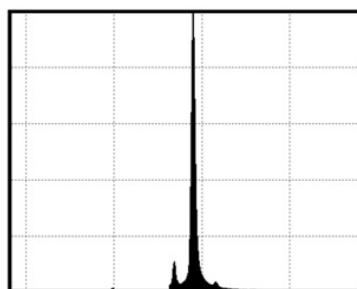


Cours 6: La couleur

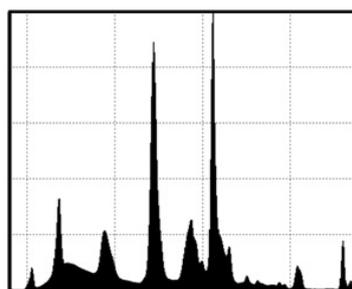
La couleur est une *sensation* qui se construit dans l'œil et le cerveau, à partir du spectre de la lumière reçue. Elle ne correspond pas simplement à une longueur d'onde : par exemple, il n'y a pas de longueur d'onde rose, marron, kaki, noire ou blanche. Les spectres lumineux possibles sont infiniment variés, comme l'illustrent les spectres des trois sources d'éclairage ci-dessous : un lampadaire à vapeur de sodium pour l'éclairage des rues la nuit, un tube fluorescent (improprement appelé « tube néon »), et une ampoule électrique standard composé d'un filament de tungstène incandescent. La première source produit une lumière presque monochromatique, les deux autres des spectres recouvrant toute la gamme visible (400-700 nm). Des spectres totalement différents seraient obtenus avec d'autres sources lumineuses : la lumière du soleil, un pointeur laser, une diode électroluminescente, un écran de télévision ou d'ordinateur, etc...

Lampe à vapeur de sodium
(jaune)



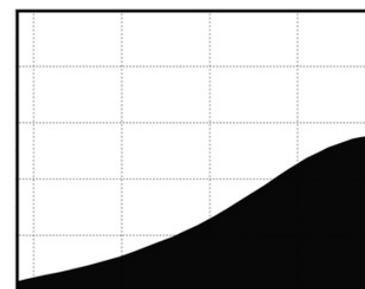
400 500 600 700
Longueur d'onde (nm)

Tube fluorescent
(« blanc »)



400 500 600 700
Longueur d'onde (nm)

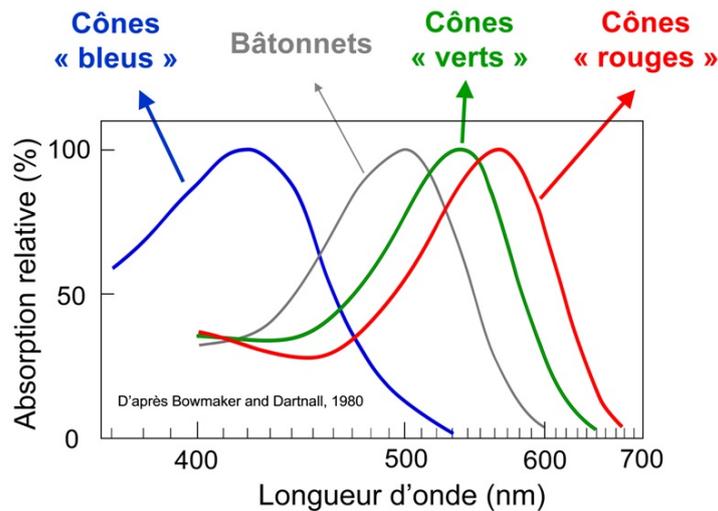
Ampoule tungstène
(blanc-jaune)



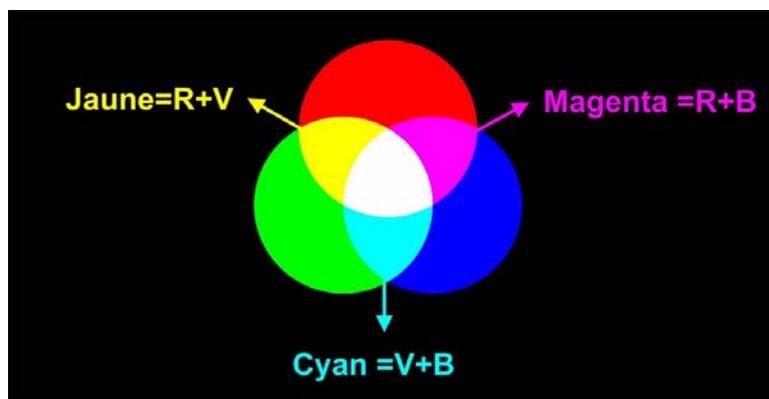
400 500 600 700
Longueur d'onde (nm)

