

6 Loi des lentilles Un autre système de conventions pour les signes algébriques

La loi des lentilles figurant dans les pages précédentes propose l'utilisation de signes algébriques conventionnels basés sur la nature réelle ou virtuelle des objets et des images.

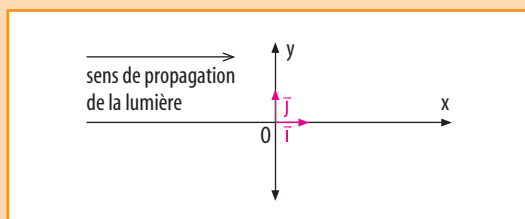
Même si les lois physiques sont invariables et indépendantes de notre manière de les étudier, il reste possible de les décrire de différentes manières. A condition qu'elles soient cohérentes, elles donnent les mêmes résultats.

Voici une autre manière d'exprimer la loi des lentilles et les grandeurs mesurables qui y sont rattachées. On y distingue notamment des distances focales de signes algébriques différents de part et d'autre de la lentille.

Système alternatif de conventions pour la loi des lentilles

Pour la taille des objets et des images, les grandeurs sont mesurées depuis l'axe optique. Les mesures vers le haut sont positives et celles vers le bas sont négatives.

On mesure les distances p , p' , f et f' depuis le centre optique de la lentille (comme des vecteurs orientés); on leur attribue le signe «+» si leur sens est le même que celui de la propagation de la lumière et le signe «-» si leur sens est opposé à celui de la propagation de la lumière.



Les foyers objet (F) et image (F') sont placés de la manière suivante :

- **Lentille convergente :** F du côté d'où vient la lumière et F' de l'autre côté.

Dans ce cas, f a une valeur négative et f' une valeur positive.

- **Lentille divergente :** F' du côté d'où vient la lumière et F de l'autre côté.

Dans ce cas, f' a une valeur négative et f une valeur positive.

La loi des lentilles s'exprime ainsi :

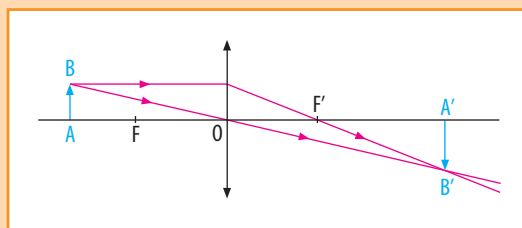
$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$$

Le grandissement Γ (gamma majuscule) s'exprime ainsi :

$$\Gamma = p' / p$$

Exemples

Image réelle formée par une lentille convergente :



F est le « foyer objet » ;

la distance focale f ($= OF$) est négative.

$$f < 0$$

F' est le « foyer image » ;

la distance focale f' ($= OF'$) est positive.

$$f' > 0$$

OA est la « distance objet » ;

$p = OA$ est négatif.

$$p < 0$$

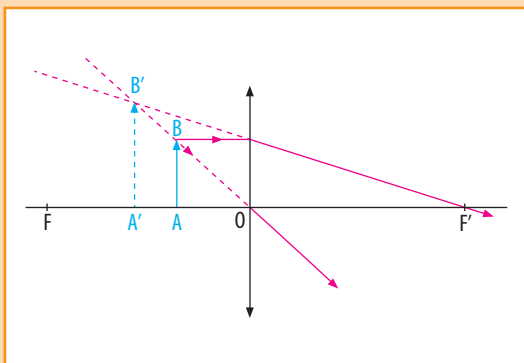
OA' est la « distance image » ;

$p' = OA'$ est positif.

$$p' > 0$$

Le grandissement (p' / p) est négatif, ce qui indique que l'image est inversée par rapport à l'objet.

Image virtuelle formée par une lentille convergente (loupe):



F est le « foyer objet »;
la distance focale $f (= OF)$ est négative.

$$f < 0$$

F' est le « foyer image »;
la distance focale $f' (= OF')$ est positive.

$$f' > 0$$

OA est la « distance objet »;
 $p = OA$ est négatif.

