

PASSER PAR TOUTES LES COULEURS

Du 13 mars au 13 juillet 2018

Vinciane de Bergeyck

Avec le soutien de la



Wallonie



Service public
de Wallonie



FÉDÉRATION
WALLONIE-BRUXELLES



Sciences.be
Réseau Scité



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



CONFLUENT
des SAVOIRS



UNIVERSITÉ
DE NAMUR

Types de sources lumineuses

Pour voir les couleurs, les formes et les mouvements des objets, il faut qu'ils soient éclairés. Il y a deux types de sources qui émettent de la lumière : les chaudes et les froides.

Sources chaudes

Des objets présentant des températures très élevées (plus de 500°C) émettent de la lumière visible.

La couleur de la source lumineuse dépend de la température. Elle varie du rouge orangé de la flamme d'une bougie (1.850 K ou 1.577°C) au bleuté d'un arc électrique (9.000 K ou 8.727°C).



Soleil



Lave des volcans



Feu



Bougies



Lampe avec une ampoule à filament



Arc électrique

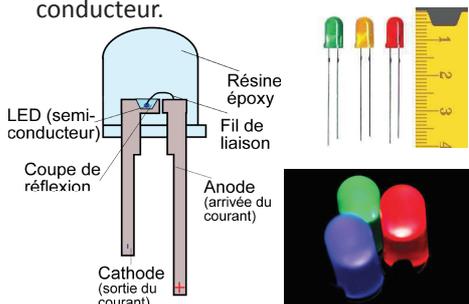
Sources froides

Certains éléments émettent de la lumière lorsqu'ils ont absorbé de l'énergie suite à une excitation électrique, chimique, lumineuse, biologique ou autre. Le mode d'excitation est indiqué par le préfixe adjoint au mot luminescence : électro-, chimi-, photo-, bio-,...

La température ne joue pas de rôle dans ces processus.

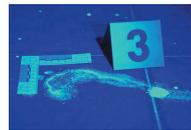
Electroluminescence

Dans les lampes LED (Light-Emitting Diode, ou diode électroluminescente en français), la lumière est produite par le passage de l'électricité dans un semi-conducteur.



Chimiluminescence

La police scientifique utilise le luminol pour détecter les traces de sang sur des scènes de crime.



Cette substance produit de la lumière bleue en présence d'eau oxygénée. Le fer, contenu dans le sang, rend la réaction immédiate et détectable.

Photoluminescence

Certains objets émettent de la lumière lorsqu'ils sont éclairés.

- ♦ Soit immédiatement (1),
- ♦ soit après et plus longtemps (2).

1 : Fluorescence

De l'encre invisible est employée lors de la fabrication des billets de banque. Elle émet de la lumière lorsqu'elle est exposée aux rayons ultra-violets (UV).

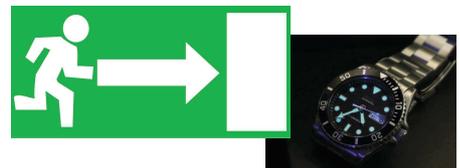


Les tubes fluorescents contiennent, le



plus souvent, du mercure à l'état gazeux. Sous l'action de décharge électrique, il émet de la lumière UV. Celle-ci est absorbée par une poudre à base de sel de phosphore qui couvre la paroi du tube. Cette substance produit alors de la lumière fluorescente.

2 : Phosphorescence



Des matières phosphorescentes sont utilisées sur les pictogrammes de sécurité ainsi que sur les aiguilles et les heures d'un cadran de montre.

Bioluminescence



L'émission de lumière par les lucioles (*Photinus pyralis*) et certains champignons (*Mycena chlorophos*) est provoquée par la réaction entre une protéine, la luciférase, et une enzyme, la luciférase.

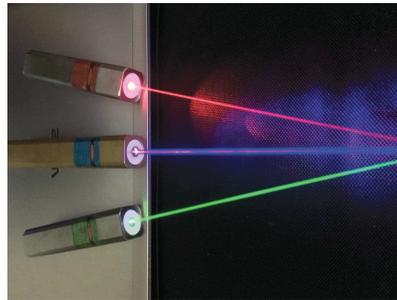
Propriétés de la lumière

Propagation

L'air, l'eau, le verre,... sont des milieux qui permettent une propagation efficace de la lumière car ils sont transparents.

Lorsque le milieu a la même composition et les mêmes caractéristiques (dont la température) partout, la lumière se déplace en ligne droite.

Par convention, pour représenter le chemin suivi par un rayon lumineux, on trace une flèche indiquant le sens de propagation.

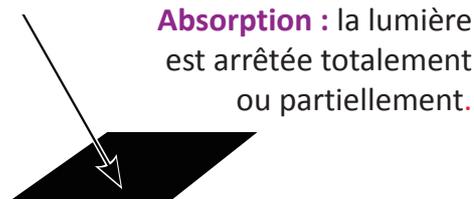


Lorsqu'un objet opaque est éclairé par une source de lumière, les zones situées derrière ne reçoivent pas de lumière et sont sombres.

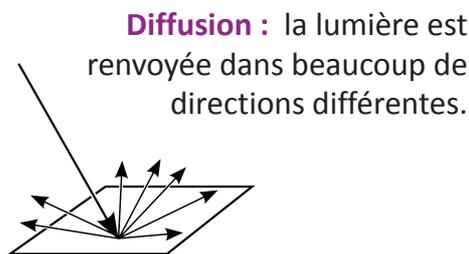
On parle d'**ombre propre** pour la partie non éclairée de l'objet et d'**ombre portée** pour les surfaces qui ne sont pas exposées à la lumière à cause de l'objet.