A cette diversité des sources d'éclairage s'ajoute la diversité encore plus grande des matériaux qui nous entourent, et qui interagissent avec la lumière. Ainsi, lorsque la lumière est diffusée par un objet, son spectre peut être très différent de celui de la lumière incidente, suivant que l'objet diffuse préférentiellement telles ou telles longueurs d'onde.

Dans l'œil, l'image du monde observé est formée sur la rétine, une matrice de nombreux petits capteurs appelés *cônes* et *bâtonnets*; ce sont les cônes, en particulier, qui produisent la sensation de couleur. Toutefois, de l'immense variété des spectres lumineux possibles, *l'œil humain ne récupère qu'une petite quantité d'information*. Il existe en effet trois sortes de cônes dans la rétine, qui absorbent plutôt la lumière rouge, verte ou bleue, respectivement. La figure ci-dessous présente les réponses spectrales des trois types de cônes, ainsi que la réponse spectrale des bâtonnets. Notons qu'il n'y a que des cônes et pas de bâtonnets au centre de la rétine (c'est-à-dire dans la zone qui permet une vision nette et très riche en information, au contraire de la vision périphérique beaucoup plus floue). C'est pourquoi les bâtonnets ne jouent qu'un rôle secondaire dans la sensation de couleur.



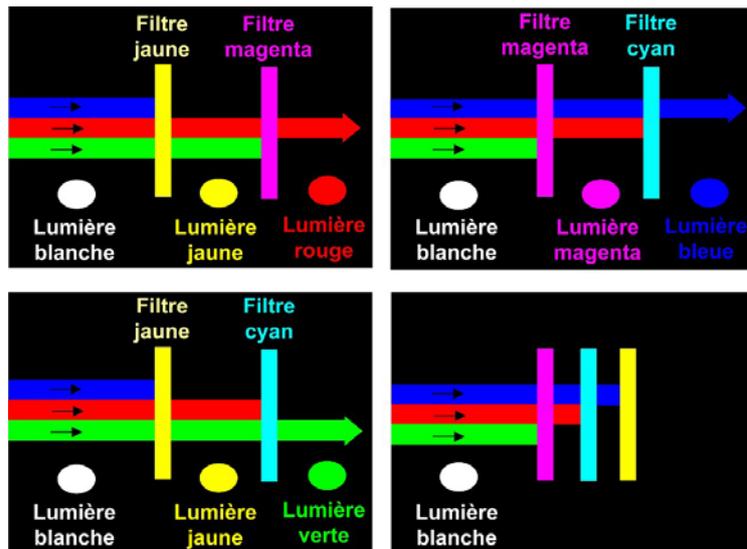
Ainsi, la sensation colorée est construite à partir de trois données seulement : R, V et B (intensité d'excitation des cônes rouges, verts et bleus). Cela implique que la sensation colorée est un phénomène inscrit dans un espace à trois dimensions. Si on excite les cônes rouges, verts et bleus, en même temps, avec une forte intensité, la rétine est excitée sur la totalité de son domaine spectral de sensibilité. Le cerveau voit alors du blanc, si bien que l'on peut écrire : Blanc = R + V + B. De la même manière, si l'on excite fortement les cônes rouge et vert, mais pas le bleu, on obtient une *nouvelle sensation de couleur* qui est le *jaune*. Si l'on excite seulement les cônes bleu et vert, on obtient une autre sensation, celle de la couleur *cyan*. Enfin, si l'on excite les cônes bleu et rouge seulement, on obtient la sensation de *magenta*.