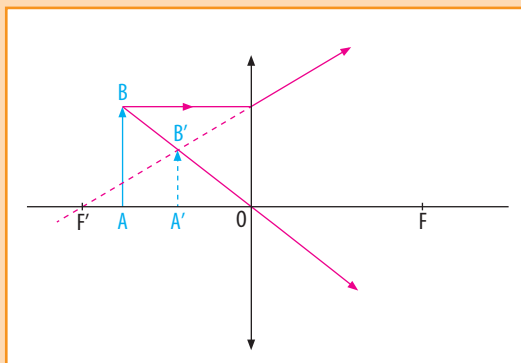
$$p < 0$$

OA' est la « distance image »;
 $p' = OA'$ est négatif.

$$p' < 0$$

Le grandissement (p' / p) est positif, ce qui indique que l'image est droite par rapport à l'objet.

Image virtuelle formée par une lentille divergente:



F est le « foyer objet »;
la distance focale $f (= OF)$ est positive.

$$f > 0$$

F' est le « foyer image »;
la distance focale $f' (= OF')$ est négative.

$$f' < 0$$

OA est la « distance objet »;
 $p = OA$ est négatif.

$$p < 0$$

OA' est la « distance image »;
 $p' = OA'$ est négatif.

$$p' < 0$$

Le grandissement (p' / p) est positif, ce qui indique que l'image est droite par rapport à l'objet.

Cet ensemble de conventions est cohérent. Son utilisation donne les mêmes résultats que celui, mieux connu et plus souvent utilisé, qui est présenté dans les pages précédentes de ce livre.

OPT 8. Les couleurs

Nous vivons dans un monde coloré. Cette évidence cache une réalité liée à notre biologie ; en effet les couleurs sont des sensations créées dans notre cerveau à partir d'une petite partie seulement des rayonnements électromagnétiques de la nature. Cette petite partie est nommée « lumière » justement parce qu'on peut la « voir ».

Rappelons ici que tous les animaux ne sont pas capables de distinguer des couleurs et que certains peuvent percevoir des longueurs d'ondes invisibles pour nous.

Les couleurs que nous percevons viennent soit directement de sources de lumières colorées (les étoiles par exemple), soit indirectement d'objets ou de substances qui nous renvoient une partie colorée de la lumière qu'ils ont eux-mêmes reçue.

Ce chapitre décrit quelques caractéristiques physiques de notre perception des couleurs ; ces propriétés sont donc strictement liées à la perception humaine de la lumière.

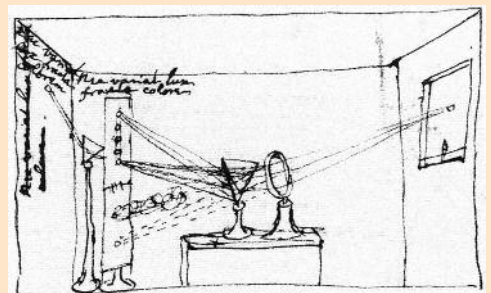
1 Quels sont les rayonnements électromagnétiques que nous pouvons percevoir ?

A part la lumière (perceptible par les yeux) et les infrarouges si leur rayonnement est intense (par la peau), nous n'avons aucune perception directe du rayonnement électromagnétique. Pour le détecter, il faut des appareils comme une radio pour les ondes radio ou une plaque photo pour les rayons X.

Nous constatons que les couleurs que nous percevons avec nos yeux ne sont qu'une très petite partie de l'ensemble du rayonnement électromagnétique. La lumière seule est capable de provoquer des sensations visuelles sur la rétine. Les perceptions de cette dernière sont déterminées par les propriétés physico-chimiques de ses constituants.

L'origine physique des couleurs est restée longtemps mystérieuse. Nos premières connaissances scientifiquement fondées sur ce sujet datent des expériences de Newton sur la décomposition de la lumière solaire par un prisme et la recombinaison du spectre ainsi obtenu par une lentille. De là vient l'idée que la lumière blanche contient réunies toutes les « couleurs de l'arc-en-ciel ».