Interaction avec la matière

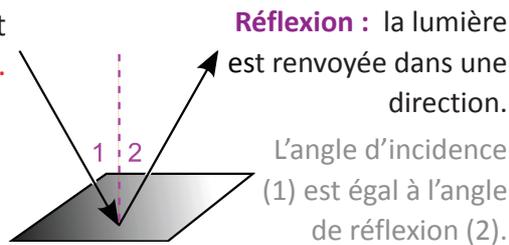
Lorsque la lumière atteint un nouveau milieu, plusieurs phénomènes peuvent se passer selon la nature et l'aspect de ce dernier.



Absorption : la lumière est arrêtée totalement ou partiellement.

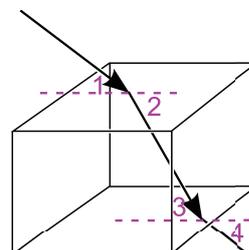


Diffusion : la lumière est renvoyée dans beaucoup de directions différentes.



Réflexion : la lumière est renvoyée dans une direction.

L'angle d'incidence (1) est égal à l'angle de réflexion (2).



Réfraction : la lumière change de direction lorsqu'elle traverse un objet qui n'est pas opaque.

L'amplitude de la déviation dépend des **indices de réfraction** des milieux rencontrés. Ils varient en fonction de leur densité, leur température,...

Diffraction et interférences

Lorsque la lumière passe dans des ouvertures minuscules, on ne voit pas la forme de l'orifice. La lumière est diffractée et on observe alors des figures d'interférences.



Fente



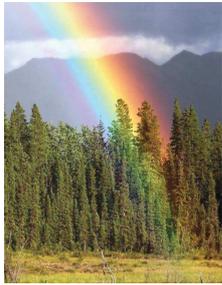
Trou carré



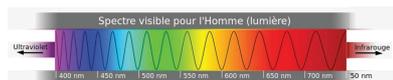
Il peut y avoir diffraction par transmission ou réflexion de la lumière. Lorsque la surface de l'objet diffractant présente une structure périodique, on obtient des propriétés très intéressantes.

Ce point sera abordé dans la partie dédiée aux couleurs.

Décomposition



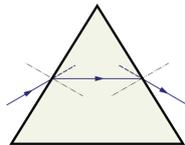
Le soleil émet de la **lumière blanche**. Lorsqu'elle traverse des gouttes d'eau, elle est décomposée et forme un **arc-en-ciel**. On observe plusieurs couleurs allant du violet au rouge.



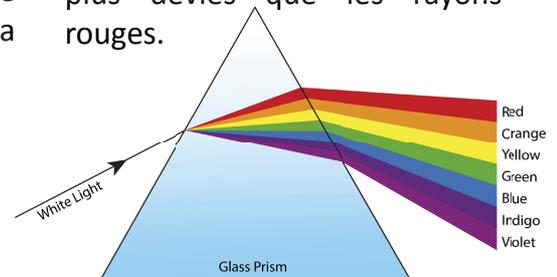
En 1666, Isaac Newton a reproduit ce phénomène à l'aide d'un **prisme** en verre.



Le schéma ci-dessous montre le trajet suivi par la lumière : il y a 2 réfractions successives.

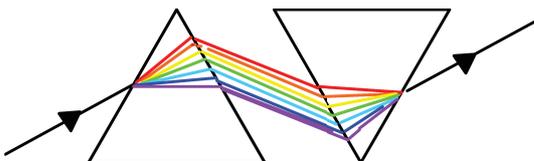


La décomposition de la lumière est due au fait que l'**indice de réfraction** dépend du milieu traversé mais aussi de la longueur d'onde de la lumière (cette notion est expliquée dans la partie « nature de la lumière »). Il augmente quand la longueur d'onde diminue. C'est le cas lorsque l'on passe du rouge au violet. Les rayons violets sont plus déviés que les rayons rouges.



Synthèse additive

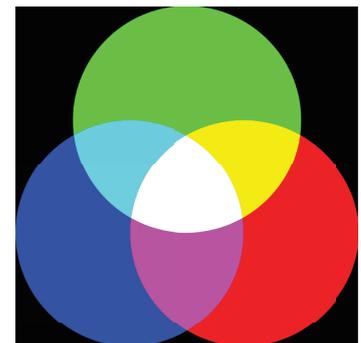
Newton a réalisé une autre expérience : il a recomposé la lumière blanche. Pour cela, il a utilisé deux prismes identiques et les a positionnés en sens inverse l'un de l'autre. Le premier décompose la lumière et le second a l'effet opposé.



Par la suite, on s'est servi de **sources lumineuses colorées** pour obtenir de la lumière blanche. Différentes combinaisons ont été testées. Cela a permis de montrer que seulement trois couleurs de l'arc-en-ciel étaient suffisantes : le rouge, le vert et le bleu (RVB ou RGB en anglais). On les appelle les **couleurs primaires**.

Combinées 2 à 2, elles forment les **couleurs secondaires** : le jaune, le cyan et le magenta.

Le jaune est **complémentaire** du bleu, le cyan du rouge et le magenta du vert. En mélangeant une couleur et sa complémentaire, on génère du blanc.



Ceci concerne, notamment, les mélanges de couleurs d'origine lumineuse :

- ◇ Télévisions,
- ◇ Écrans d'ordinateurs,
- ◇ Scanners,
- ◇ Appareils photo numériques

Nature de la lumière

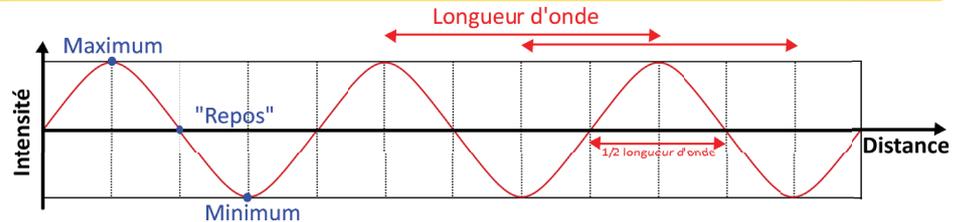
La lumière est à la fois un phénomène ondulatoire et un phénomène corpusculaire.

