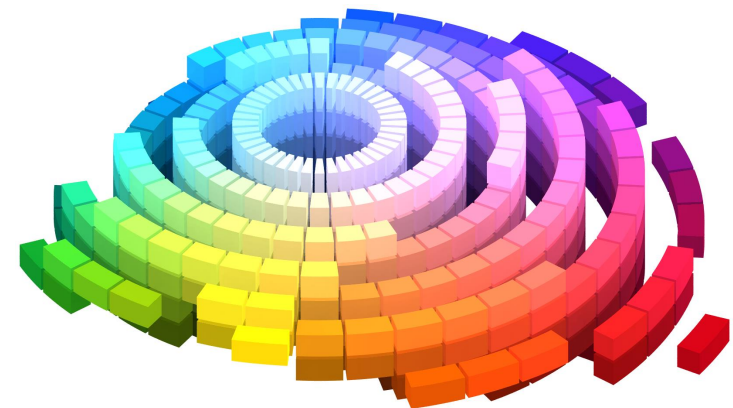
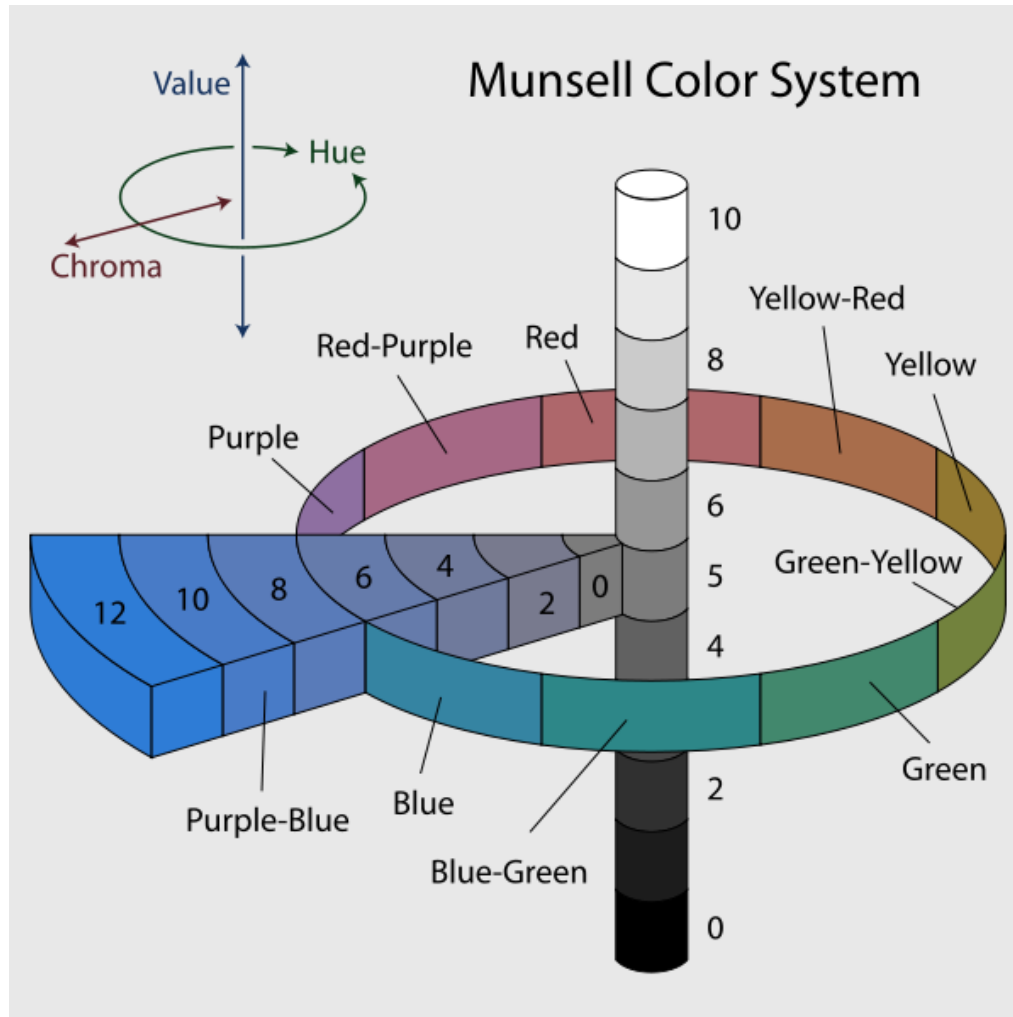
Classification des couleurs en termes de **teinte**, de **chroma** et de **valeur** (clarté)