Experimentum Crucis, 1672 : De droite à gauche sur le croquis dessiné par Newton lui-même, on distingue l'ouverture par où passe la lumière solaire, le premier prisme, la planche interposée entre le premier et le second prisme, percée de trous afin de sélectionner un faisceau émergent d'une seule couleur, puis le second prisme, et l'absence de dispersion observée sur le mur opposé à l'ouverture. Si l'on compte les trous découpés par Newton sur la paroi qui sépare les deux prismes, on n'en dénombre que cinq.



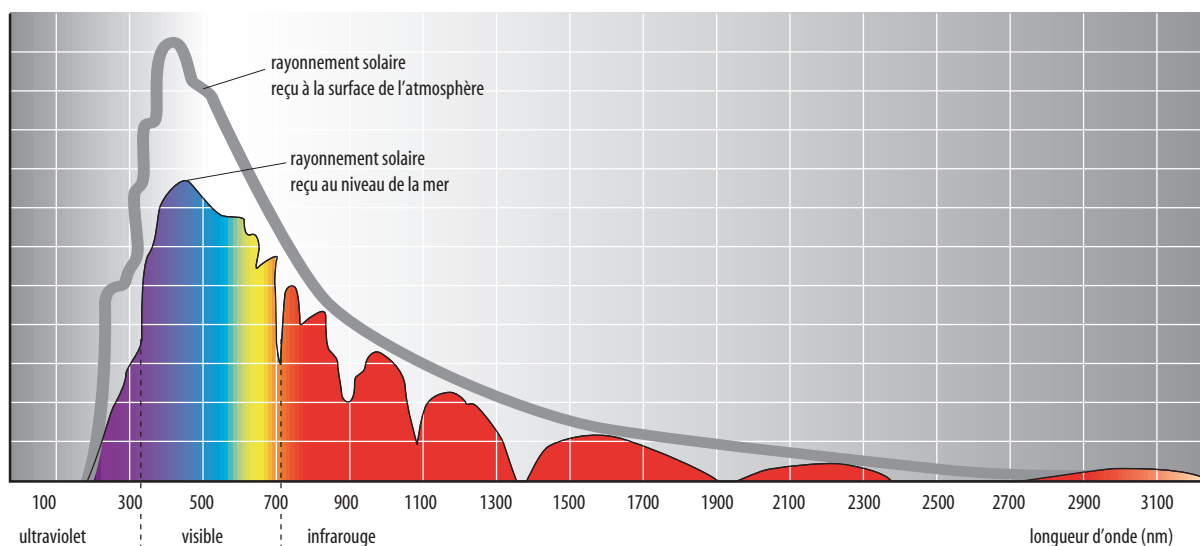
2 Lumière blanche

La lumière dans laquelle l'homme a évolué depuis des millions d'années est celle du Soleil. On nomme « lumière blanche » le mélange d'ondes électromagnétiques que nous recevons du Soleil. Pour paraître blanche, il faut que la lumière qui entre dans nos yeux y produise une stimulation de la rétine semblable à celle produite par la lumière du Soleil.

Aujourd'hui, le rayonnement solaire constitue toujours notre source principale d'énergie. Il nous procure gratuitement de la lumière et de la chaleur, il est à l'origine du cycle de l'eau, des phénomènes météorologiques et permet aux êtres vivants d'exister. Cette énergie rayonnante est gratuite et presque éternelle, puisqu'elle ne disparaîtra qu'avec l'extinction du Soleil, c'est-à-dire dans 5 milliards d'années !

Dans le domaine visible du rayonnement électromagnétique, à chaque longueur d'onde est associée la perception d'une couleur par nos yeux, ceci est mis en évidence dans un arc-en-ciel.

Les notions qui suivent (couleurs primaires, secondaires, ...) sont donc liées à la perception humaine de la lumière ; elles n'ont pas de sens en physique car elles ne sont pas généralisables au titre de lois de la nature.