Caractéristiques d'une onde

Une **onde** est une perturbation qui se déplace. Elle transporte de l'énergie mais pas de matière.



Lorsque l'on jette un caillou dans un étang, l'énergie du projectile est transmise à l'eau. Celle-ci s'abaisse et se soulève. Des vagues concentriques se forment à partir de l'impact. Une **onde mécanique** a été générée.



Lorsque la perturbation se répète à intervalles de temps réguliers, on parle d'**onde périodique**. Plusieurs phases se reproduisent, elles forment un **cycle**.

Les ondes sont décrites par plusieurs caractéristiques.

♦ L'**amplitude** (A) est l'écart entre les valeurs extrêmes de l'onde par rapport à sa position de repos (du maximum au minimum).

♦ La **longueur d'onde** (λ) est la distance entre 2 maxima (ou minima) consécutifs.

♦ La **période** (T) correspond au temps nécessaire pour parcourir une longueur d'onde.

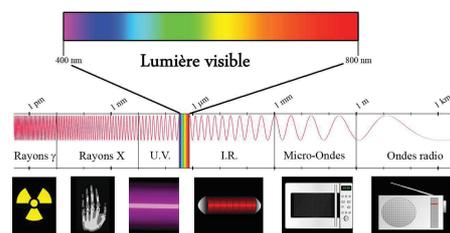
♦ La **fréquence** (f) est égale au nombre de cycles complets effectués par unité de temps.

Onde électromagnétique

La particularité des ondes électromagnétiques est qu'elles n'ont pas besoin de matière pour se propager. Elles sont le résultat de vibrations couplées d'un champ électrique et d'un champ magnétique.

La lumière visible n'est qu'une toute petite partie des ondes électromagnétiques.

Les différentes catégories d'ondes nous sont familières comme le montre la figure ci-dessous.



La quantité d'énergie transportée par les ondes dépend de leur fréquence. Lorsque celle-ci est très élevée, les ondes présentent un danger pour la santé.

C'est le cas pour les rayons γ (radioactifs), les rayons X et UV qui peuvent provoquer des dommages à l'ADN.

Quanta et photons

L'énergie de la lumière est divisée en unités appelées quanta (quantum au singulier).

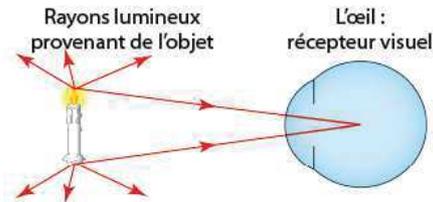
Les quanta sont associés à des particules appelées photons.

Celles-ci ont des masses nulles et n'ont pas de charge électrique.

La vue chez l'Homme

La vue

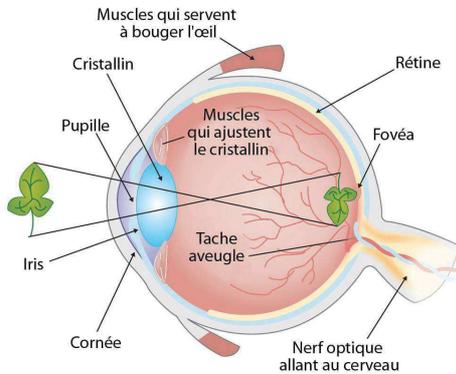
La **vue** est le sens qui permet d'observer et d'analyser l'environnement à distance au moyen des **rayonnements lumineux**.



L'**œil** est l'organe de la vue, mais la **vision** nécessite également l'intervention de zones spécialisées du **cerveau** qui analysent et synthétisent les informations collectées.

L'œil

Description



Les rayons lumineux réfléchés par l'**objet que l'on regarde** passent notamment par

- la **cornée** qui est une couche protectrice,
- la **pupille** qui s'ouvre plus ou moins en fonction de l'intensité lumineuse et
- le **cristallin**, une **lentille**, qui fait converger les rayons lumineux sur la **rétine**. Des muscles permettent au cristallin de changer de forme en fonction de la distance de l'objet. Si l'objet est près, le cristallin se bombe. Si l'objet est lointain, il s'aplatit. C'est l'**accommodation**.

La rétine est la partie située au fond de l'œil. Elle est sensible à la lumière. C'est là que se forme l'**image inversée** de l'objet regardé.

Les informations reçues sont transmises au cerveau par le **nerf optique**.

Analogie

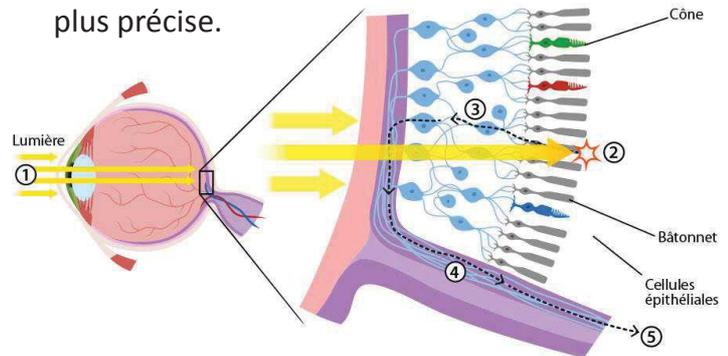
Certaines parties de l'œil sont comparables à celles d'un appareil photographique :

Oeil	Appareil photo
Iris	Diaphragme
Pupille	Ouverture
Cornée et Cristallin	Objectif
Accommodation	Mise au point
Rétine	Capteur ou pellicule
Nerf optique	Câbles

La rétine

La rétine présente 2 zones particulières :

- la **tache aveugle** qui correspond à l'extrémité du nerf optique et
- la **fovéa** qui est centrale et permet la vision la plus précise.