Albert Henry Munsell

Le système Munsell

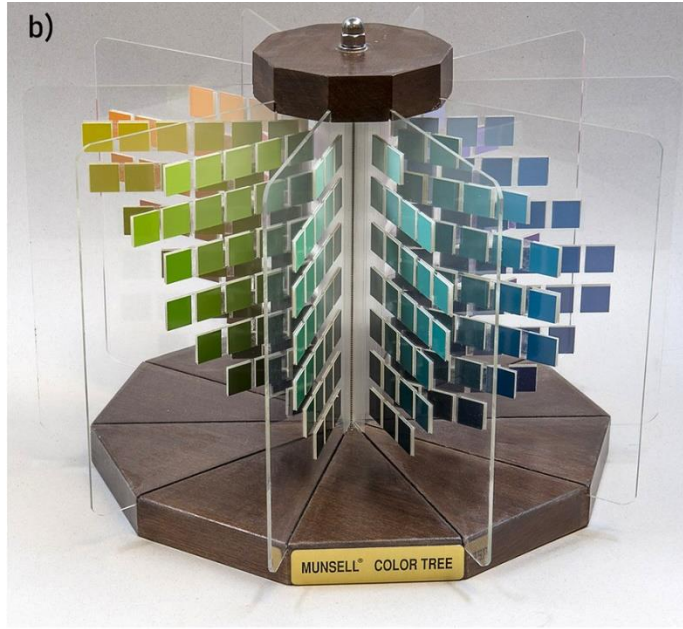
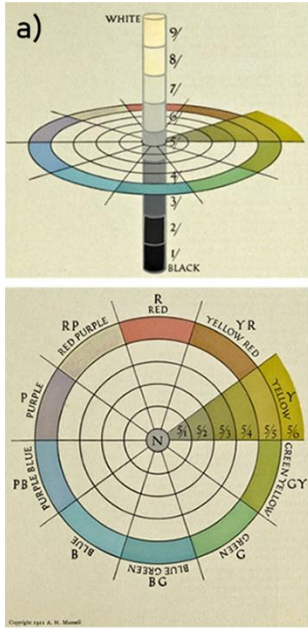
102

Le système de couleurs Munsell donne un nom à chaque couleur dans un système de classification.



Le système Munsell

103

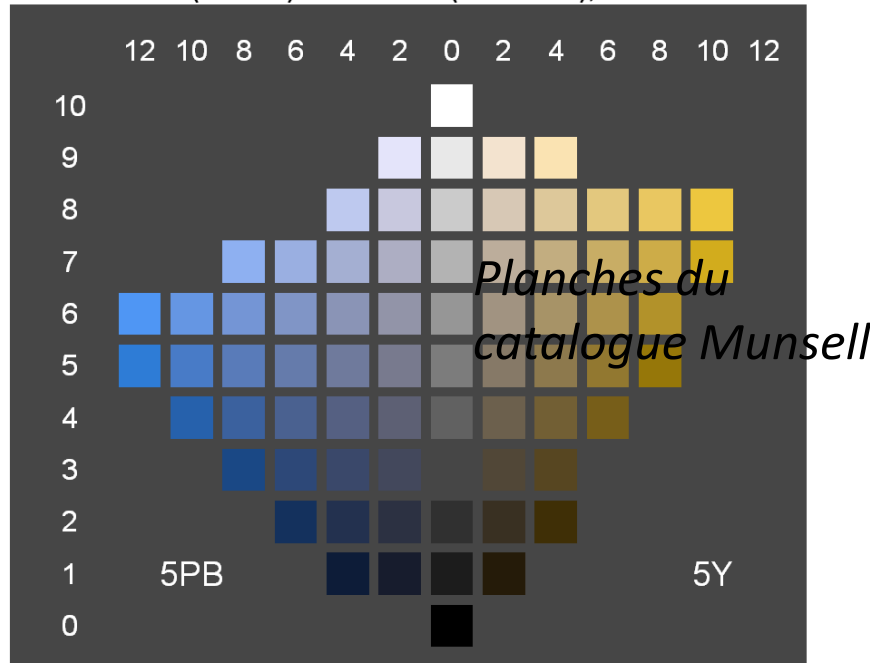


Le système Munsell

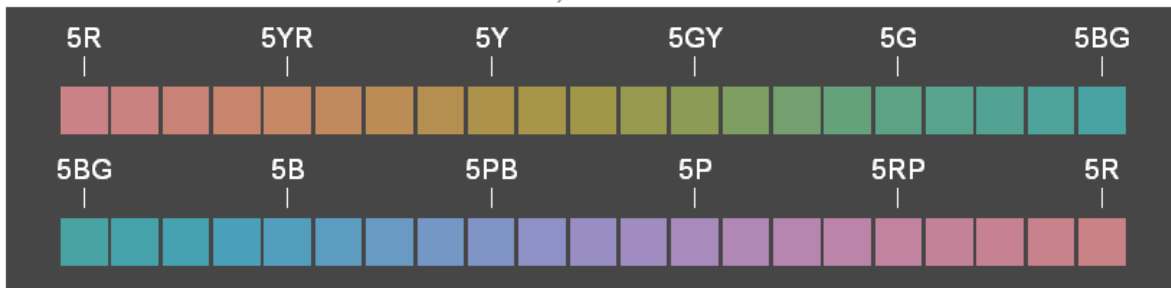
104

Les **différences de couleur** entre échantillons voisins sont presque constantes.