Dans le diagramme ci-dessus figurent le spectre d'émission du rayonnement solaire intercepté par la Terre hors de l'atmosphère terrestre ainsi que celui reçu à sa surface au niveau de la mer. Une bonne partie du rayonnement du Soleil est dans les longueurs d'onde visibles, tandis qu'une partie au moins équivalente se trouve dans l'infrarouge. Le reste est dans l'ultraviolet. L'ozone O_3 se charge de diminuer la part d'ultraviolets qui arrivent à la surface. L'ozone, l'oxygène et l'eau sont les principaux constituants de l'atmosphère responsables de l'absorption du rayonnement solaire.

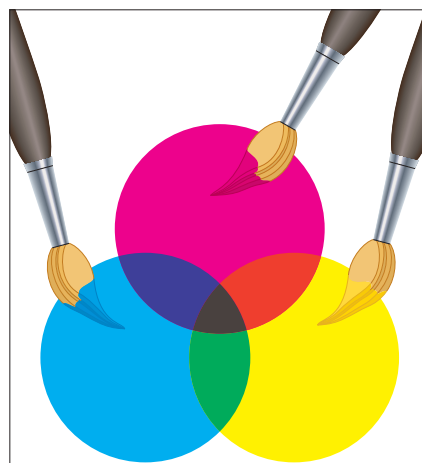
3 Couleurs primaires

On définit trois couleurs primaires ; une couleur est dite primaire si on ne peut pas l'obtenir par le mélange d'autres couleurs. Selon le contexte (imprimerie, écran de télévision, arts visuels, ...), on choisira trois couleurs primaires appropriées, pas forcément les mêmes dans chaque cas.

A partir de trois couleurs primaires, on peut obtenir, par mélange, une gamme complète de couleurs.

Si on mélange trois couleurs primaires, on peut obtenir :

- un noir par synthèse soustractive (voir pages suivantes) en superposant des filtres colorés ;
- un gris foncé en mélangeant des substances colorées opaques ;
- un gris moyen en juxtaposant en nombre égal des petites touches des trois couleurs primaires ;
- un gris clair par rotation rapide d'un nombre égal de bandes de couleurs primaires par exemple sur une toupie ;
- un blanc par synthèse additive (voir pages suivantes) en superposant des lumières de couleurs primaires et de même intensité lumineuse.



Gris foncé.



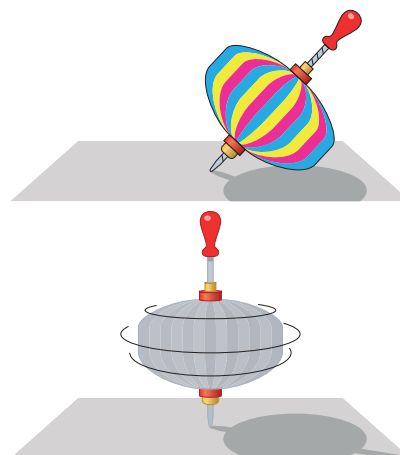
Gris moyen.

4 Couleurs secondaires

Une couleur est dite secondaire si elle résulte du mélange de deux couleurs primaires. On obtient des couleurs secondaires lorsqu'une des trois cartouches de couleur d'une imprimante est vide.

5 Couleurs tertiaires

Une couleur est dite tertiaire si elle résulte du mélange de trois couleurs primaires. Les couleurs d'une imprimante sont le plus souvent tertiaires car elles résultent du mélange, dans des proportions variables, des trois couleurs primaires des encres des cartouches de l'imprimante.



Gris clair.

6 Emission de lumière

La lumière émise par un corps est généralement un rayonnement constitué de plusieurs longueurs d'onde mélangées. Dans la vie courante, si on excepte certaines réactions chimiques qui émettent de la lumière, les deux principales

circonstances dans lesquelles un corps émet de la lumière sont les suivantes :

- Tout corps émet un rayonnement thermique ; plus sa température est élevée, plus le rayonnement est important. La lumière émise par les objets chauds passe du rouge au blanc ou au bleu lorsque leur température augmente. Ce rayonnement devient visible à partir de 500 °C environ. Cette propriété est utilisée pour estimer la température des objets travaillés dans les forges.