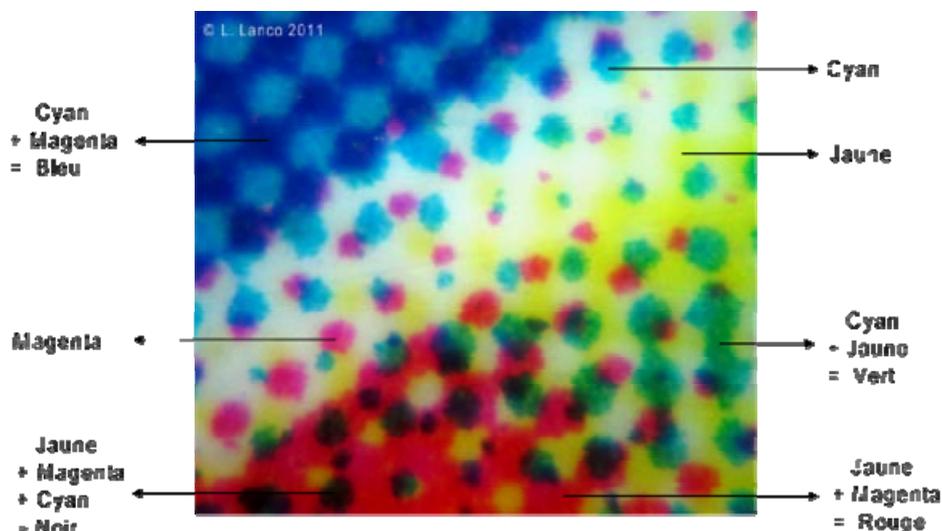
De façon générale, on parle de *synthèse additive* pour décrire l'apparition de nouvelles sensations de couleur lorsqu'on superpose des lumières colorées. Ainsi, en éclairant un mur blanc avec un faisceau vert et un faisceau rouge, on observe la couleur jaune; en éclairant ce mur avec un rayonnement monochromatique de longueur d'onde 580 nm, on obtient du jaune également. Il existe bien sûr une grande différence physique entre une lumière de longueur d'onde 580 nm et un mélange de lumières rouge et verte. Cependant, ces deux phénomènes stimulent les cellules de l'œil de façon semblable, ce qui fait que l'on ne perçoit pas la différence : dans les deux cas les cônes R et V sont excités simultanément. La synthèse additive, utilisée dans tous les écrans de télévision ou d'ordinateur, permet de reproduire la plupart des sensations de couleur à partir de trois types de pixels seulement : rouge, vert, et bleu. Vous pourrez le vérifier par vous-même en cliquant sur le lien ci-dessous :

<http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/tribollet-old/SiteCouleurs/EDUCNET/ecrantv.htm>

La synthèse additive se produit lorsqu'on superpose des sources lumineuses, c'est-à-dire lorsqu'on *ajoute* de la lumière à la lumière. Mais nous sommes également entourés d'objets qui *absorbent* la lumière au lieu d'en émettre, et les règles de composition des couleurs ne sont plus les mêmes. Par exemple, si l'on place des filtres colorés successifs sur le trajet de la lumière, chaque filtre absorbera une partie du spectre, et modifiera la couleur observée. Un filtre de couleur jaune est un filtre qui absorbe le bleu mais laisse passer le rouge et le vert; un filtre de couleur magenta absorbe seulement le vert; enfin, un filtre de couleur cyan n'absorbe que le rouge. On peut donc obtenir des lumières vertes, rouges ou bleues en combinant deux filtres, comme sur la figure ci-dessous : chaque filtre *retranche* une composante spectrale à partir de la lumière blanche initiale.