Munsell value (vertical) and chroma (horizontal); hue 5Y and 5PB



Munsell hues; value 6 / chroma 6



Le système Pantone

105



Créé en 1866
fabrication de nuanciers pour la cosmétique

Pantone Matching System
1963



Systèmes d'apparence colorée

Ils évaluent la perception des couleurs, l'apparence des objets dans des conditions spécifiques, la perception subjective.

Paramètres : teinte, clarté, chroma.

Systèmes de mélange des couleurs

Ils évaluent la sensation colorée à partir de **mélanges de couleurs primaires**.

Paramètres: valeurs tristimulus.

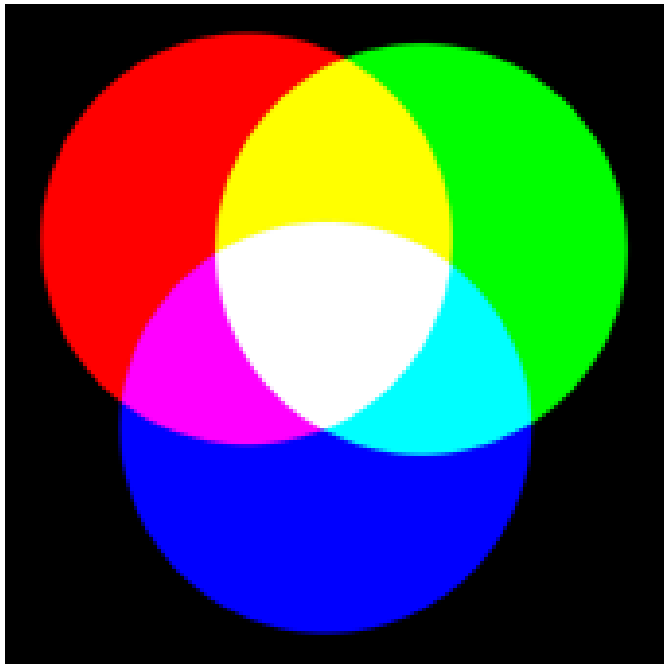
NB : on peut mesurer la réponse spectrale des photocapteurs (par exemple les détecteurs d'imagerie RVB) mais pas celle des photodétecteurs rétiniens... Le mélange de lumières colorées est un moyen d'évaluer la réponse du système visuel à des stimuli colorés.

Mélange de
couleurs primaires



Nouvelle couleur

Synthèse additive



Primaires

Rouge, Vert, Bleu

Ex. les écrans

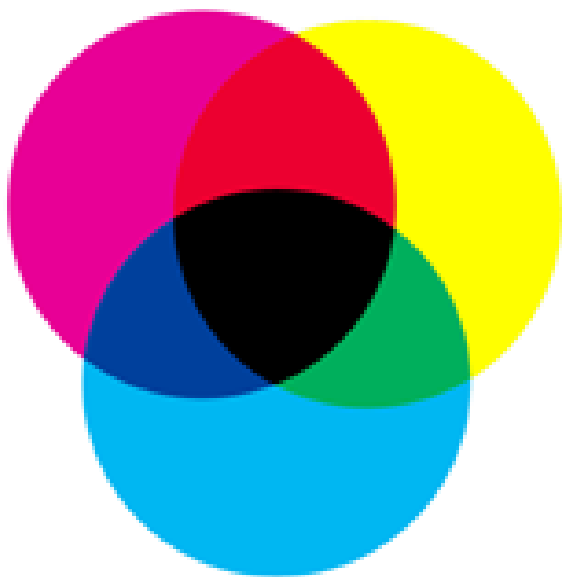


Mélange de
couleurs primaires



Nouvelle couleur

Synthèse soustractive



Primaires

Cyan, Magenta, Jaune

Ex. les encres d'impression



*Faisceau lumineux coloré
(avec un certain spectre)*

*Panneau de
projection*

*Superposition (mélange)
de trois faisceaux de
couleurs primaires*



Expérience psycho-physique :

On demande à des personnes d'ajuster la puissance de faisceaux colorés jusqu'à **égalisation des couleurs**