Le filament des ampoules à incandescence est porté à environ 2600 °C tandis que la surface du Soleil est à environ 5800 °C ; la lumière émise n'est donc pas la même (il y a davantage de courtes longueurs d'onde, du bleu, dans la lumière du Soleil et il faut en tenir compte en photographie).

- Lorsqu'un corps réfléchit ou diffuse de la lumière qu'il a lui-même reçue, il peut soit renvoyer une lumière semblable à celle qu'il a reçue (objets blancs, miroirs), soit absorber une partie du rayonnement. Dans ce dernier cas, la couleur apparente de l'objet ne sera pas la même que la couleur de la lumière reçue.

COULEURS	TEMP.
blanc	1300 °C
blanc naissant	1200
jaune clair	1100
jaune	1000
orange clair	950
orange	900
rouge clair	850
cerise clair	800
cerise	750
cerise foncé	700
rouge foncé	650
brun rouge	600

En forge, les températures peuvent être estimées d'après la couleur du métal.

7. La synthèse additive

Lorsqu'on mélange des lumières de différentes longueurs d'onde, la perception visuelle du mélange est différente de celle due à chaque lumière du mélange. On appelle ce phénomène le **mélange additif** des couleurs.

La lumière obtenue par ce mélange sera toujours plus intense que chacune des parties du mélange et il est possible d'obtenir de la lumière blanche si le spectre du mélange s'approche suffisamment de celui de la lumière émise par le Soleil.

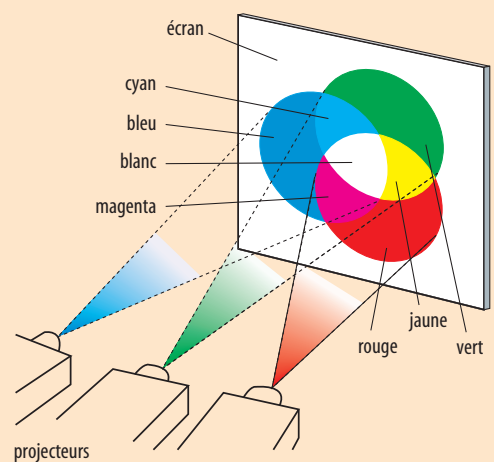
Si le mélange additif de deux couleurs donne de la lumière blanche, alors ces deux couleurs sont **complémentaires**.

On peut mélanger des lumières colorées soit en les projetant de manière superposée sur un écran blanc (voir l'expérience xxx), soit en émettant les lumières sur des surfaces suffisamment petites et rapprochées pour qu'à partir d'une certaine distance, l'œil ne puisse plus les distinguer et les traite comme un mélange (écran de télévision ou d'ordinateur).

La synthèse additive de couleurs soit primaires, soit secondaires, soit complémentaires, donne un **blanc**.

Pour l'œil, la lumière blanche peut être recréée à partir de trois lumières monochromes représentant chacune environ un tiers

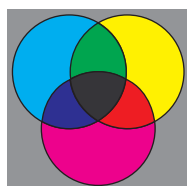
Le schéma ci-dessous représente trois spots lumineux (un vert, un bleu et un rouge) projetés sur un écran blanc de telle manière qu'ils se chevauchent partiellement. Si les longueurs d'onde des lumières ainsi que leurs intensités sont bien choisies, le mélange aura un spectre approchant celui de la lumière du Soleil et paraîtra blanc. Il s'agit ici d'un mélange additif des trois couleurs fondamentales utilisées le plus souvent. On constate que le mélange additif des couleurs complémentaires donne de la lumière blanche.



du spectre des longueurs d'onde visibles : un **bleu** de longueur d'onde 435 nm, un **vert** de longueur d'onde 546 nm et un **rouge** de longueur d'onde 700 nm suffisent. Ces trois lumières colorées permettent, par mélange, de produire une sensation visuelle correspondant aux autres couleurs du spectre visible, ce sont les couleurs primaires de la synthèse additive.