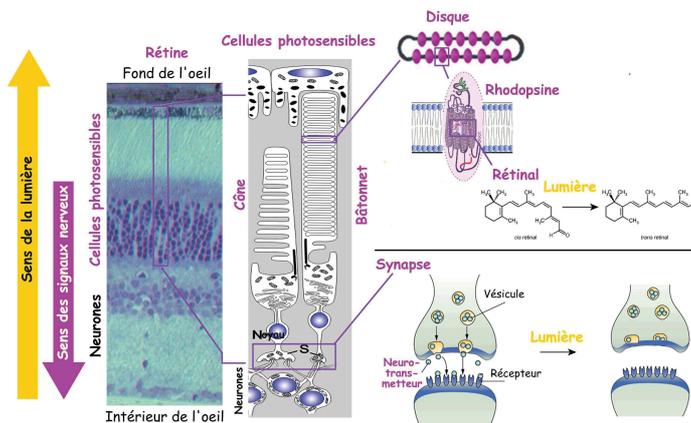
La rétine contient des cellules sensibles à la lumière (1). Ce sont les **photorécepteurs**. Il y en a 2 sortes : 5 millions de **cônes** et environ 120 millions de **bâtonnets**. Ils captent les signaux lumineux et les transforment en **signaux chimiques** (2).

La rétine comporte également des **neurones** qui transforment les signaux chimiques en **signaux électriques** (3). Ceux-ci sont transmis par le nerf optique (4) au cerveau (5).

Les cellules photosensibles

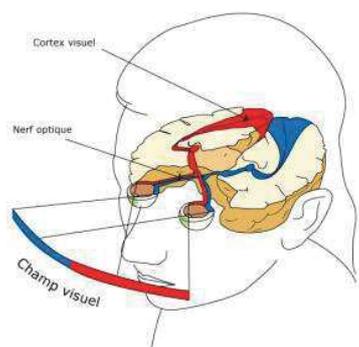
Les bâtonnets : vision nocturne

Ils constituent près de 95% des cellules **photoréceptrices** de la rétine. Ils sont 1.000 fois plus sensibles à la lumière que les cônes. Ils permettent la vision en noir, blanc et nuances de gris lorsqu'il y a une faible luminosité.



La partie externe des bâtonnets présente un long segment cylindrique avec de très nombreux **disques**. C'est là que se trouvent **les rhodopsines**. Ces molécules sont composées d'une protéine, appelée **opsine**, et d'une molécule de **rétilnal** qui est capable d'absorber la lumière. Chaque bâtonnet en contient 100 millions.

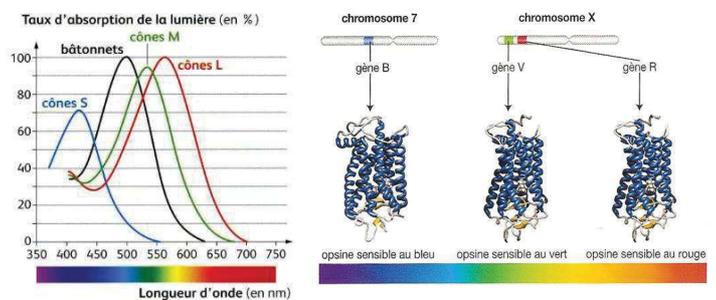
Quand la lumière atteint le rétilnal, il change de forme ce qui provoque une cascade de réactions chimiques qui modifie la sécrétion des **neurotransmetteurs** au niveau des **terminaisons synaptiques** des bâtonnets. Ce **signal** est transmis aux neurones de la rétine puis au cerveau et conduit à une **perception visuelle**.



Les cônes : vision des couleurs

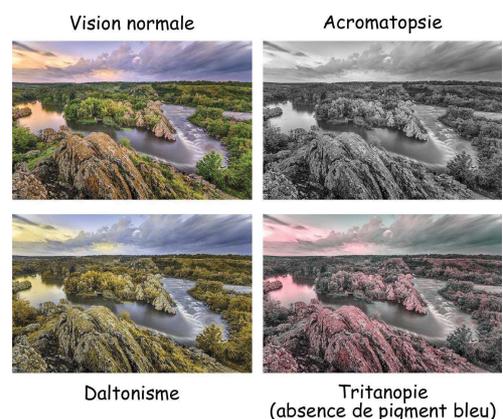
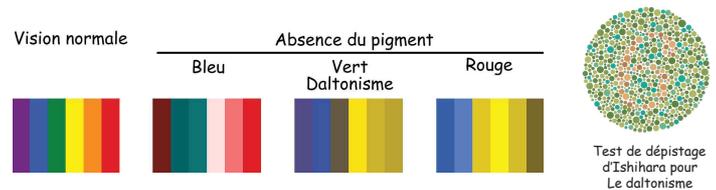
Les cônes ne représentent que 5 % du total des photorécepteurs. Ils sont principalement localisés sur la **fovéa**, au centre de la rétine.

Ces cellules permettent la vision des couleurs pendant la journée. L'être humain perçoit une immense variété de couleurs différentes pourtant il ne possède que trois types de cônes sensibles à des ondes lumineuses de **différentes longueurs d'onde** (voir le poster « Nature de la lumière »).



La fonction des cônes est de convertir l'énergie lumineuse en signaux électriques. Ceci se fait grâce à l'**iodopsine**. Cette molécule est composée d'une protéine de la classe des **opsines** et de **rétilnal**. Les **gènes** codant pour ces différentes opsines sont situés sur les **chromosomes** 7 et X.

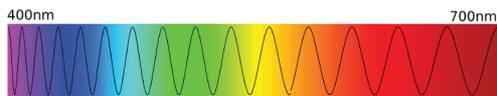
Des **altérations** peuvent modifier ces gènes et affecter la perception des couleurs.



Qu'est ce que la couleur?