On a considéré les résultats en moyenne : **observateur standard**

Quantifier une couleur par mélange

110

*Faisceau lumineux coloré
(avec un certain spectre)*

*Panneau de
projection*

*Superposition (mélange)
de trois faisceaux de
couleurs primaires*

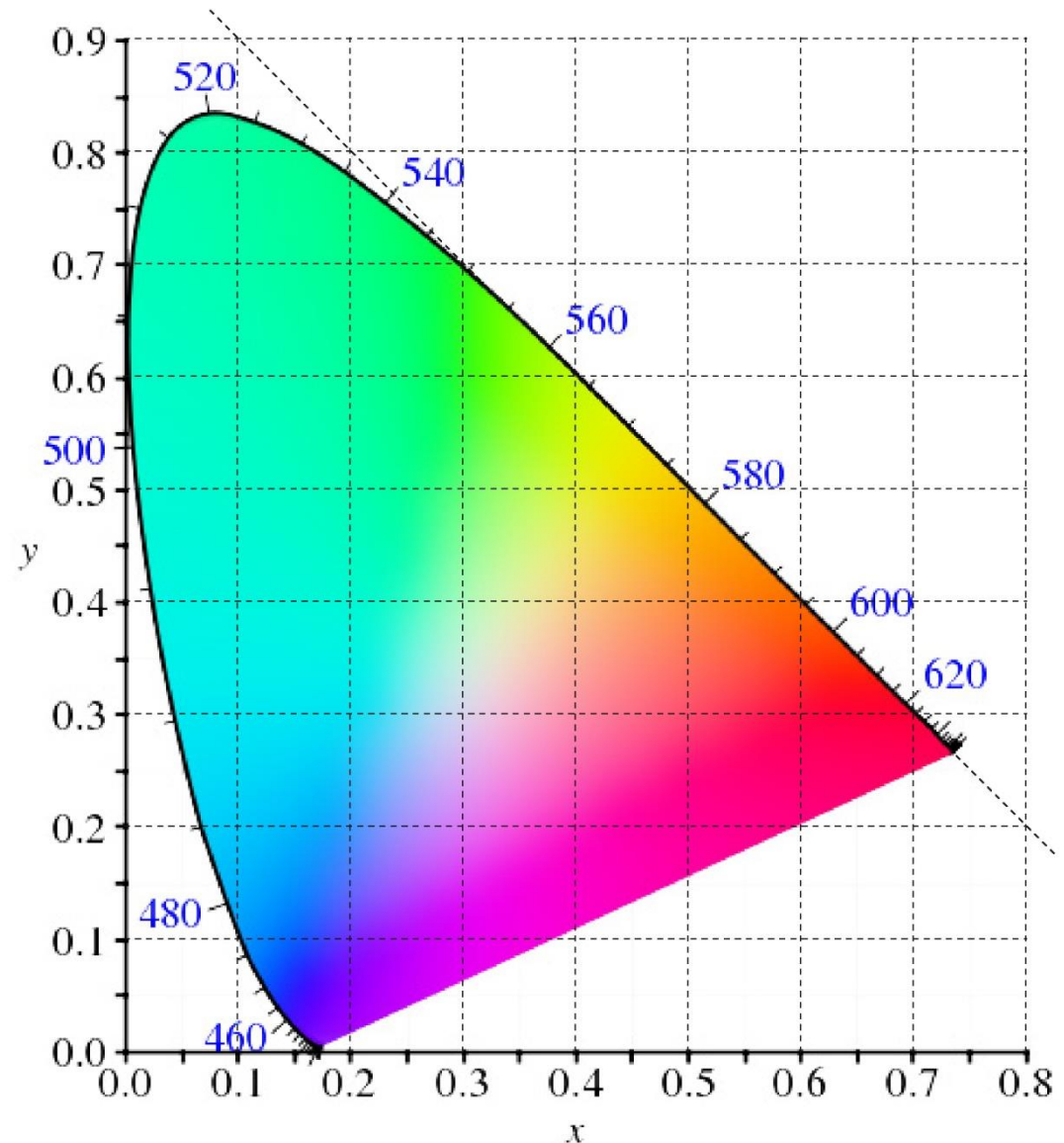


→ On a pu attribuer 3 chiffres à toutes les couleurs,
qu'on peut calculer à partir d'un spectre