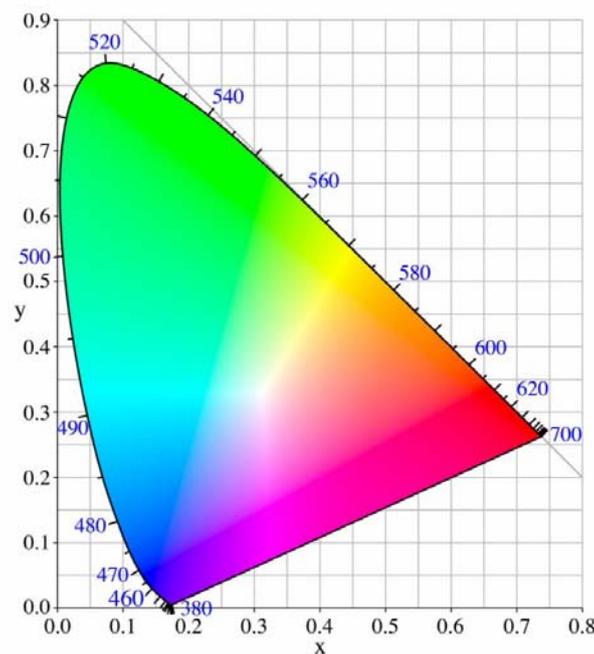


De façon générale, on parle de *synthèse soustractive* pour décrire l'apparition de nouvelles sensations de couleur lorsqu'un superpose des *absorbants* colorés, comme dans le cas des filtres ci-dessus. Mais la synthèse soustractive est également à la base de nombreux arts graphiques, en premier lieu la peinture. Un pigment jaune, par exemple, a la propriété d'absorber le bleu; un pigment de couleur cyan a au contraire la propriété d'absorber le rouge. Si l'on mélange de la peinture jaune a de la peinture cyan, on obtient un mélange qui absorbe à la fois le rouge et le bleu : ce mélange nous apparaît donc de couleur verte. La synthèse soustractive est également utilisée dans toutes les imprimantes pour reproduire n'importe quelle sensation de couleur à partir de trois encres colorées : jaune, cyan, et magenta. .



Même si la couleur n'est qu'une *sensation* créée par la lumière, le langage commun considère souvent la couleur comme une propriété des objets : une « voiture rouge », une « chemise bleue », etc... En réalité, pour définir la « couleur d'un objet », il faut préciser les conditions d'observation : la couleur perçue ne sera pas la même sous le soleil de midi ou sous un éclairage artificiel, et la voiture rouge pourra apparaître jaune sous l'éclairage du lampadaire à vapeur de sodium. Il existe également de nombreux cas particuliers qui font relativiser la notion de couleur: la couleur d'un verre dichroïque, par exemple, dépend de l'angle d'observation et de l'angle avec lequel il est éclairé. Un objet fluorescent semblera luire s'il est au soleil, ou s'il est éclairé avec de la lumière ultra-violette, mais restera terne sous l'éclairage d'une ampoule à incandescence.

Un des outils de base de la colorimétrie, la science de la couleur, est le *diagramme de chromaticité* présenté ci-dessous. Il s'agit d'un diagramme répertoriant l'ensemble des couleurs possibles *pour une même luminosité apparente* : les couleurs sombres comme le kaki, l'ocre, ou le marron, n'y sont donc pas visibles. Ce diagramme a pour propriété fondamentale que le mélange de deux couleurs (représentées par deux points A et B) donne une couleur au barycentre de A et B. Les couleurs de l'arc-en-ciel, qui correspondent à des longueurs d'onde uniques et sont donc des couleurs *pures*, constituent les bords du diagramme (les chiffres des longueurs d'onde sont indiqués ci-dessous en nanomètres). Toutes les autres couleurs sont obtenues par superposition de différentes longueurs d'onde, et sont donc situées à l'intérieur du diagramme. Le blanc est logiquement situé au milieu du diagramme, au barycentre de toutes les longueurs d'onde visibles.