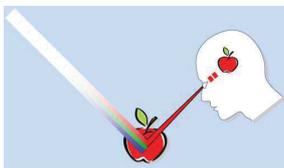
Définition

C'est la **perception visuelle** d'un **organisme vivant** produite par des rayons lumineux réfléchis, diffusés ou transmis par un corps ou émis par une source. Toutes ces notions sont expliquées dans les posters « Propriétés de la lumière » et « Nature de la lumière ».



Perception visuelle

Les couleurs n'ont pas d'existence propre. Ce sont des **sensations** du **cerveau** perçues lorsque de la lumière atteint les **cônes**, cellules photosensibles, de la rétine de nos yeux. Ceci est développé dans les posters « La vue chez l'Homme » et « Les cellules photosensibles ».



La couleur d'un objet dépend :

1. de la nature de la lumière qui l'éclaire,
2. de ses particularités et
3. des caractéristiques de l'œil et du cerveau de l'observateur.

Types de couleurs

La première distinction à effectuer entre les couleurs, du point de vue de leur origine, est de séparer :

1. les couleurs provenant d'une émission de lumière colorée et
2. les couleurs résultant d'une interaction de la lumière avec la matière.

Sources lumineuses colorées

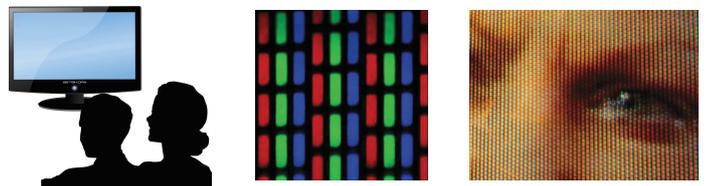
Dans ce cas, la couleur ne dépend que de l'observateur et de la lumière émise. Le poster « Types de lumière » présente les différentes sources de lumières qui existent.

Certaines sources lumineuses sont naturelles, d'autres ont été créées par l'être humain.



Au quotidien, les écrans de téléphone, ordinateur, tablette et téléviseur sont omniprésents.

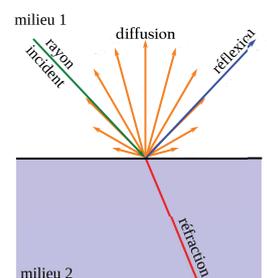
Les couleurs y sont obtenues par synthèse additive de trois couleurs primaires : rouge, vert et bleu (voir le poster « Lumière blanche »). Ceci forme sur l'écran une mosaïque trop petite que pour être aperçue.



Interactions lumière - matière

Lorsque la lumière rencontre de la matière, elles interagissent et la lumière est modifiée. Le poster « Propriétés de la lumière » montre ces changements.

Lorsque l'aspect coloré est dû à l'absorption par l'objet de certaines longueurs d'onde, on parle de **couleurs pigmentaires**. Dans les autres cas, on parle de **couleurs physiques**.



Couleurs pigmentaires

La plupart des couleurs que nous observons dans la nature sont dites pigmentaires : elles sont liées à la présence de **pigments** et/ou de **colorants** sur et/ou dans l'objet.

Pigments & colorants

Les **pigments** sont des substances chimiques colorantes **insolubles** dans le milieu où on les disperse. Généralement, ce sont des poudres fines. Pour assurer l'adhérence d'un pigment sur un support, on le mélange avec un **liant**.

Les **colorants** sont des substances **solubles** dans le milieu qu'elles colorent.

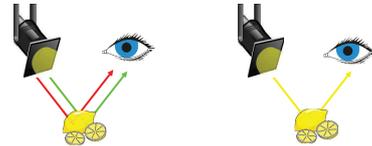


Longueurs d'onde & couleurs

A chaque longueur d'onde correspond une couleur. Par contre, l'inverse n'est pas toujours vrai.

La sensation de jaune peut être générée :

- ♦ soit par la synthèse additive de deux sources lumineuses : l'une rouge et l'autre verte,
- ♦ soit par une lumière jaune.



Lumières colorées & couleurs

Un même objet présente des couleurs différentes suivant la composition de la lumière qui l'éclaire.



Le filtre rouge ne laisse passer que la lumière rouge. Celle-ci est réfléchiée par la pomme et perçue par l'œil. La pomme est vue rouge.

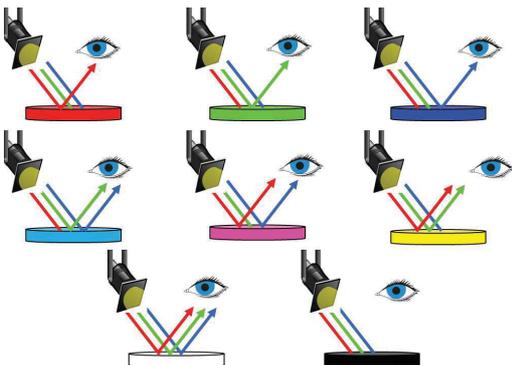
Le filtre vert permet à la lumière verte de le franchir. La pomme rouge absorbe le vert. L'œil ne reçoit rien. La pomme apparaît noire.

Origine des sensations colorées

Les pigments et les colorants donnent de la couleur aux corps dans et/ou sur lesquels ils sont présents :

- ♦ en **absorbant** certaines longueurs d'onde de la lumière blanche qui les éclaire et
- ♦ en **réfléchissant** d'autres.

Les ondes réfléchies correspondent à la couleur perçue par notre œil.



Longueurs d'onde absorbées

L'énergie absorbée est, généralement, restituée sous forme de chaleur en rayonnement infrarouge invisible à l'œil. Ceci explique qu'un objet noir sera plus chaud au soleil qu'un objet blanc.

Pigments et colorants

De nos jours, on trouve des pigments naturels et synthétiques. En ce qui concerne les pigments naturels, leur origine peut être géologique, animale ou végétale.

Géologique

L'utilisation d'ocre (oxyde de fer) jaune, rouge ou brune et d'oxyde de manganèse (noir) remonte à la Préhistoire.