CIE 1931 XYZ

Diagramme de chromaticité CIE 1931 xy 111

Représentation
des couleurs
(sans la clarté)
sur un plan



Espace CIE 1931 XYZ

112

$X = 81.7498$
 $Y = 86.4663$
 $Z = 92.1544$

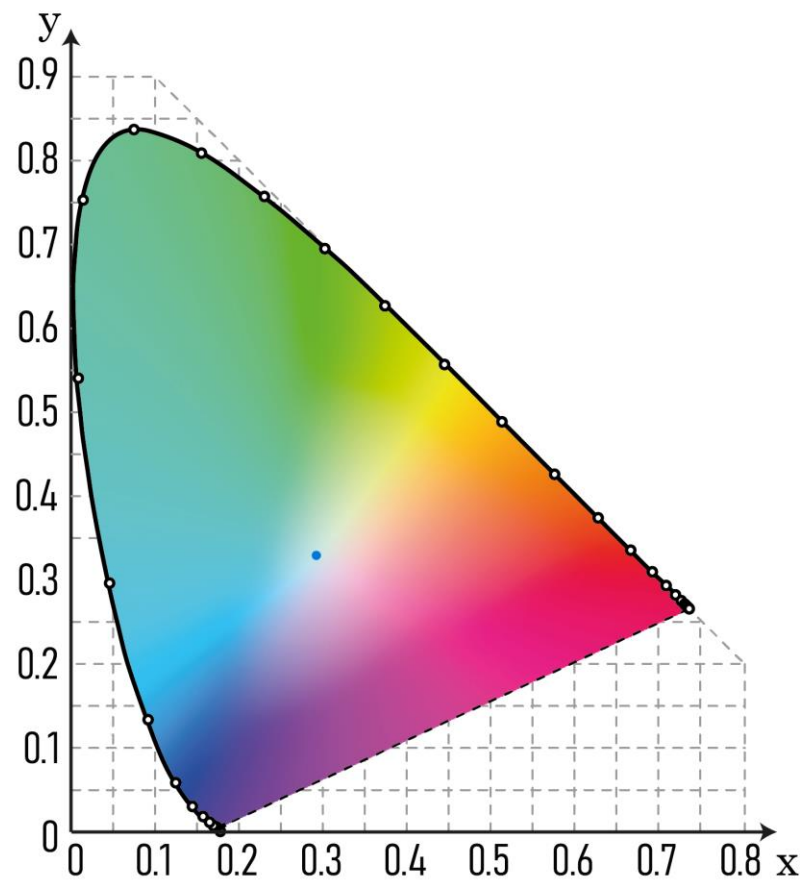
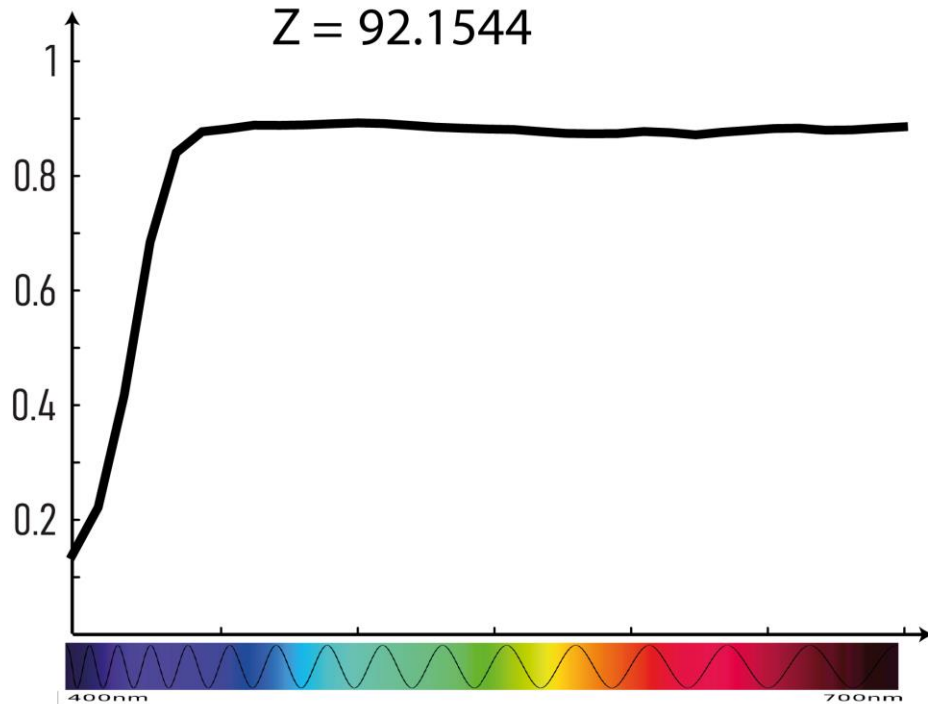
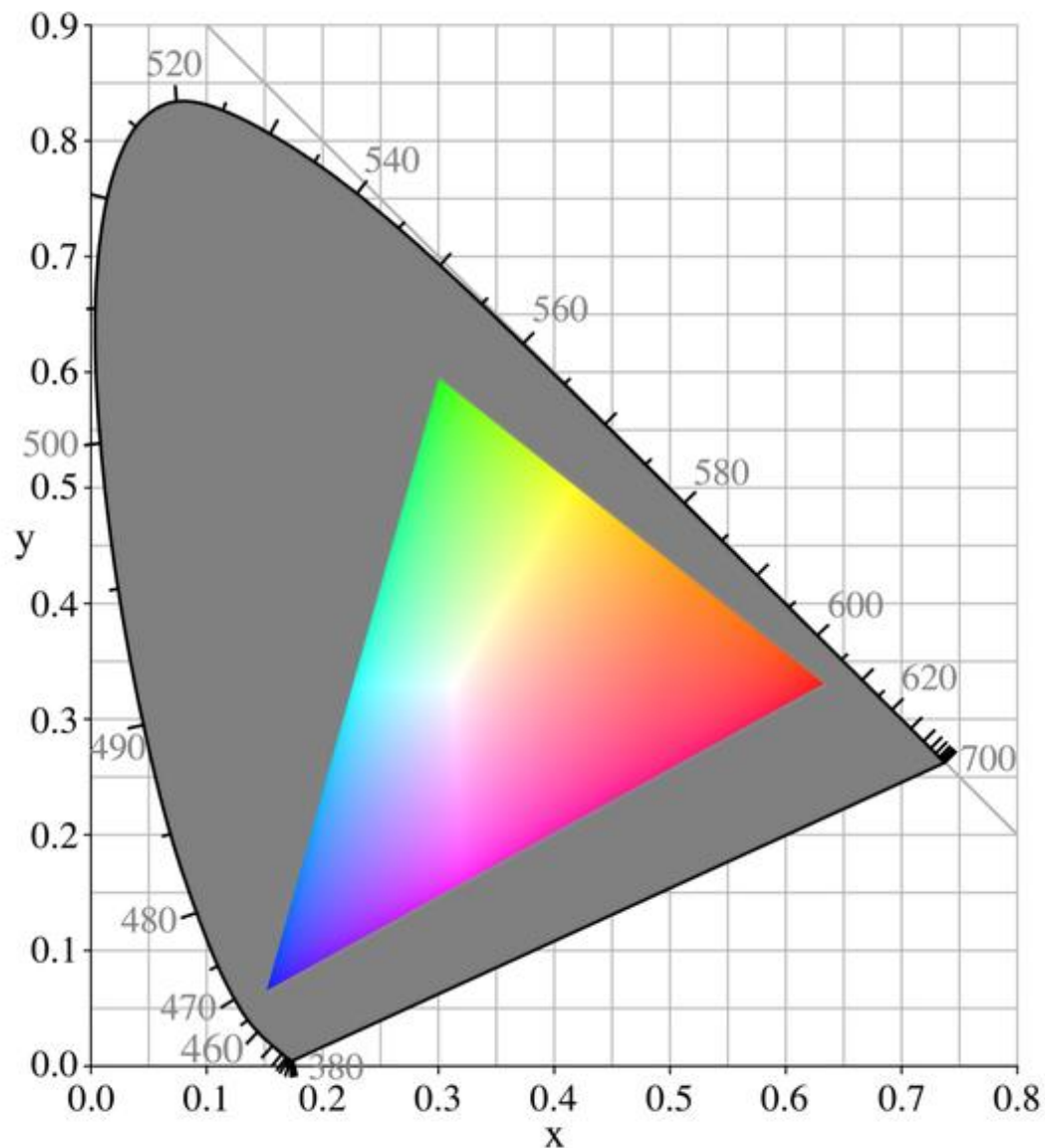