8 La synthèse soustractive

Si on mélange deux peintures colorées, la lumière qui arrivera sur le mélange sera partiellement absorbée par chacune des couches de peinture. On appelle ce phénomène le **mélange soustractif des couleurs**.



La triade primaire jaune-magenta-cyan s'est révélée être optimale dans les arts graphiques pour les techniques d'impression et les émulsions photographiques.

La lumière renvoyée par le mélange sera toujours moins intense que celle renvoyée par chacune des parties du mélange et il serait théoriquement possible d'obtenir de la peinture noire si les absorptions de chacune des substances utilisées étaient parfaitement complémentaires, c'est-à-dire si chacune absorbe exactement ce que les deux autres n'absorbent pas (en pratique le mélange paraît gris-brun foncé).

En mélangeant seulement trois couleurs, on peut trouver une gamme complète des couleurs et même obtenir un noir (en imprimerie par exemple). Elles suffisent pour absorber les longueurs d'onde du spectre solaire visible. Le cyan, le jaune clair et le magenta sont les couleurs primaires de la synthèse soustractive, elles représentent chacune une valeur moyenne de deux tiers des longueurs d'onde visibles.

Le ballon de plage classique avec des tranches de couleur les plus vives possible permet une expérience très simple et très spectaculaire. Il s'agit, après avoir obscurci la salle, de plaquer une torche électrique contre la tranche blanche du ballon ; dans ces conditions, le ballon apparaît illuminé de l'intérieur avec les couleurs correctes.

En faisant glisser la torche sur les autres tranches de couleur (en particulier la rouge et la bleue), toutes les couleurs du ballon changent par mélange soustractif.

L'expérience est plus spectaculaire si on oriente le ballon de telle manière que toutes les tranches de couleur soient visibles simultanément.

Les couleurs secondaires sont :

- le cyan par mélange du vert et du bleu ;
- le jaune clair par mélange du rouge et du vert ;
- le magenta par mélange du bleu et du rouge.

Trois lumières de ces couleurs permettent de recréer un blanc. Toutes les nuances obtenues par un mélange de deux couleurs primaires sont considérées comme secondaires.

Exemples de couleurs complémentaires, l'une primaire, l'autre secondaire :

- le rouge et le cyan ;
- le vert et le magenta ;
- le bleu et le jaune clair.



Présentation de l'expérience.



Eclairage de la tranche bleue.



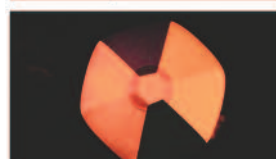
Eclairage de la tranche jaune.



Eclairage de la tranche verte.



Eclairage de la tranche orange.



Eclairage de la tranche rouge.



Eclairage de la tranche blanche.

1 Anomalies de la vision des couleurs

Le **daltonisme**, ou incapacité plus ou moins prononcée de distinguer les couleurs, est répandu. 8 % des hommes et 2 % des femmes accusent des anomalies dans la vision des couleurs. La cécité complète pour les couleurs (achromatopsie) est très rare, et le daltonisme pour le rouge et le vert n'est pas souvent total. En revanche, on rencontre fréquemment une cécité partielle pour ces deux couleurs. A cet égard, il convient de distinguer deux groupes :

- dans la **protanopie** (cécité pour le rouge), la partie visible du spectre est raccourcie, le bleu-vert et ses couleurs complémentaires en rouge apparaissent comme des tons gris indéniables ;

- dans la **deutéranopie** (cécité pour le vert), la partie visible du spectre n'est pas raccourcie, mais le vert et ses couleurs complémentaires en violet apparaissent comme des tons gris.