Par la suite, des pierres dures sont broyées pour obtenir d'autres pigments. Quelques minéraux étaient couramment utilisés. De la gauche vers la droite : de l'orpiment, du cinabre, de la malachite et de l'azurite.



Animale

Les pigments naturels d'origine animale sont moins fréquents.

La cochenille est un insecte qui vit sur des cactus et produit de l'acide carminique qui le protège des prédateurs. C'est à partir de cette substance qu'on obtient un pigment rouge foncé et vif appelé carmin. Le murex est un coquillage qui produit un mucus transparent qui devient pourpre lorsqu'il est exposé à l'air. La seiche est un mollusque qui produit un liquide noir appelé sépia.



Végétale

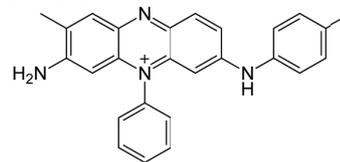
Les racines de la garance produisent un colorant rouge vif. Les feuilles de l'indigotier (arbuste) sont utilisées pour la préparation de la teinture d'indigo (bleu foncé). La résine provenant du mangoustan morellier (arbre) donne du jaune (gomme-gutte).

Le noir de carbone provient de la combustion incomplète de végétaux.



Synthèse

En 1856, William Perkin découvre, par hasard, le premier pigment fabriqué « par voie synthétique » : la mauvéine.



De nombreux autres pigments ont ensuite été synthétisés. Ils offrent plusieurs avantages par rapport aux pigments naturels. Ils sont meilleur marché et plus faciles à produire en grande quantité. Une multitude de nouveaux colorants est apparue et a permis d'étendre la palette des couleurs.

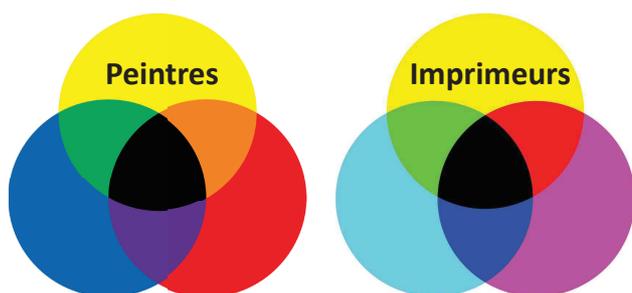
Clés des couleurs chimiques

Synthèse soustractive

Les règles qui régissent les compositions de couleurs à partir de peintures, d'encre, de pigments,... sont complètement différentes de celles utilisées pour générer des couleurs à partir de lumières colorées. Celles-ci sont décrites dans la partie synthèse additive du poster dédié à la lumière blanche. Ces synthèses sont opposées. Les couleurs primaires d'un système correspondent aux couleurs secondaires de l'autre et vice-versa.

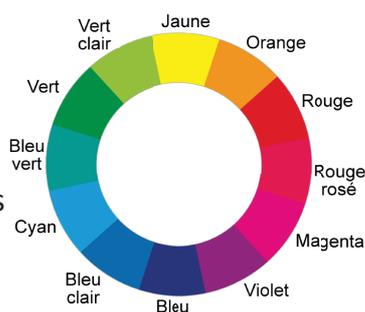
Couleurs primaires & secondaires

Trois couleurs permettent d'obtenir toutes les autres par mélange. Elles sont appelées **couleurs primaires**. Les peintres prennent du jaune, du rouge et du bleu. Les imprimeurs emploient du jaune, du magenta et du cyan. En mélangeant deux couleurs primaires, on obtient une **couleur secondaire**. Avec les trois couleurs primaires, on génère du noir ou, plutôt, du gris foncé. Cette couleur est également créée en combinant une couleur primaire et la couleur secondaire qui lui fait face. Ces **couleurs sont complémentaires**.

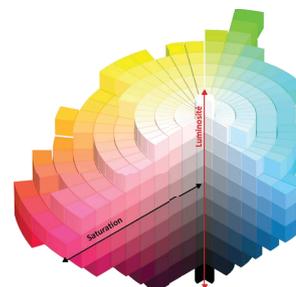
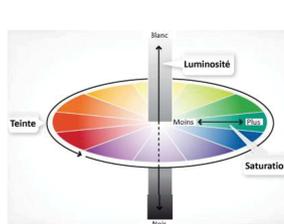


Cercle chromatique

Lorsqu'on mélange une couleur primaire et une couleur secondaire adjacente, on obtient une **couleur tertiaire**. Celles-ci sont les mêmes en synthèse soustractive et additive.



Classification des couleurs



Munsell a été l'un des premiers à classer les couleurs selon trois critères.

Teinte

Elle permet de distinguer les sensations colorées. Les teintes **monochromatiques** correspondent à une seule longueur d'onde. Elles sont dites **pures** et sont réparties sur la circonférence d'un cercle. On parle de couleurs saturées. Entre les couleurs extrêmes du spectre visible, le rouge et le violet, des couleurs ont été ajoutées. Elles sont issues d'un mélange : bleu et rouge pour le magenta.

Saturation

Elle décrit la **pureté** d'une couleur : **vive** quand la saturation est élevée et **terne** quand elle est peu saturée. Les couleurs saturées à 100% ne se rencontrent pas dans la nature ni dans notre environnement quotidien. On « désature » une couleur en ajoutant du blanc, du gris, du noir ou sa couleur complémentaire.

Luminosité

Elle mesure l'**éclat** d'une couleur. Plus la luminosité est élevée, plus la lumière est **claire**. Plus la luminosité est faible, plus la couleur est **sombre**."

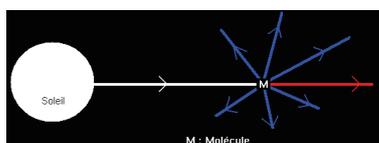
Nombre de couleurs

Un individu « normal » différencie 150 teintes. Si on modifie la saturation, l'œil distingue 25.000 couleurs. Enfin, si on ajoute des variations de clarté, on a 300.000 couleurs perceptibles par l'œil. C'est loin des 16 millions de couleurs dont parlent les fabricants d'écrans.