Diagramme de chromaticité CIE 1931 xy 113

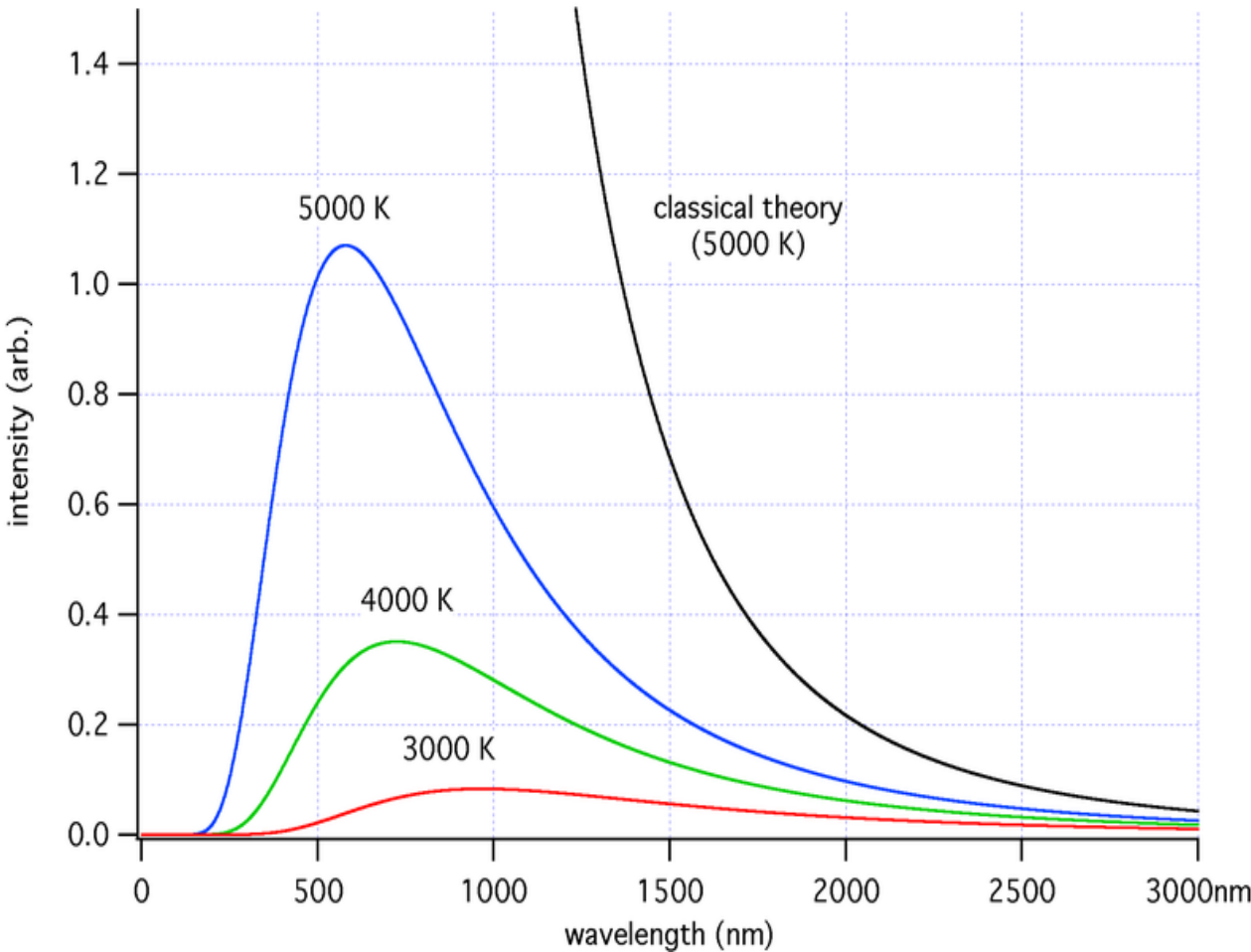


Gamut d'un écran CRT

Les corps noirs

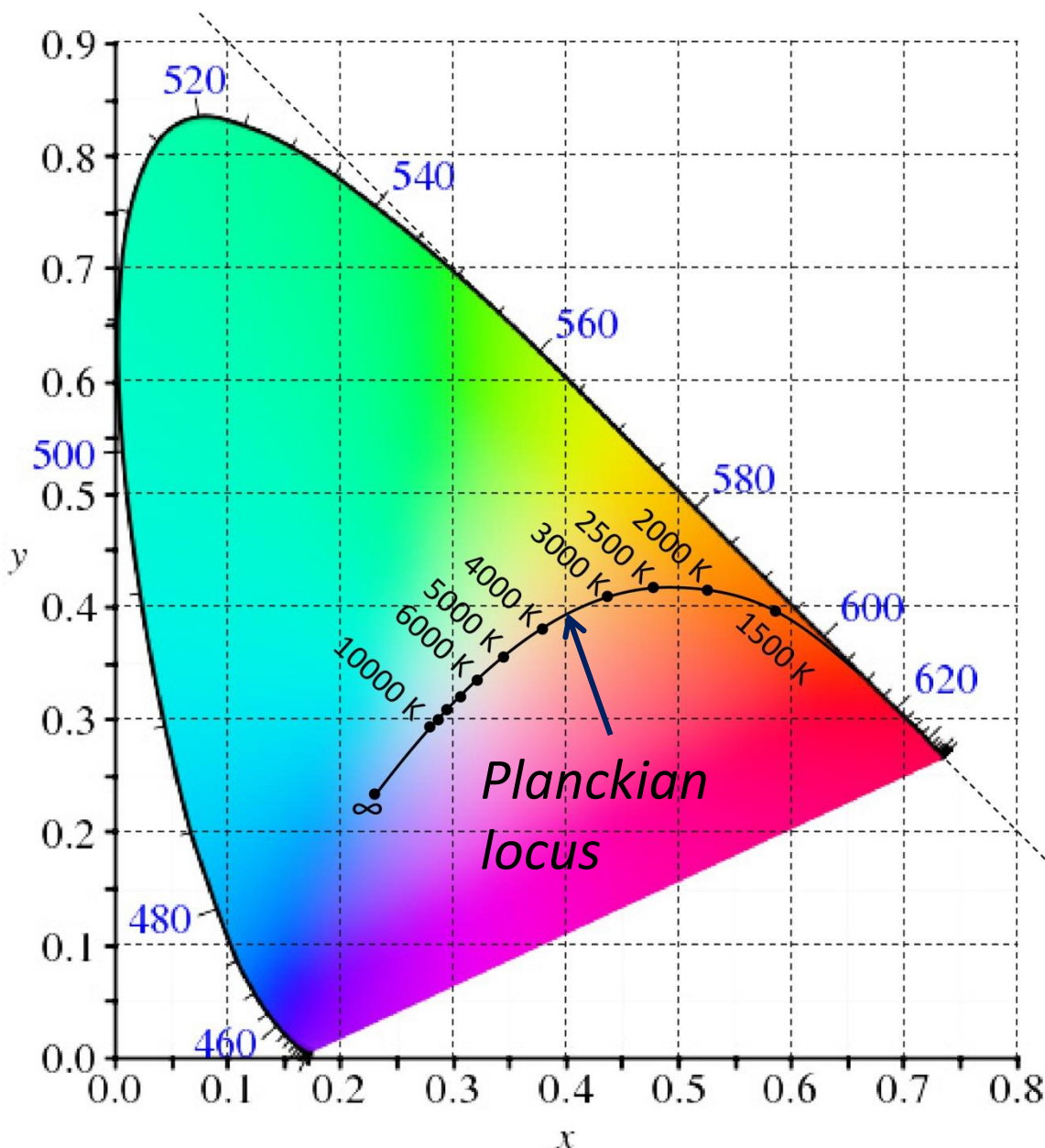
Un corps noir chauffé émet un rayonnement dont la densité spectrale de puissance ne dépend que de sa température.
Elle est donnée par la **loi de Planck** :

$$M = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(e^{c_2/\lambda T} - 1 \right)}$$



λ longueur d'onde
 T température en K

$c_1 = 3.74183 \times 10^{-16} \text{ W.m}^2$
 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m.K}$
 $e = 2.718282$