Les tableaux de test du Professeur Ishihara permettent de constater de façon rapide et sûre les lacunes dans la faculté de distinguer les couleurs, et de déterminer s'il s'agit d'un daltonisme complet, d'une cécité partielle pour le rouge et le vert, d'une protanopie ou d'une deutéranopie.

Les mêmes résultats peuvent être obtenus avec les tableaux de K. Velhagen.

Quelques exemples du test du Professeur Ishihara :

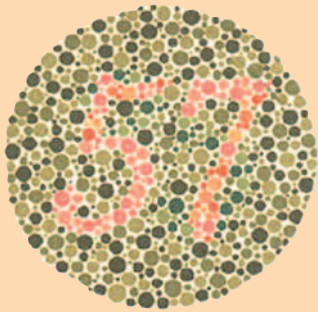


Table n° 5

Vision normale : 57.
Déficiência rouge-vert : 35.



Table n° 8

Vision normale : 15.
Déficiência rouge-vert : 17.

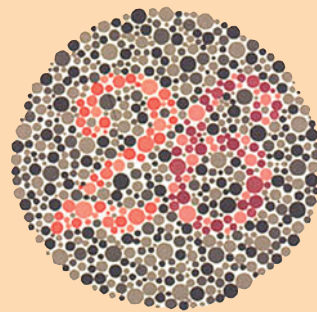


Table n° 22

Vision normale : 26.
Protanopie ou protanomalie forte :
seulement 6.
Deutéranopie et deutéranomalie
grave : seulement 2.

2 La sensibilité aux couleurs

Les couleurs, celle de la lumière qui nous éclaire ou celles des objets, dépendent de la nature des radiations parvenant à la rétine. Normalement, un être humain peut reconnaître plusieurs milliers de teintes différentes; la distinction de sept couleurs dans le spectre de la lumière blanche est seulement une tradition de notre culture. Par ailleurs, une couleur peut être réalisée soit par radiation pure, soit par divers mélanges de radiations: la même couleur peut donc correspondre à un grand nombre de réalités physiques différentes.

Un objet coloré, placé dans le noir, puis éclairé avec une lumière blanche d'intensité croissante, paraît d'abord gris; lorsque l'intensité lumineuse est plus élevée, nous le voyons avec des couleurs. Il existe donc un seuil chromatique, qui est d'ailleurs différent selon les couleurs, mais qui, pour toutes, est plus élevé que le seuil de perception en blanc et noir.

Mécanisme de la vision des couleurs

L'absence de couleurs aux faibles éclairagements ainsi que l'extension des champs de vision des couleurs permettent d'affirmer que la vision des couleurs est due aux cônes.

Il existe trois sortes de cônes ayant leur sensibilité maximum pour trois longueurs d'onde particulières qui correspondent aux trois couleurs fondamentales (bleu, vert, rouge). L'action de la lumière sur chacune des trois sortes de cônes dépend des longueurs d'onde qu'elle contient, et les messages issus de l'ensemble de ces cônes déterminent la sensation de couleur. Cette théorie trichromatique est solidement appuyée sur des résultats expérimentaux.

La théorie trichromatique est confirmée par l'interprétation qu'elle permet des anomalies de la vision des couleurs: achromatopsie ou cécité pour les couleurs (affection très rare; les personnes qui en sont atteintes ne voient dans le monde que des différences de luminosité ou d'éclairement) et daltonisme. Sous sa forme la plus répandue, le daltonisme consiste dans la confusion du rouge et du vert. Cette vision appauvrie des couleurs semble s'expliquer par l'absence dans la rétine d'une des catégories de cônes.

La rétine, véritable récepteur sensoriel de la vision

La première structure qui participe à la perception des couleurs par le cerveau est constituée des cônes de la rétine. Trois types de cônes existent, classés en fonction du spectre d'absorption de leur pigment (pigment sensible au bleu, au vert au rouge).

Si le traitement visuel de la couleur s'en tenait aux messages fournis par les cônes, nous ne serions capables de percevoir que ces trois couleurs, alors que nous pouvons en distinguer entre 17 000 et 20 000. Cette faculté nous est donnée par tout le circuit rétinien qui reçoit les informations provenant des cônes et les transforme avant de les transmettre au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique.