Origine de la coloration

Dans certains cas, la perception de la couleur n'est pas due à la présence de pigments. Elle est causée par des interactions entre la lumière et la **structure** microscopique des objets regardés.

Diffusion sélective



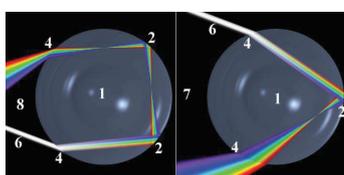
Lorsque les rayons lumineux du soleil traversent l'atmosphère, ils rentrent en collision avec les molécules de l'air. Celles-ci diffusent les différentes longueurs d'onde dans toutes les directions mais pas avec la même efficacité. Le bleu est diffusé jusqu'à 16 fois plus que le rouge. C'est ce qui explique que le ciel paraît bleu.

Réfraction

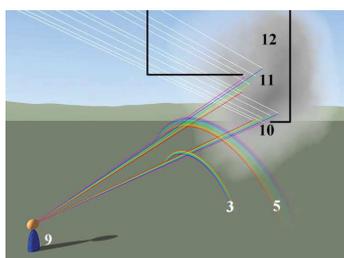
Lorsqu'il y a à la fois de la pluie (12) et du soleil, deux arcs-en-ciel se forment. L'ordre des couleurs est différent. L'observateur (9) ne voit pas toujours le grand arc.



Les rayons du soleil (6) sont réfractés (4) et réfléchis (2) une ou deux fois dans les gouttes d'eau (1).



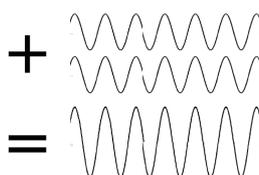
Lorsqu'il y a deux réflexions (8 & 11), on obtient le grand arc (5). Quand il n'y en a qu'une (7 & 10), le petit arc (3) est généré. Il est alors plus intense.



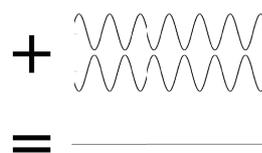
Interférence

Ce phénomène se produit lorsque deux ondes de même fréquence interagissent de manière constructive ou destructive. L'amplitude de la perturbation résultante est la somme des amplitudes des deux ondes.

INTERFERENCE CONSTRUCTIVE



INTERFERENCE DESTRUCTIVE



Couche mince

Il s'agit d'une couche dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière visible : quelques centaines de nanomètres.

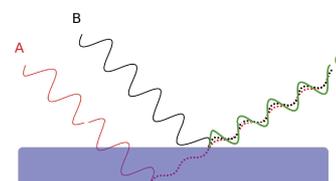
C'est le cas des bulles de savon et des flaques d'huile ou d'essence sur la route. Lorsqu'elles sont éclairées, les couleurs de l'arc-en-ciel apparaissent. Ce phénomène est appelé **irisation**. Les couleurs changent selon l'angle de vue ou d'illumination, c'est l'**iridescence**.



L'irisation n'est pas due à une décomposition de la lumière mais à des **interférences**.

Celles-ci se produisent entre les rayons lumineux qui se sont réfléchis sur la face supérieure du film (rayon B) et ceux qui en sont ressortis (par réfraction) après avoir fait un ou plusieurs allers et retours à l'intérieur de la pellicule (rayon A). Les rayons interfèrent (C).

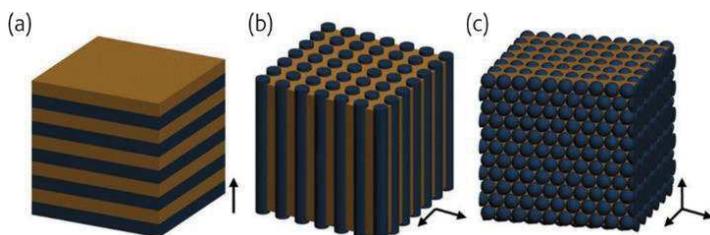
Certaines couleurs sont renforcées et d'autres éteintes. Cela dépend de l'épaisseur du film qui est variable.



Interférence et diffraction

Lorsque des ondes rencontrent un objet ou une ouverture dont la dimension est du même ordre que leur longueur d'onde, elles se dispersent dans toutes les directions (**diffraction**) et interfèrent.

De nombreuses structures présentant une organisation ordonnée et périodique peuvent générer des **couleurs structurales**.



Ces structures sont constituées de deux matériaux transparents qui présentent des indices de réfraction différents. Les flèches à leur droite montrent la direction dans laquelle il existe un changement périodique de l'indice de réfraction. Il y a des structures périodiques à une (a), deux (b) ou trois (c) dimensions; 1D, 2D ou 3D.

Si la périodicité est limitée à la surface d'un objet, la structure est communément appelée un **réseau de diffraction**. Si elle concerne toute la substance, on parle d'un **cristal photonique** (semblable à un cristal minéral, mais avec une période beaucoup plus grande).

Réseau de diffraction



L'information se trouvant sur les disques optiques est enregistrée sur une piste en forme de spirale large d'environ 500 nm. Quand de la lumière illumine cette structure, les couleurs de l'arc-en-ciel apparaissent.

Cristal photonique 1D

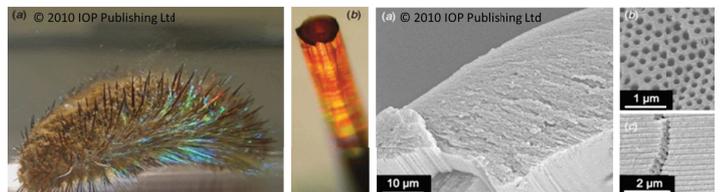


Beaucoup de mollusques produisent de la nacre. Ce matériau biominéral, formé par la superposition de très fines couches de cristaux d'aragonite et de protéines, présente des couleurs irisées.