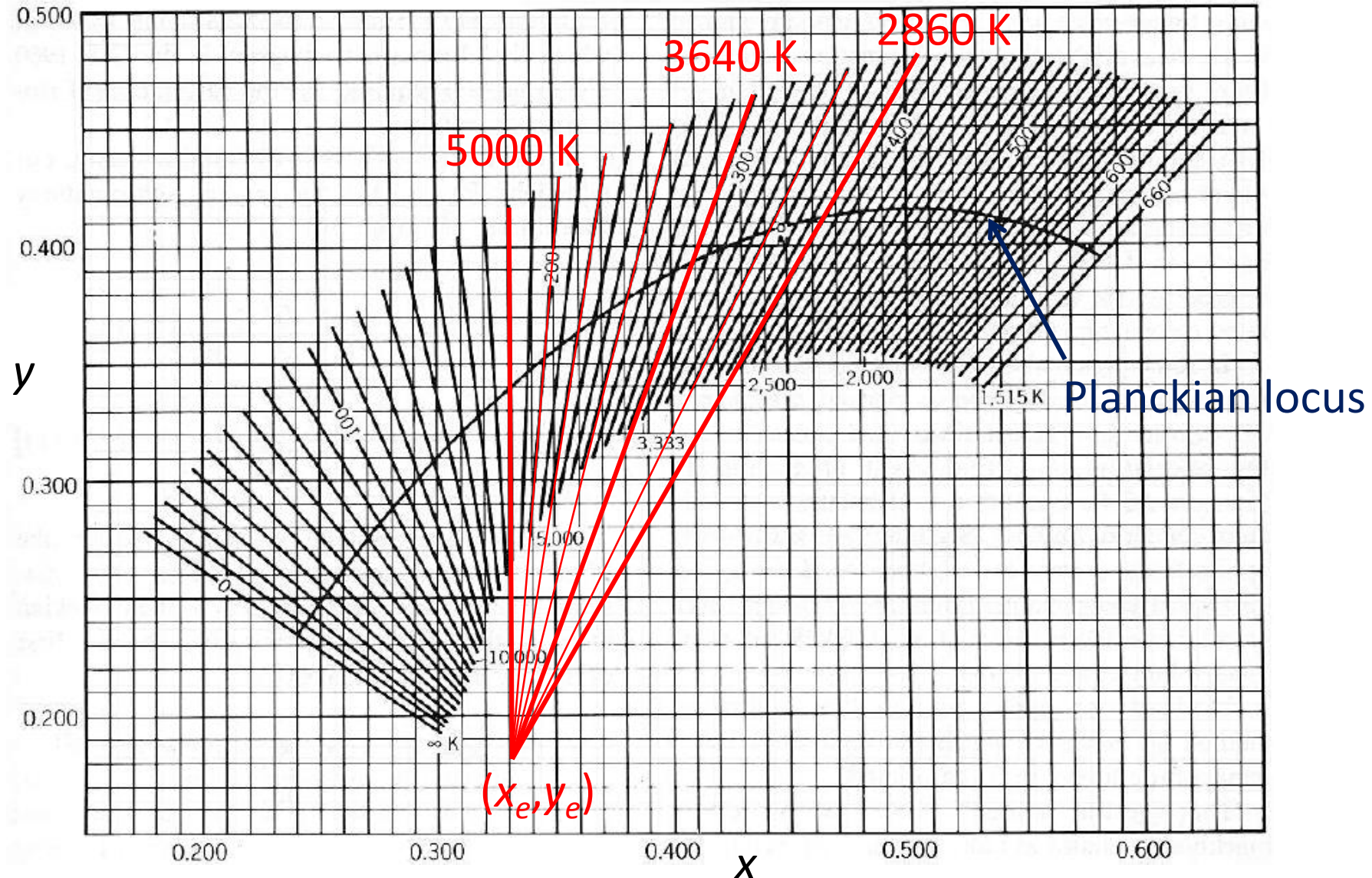


À partir de la DSP d'un rayonnement du corps noir à une température donnée, les valeurs tristimulus XYZ sont calculées et les valeurs x, y sont représentées dans le diagramme de chromaticité (xy).

Lorsque la température augmente, les valeurs x, y suivent une courbe continue appelée **Planckian locus**.

Température de couleur proximale (TCP) 116

Lignes isotherme de Kelly (1963)



Quelques valeurs de TCP

117

Lumière artificielles

Candle flame (1850 K)
Sodium lamps (2200 K)
Incandescent lamps
Halogen lamps
Fluorescent lamps (cool white)
Fluorescent lamps (daylight)



Lumières naturelles

Sunset (2000 K)
Horizon daylight
Daylight (early morning)
Sun at the zenith (5800 K)
Daylight overcast
Clear blue poleward sky

Conclusions



La couleur est une **sensation** humaine.

Elle repose sur un mécanisme cérébrale complexe et d'un long processus d'apprentissage.

Grâce aux travaux menés depuis le XVIIIe siècle, une description universelle des couleurs a été proposée.

Commission Internationale de l'Eclairage

Mais ces descriptions se limitent à des cas simples.
La recherche s'active à considérer des situations de plus en plus complexes.



**Université
Jean Monnet**
Saint-Étienne



Mathieu Hébert



**LABORATOIRE
HUBERT CURIE**

UMR • CNRS • 5516 • SAINT-ETIENNE