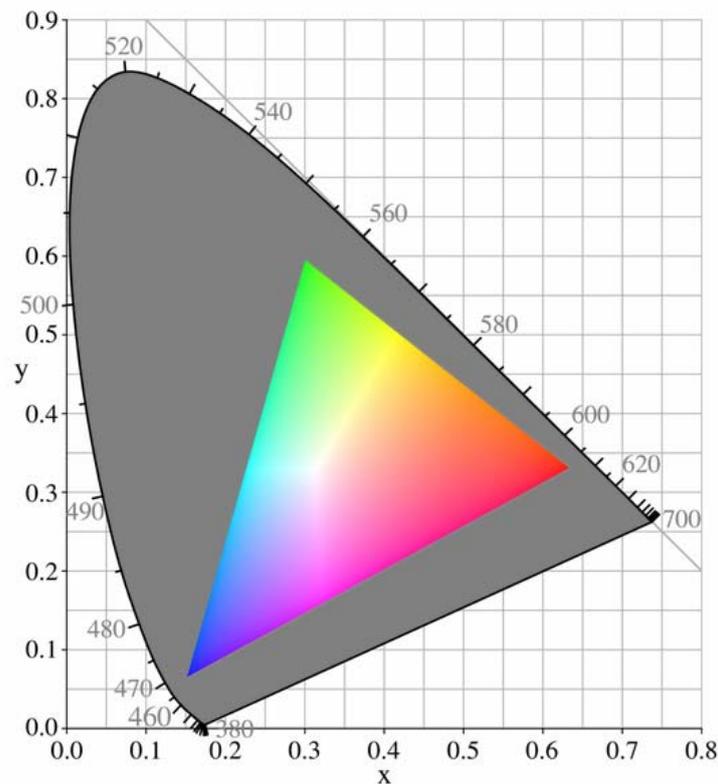


Source : Hangkwang, Wikipedia, 2009

En colorimétrie, on définit la *saturation* d'une couleur comme sa distance par rapport au centre du diagramme. Le blanc correspond à une saturation de 0, et une couleur spectralement pure, monochromatique, correspond à une saturation de 1. Entre les deux, on trouve des couleurs ayant une couleur dominante (que l'on appelle la *teinte*) mais plus ou moins mélangé avec du blanc. Un rouge vif et un rose pâle sont donc des couleurs de la même teinte (rouge), mais avec des saturations très différentes: le rouge vif est une couleur saturée tandis que le rose pâle est très désaturé, mélangé avec beaucoup de blanc.

En jouant sur la teinte, la saturation, et bien sûr la luminosité, on peut en principe recréer

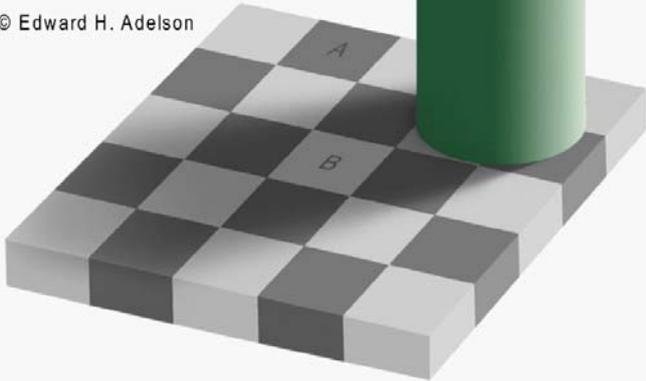
l'ensemble des sensations colorées possibles, mais cela reste très compliqué à réaliser: il faudrait disposer de très nombreuses sources monochromatiques avec une grande gamme de longueurs d'onde accessibles. *En pratique, un écran d'ordinateur ou de télévision se contente de réaliser des mélanges de trois couleurs seulement (pixels R, V, et B).* Ceci ne permet de reproduire que les mélanges de R, V, et B, c'est-à-dire les couleurs qui sont situés à l'intérieur du triangle ci-dessous, et pas les autres. Cela a deux conséquences : premièrement, toute représentation du diagramme de chromaticité sur un écran est forcément fausse pour tout ce qui concerne les couleurs à l'extérieur du triangle (puisque'il s'agit de couleurs que votre moniteur d'ordinateur ne peut pas synthétiser!); deuxièmement, *l'ensemble des couleurs que l'on voit sur un écran est très pauvre dans l'espace des couleurs en général.* A la télévision, vous n'avez jamais vu la vraie couleur d'un laser, d'un bouton d'or, du bleu d'Yves Klein ou de Fra Angelico, les turquoise de certaines faïences égyptiennes. Cette dernière remarque encourage à aller à la rencontre des couleurs, et en particulier à fréquenter les musées.



Source : Hangkwang, Wikipedia, 2009

Notons enfin que la science des couleurs est rendue plus complexe encore par le traitement de l'information à l'intérieur de l'œil, avant même d'arriver au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique. Il y a en effet plus de 100 millions de cônes et bâtonnets, mais seulement un million de fibres nerveuses dans le nerf optique, ce qui implique une *compression de l'information*, et donc une perte de données. Ceci peut donner lieu à des illusions d'optique comme celle ci-dessous, où la case contenant la lettre A et celle contenant la lettre B sont exactement de la même couleur (comme le démontre le copier-coller en bas à droite), bien qu'elles nous semblent très différentes. Cette illusion provient du fait que *l'œil évalue la couleur par comparaison avec les couleurs adjacentes*, et se trouve trompé par le contraste progressif entre les cases. Le cerveau ne parvient à interpréter l'illusion qu'en se référant à un objet bien connu: un échiquier qui alternerait les cases claires et les cases sombres.

© Edward H. Adelson



A

B