Un cône répond à la lumière par une décharge électrique qui est proportionnelle à la quantité de lumière qui lui parvient. Lorsque la couleur de la lumière envoyée est rouge et que le cône est sensible au rouge, on enregistre une réponse; quand la lumière est bleue, cette cellule ne répond pas.

Les cellules ganglionnaires de la rétine (dont les prolongements forment le nerf optique) réagissent très différemment lorsqu'une lumière rouge parvient à une cellule ganglionnaire, celle-ci répond par une excitation (décharge électrique). Si l'on déplace légèrement ce faisceau lumineux, la cellule répond au contraire par une inhibition (arrêt de la petite décharge électrique émise spontanément).

On détecte ainsi, pour chaque cellule ganglionnaire, un cercle à l'intérieur duquel la cellule est excitée par le rouge et une région périphérique, où au contraire elle est inhibée par le rouge. A l'intérieur du premier cercle, une lumière verte provoque inhibition tandis qu'en périphérie, elle entraîne une excitation. Ces deux régions constituent le champ récepteur de la cellule ganglionnaire: la région qui est excitée par le rouge est inhibée par le vert et celle que stimule le vert ne répond pas au rouge. A l'opposé des cônes qui codent une seule couleur, les cellules ganglionnaires répondent à deux couleurs. Il existe plusieurs types de champs récepteurs; on en décrit deux grandes classes: les champs «rouge-vert» et les champs «bleu-jaune». Parmi les premiers, on distingue des champs «centre excité par le rouge-périphérie excitée par le vert» (c'est le cas du champ décrit précédemment) et d'autres «centre excité par le vert-périphérie excitée par le rouge».

Cet antagonisme de couleur est caractéristique des champs récepteurs des cellules ganglionnaires ; chaque cellule ganglionnaire est connectée, par l'intermédiaire des cellules bipolaires, avec plusieurs cônes. Dans le cas des champs « rouge-vert », le schéma est relativement simple puisqu'il existe des cônes sensibles au rouge et d'autres au vert. Pour les champs « bleu-jaune », l'organisation est plus complexe car la cellule ganglionnaire de ce type est connectée d'un côté aux cônes sensibles au bleu et de l'autre à un groupe de cônes sensibles au vert et au rouge. Ce groupe est arrangé de façon à ce que le maximum de réponses apparaissent avec une stimulation jaune, dont la longueur d'onde est située entre celles du vert et du rouge. On retrouve cette organisation fonctionnelle des cellules ganglionnaires chez l'ensemble des primates. Elle existe aussi chez certains rongeurs comme l'écureuil, animal qui a une extraordinaire perception des couleurs car 90 % de ses photorécepteurs sont des cônes. Le chat, animal se déplaçant souvent la nuit, mais capable de reconnaître les couleurs, en est également pourvu.

Pourquoi une organisation si compliquée ? Pour permettre la détection de milliers de couleurs. En effet une couleur que nous choisissons orangée (vers 590 nanomètres), projetée sur la rétine, excite la partie centrale sensible au rouge d'une cellule ganglionnaire. Dans le même temps cette longueur d'onde excite modérément les cônes verts et diminue la réponse du centre du champ de la cellule ganglionnaire, puisque ce centre est activé par le rouge et inhibé par le vert. L'effet est exactement inverse sur la périphérie. La combinaison de ces deux phénomènes entraîne une réponse de la cellule ganglionnaire très spécifique qui correspond à une tonalité précise que notre cerveau est capable de reconnaître. Ainsi, avec un nombre raisonnable de cellules ganglionnaires « vert-rouge » et « bleu-jaune », ayant un antagoniste de couleur différent les unes des autres, on peut couvrir ces quelque 20 000 teintes que l'œil perçoit.

J.-P. Nordmann

Institut de recherche en ophtalmologie, Hôpital Saint-Antoine, dans « Pour la science » N° 138, avril 1989