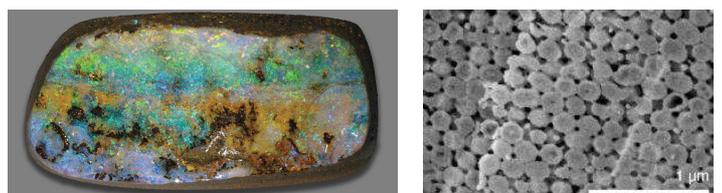
Le *Morpho menelaus* présente une couleur bleue iridescente sur le dessus des ailes. Celle-ci est due à des nanostructures de chitine ressemblant à des sapins de Noël. L'empilement des « branches » est responsable de la couleur bleue.

Cristal photonique 2D



Aphrodita aculeate (1a) est un ver marin dont le corps est couvert de poils irisés. Ceux-ci sont constitués de cylindres hexagonaux creux disposés régulièrement (vue de haut 2b & de côté 2c). Ils sont faits de chitine.

Cristal photonique 3D



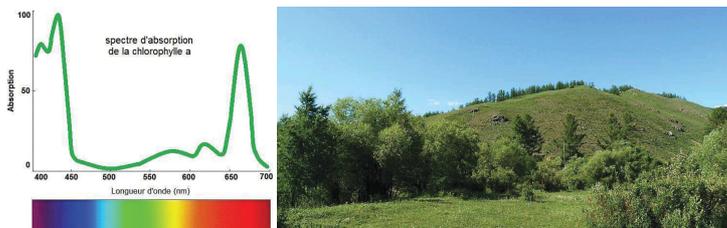
L'opale précieuse renvoie de nombreuses couleurs changeantes. Elle est constituée de sphères de silice ordonnées régulièrement. Lorsque les billes sont disposées au hasard, on a une opale commune qui ne produit pas de jeux de couleurs.

Couleurs des végétaux

Couleurs chimiques

Chez les plantes, la plupart des couleurs sont liées à la présence de pigments.

Chlorophylles



La couleur verte est la plus répandue dans nos contrées.

Elle est due à la présence de chlorophylles.

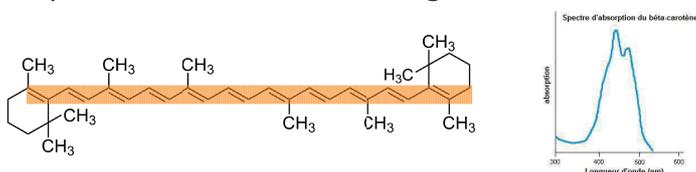
La « chlorophylle a » est la plus importante. Elle absorbe les rayonnements violets et rouges du spectre solaire et réfléchit la lumière verte et jaune. La lumière absorbée sert à la photosynthèse. La lumière réfléchie donne la sensation de couleur verte.



En été, la photosynthèse bat son plein et les chlorophylles masquent les autres pigments. En automne, le rendement de la photosynthèse diminue car les jours raccourcissent et la température est moins élevée. Les chlorophylles sont dégradées et ne masquent plus les autres pigments. Les feuilles changent alors de couleur.

Caroténoïdes

Ce sont des pigments rouges, oranges et jaunes, présents dans un grand nombre d'organismes vivants. Le **carotène**, un des représentants, est responsable de la couleur orange de la carotte.



La présence de plusieurs liaisons conjuguées successives est un facteur déterminant pour qu'une molécule chimique absorbe des longueurs d'onde visibles. Le carotène en possède 11. Elles sont indiquées par un rectangle orange. On observe bien une alternance de doubles liaisons (2 traits parallèles) et de simples liaisons (1 trait) qui permettent d'absorber les longueurs d'onde entre 400 et 500 nm.

Flavonoïdes et anthocyanes

Ces pigments confèrent des couleurs jaunes ou crème. La sous-classe des anthocyanes donne des teintes rouges, roses, bleues, violettes et pourpres. Ces pigments sont présents dans toutes les parties des végétaux : racines, tiges, feuilles, fleurs, pollens, fruits, graines, bois...



La couleur conférée par les anthocyanes change, notamment, avec l'acidité du milieu. Ainsi la couleur des myosotis passe du bleu au rose lorsque les fleurs sont atteintes par les jets d'acide formique produits par les fourmis.



Couleurs physiques



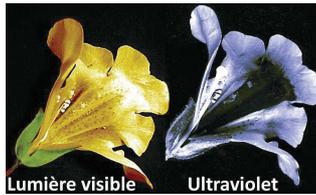
La couleur bleu-métallique intense des baies de *Pollia condensata* est due à la structure de son enveloppe. Elle est constituée d'un empilement hélicoïdal de couches de fibres de cellulose.

Couleurs des animaux

Percevoir les couleurs

Pour percevoir le monde en couleur, les animaux doivent posséder au moins deux types de photorécepteurs. En effet, s'ils n'en ont qu'un, ils ne peuvent percevoir que des variations d'intensité lumineuse. L'œil humain est sensible à une gamme de longueurs d'onde variant entre 400 nm (violet) et 750 nm (rouge).

L'ultraviolet est perceptible par certaines espèces animales dont les insectes.



Pigments

Synthétisés

La **mélanine** est le pigment principal. Il en existe deux types. Le plus répandu est l'eumélanine, un pigment de couleur brun-noir qui protège des UV. La pheomélanine est plus claire (jaune à rouge). Elle est considérée comme responsable de la coloration rousse des cheveux et des poils des mammifères.



Les **ptérides** présentent des colorations variées, allant du jaune au rouge. De nombreux pigments ont été isolés à partir des ailes de Lépidoptères (d'où leur nom).

Les **ommochromes** forment une famille de pigments jaune à rouge-violet.



Assimilés

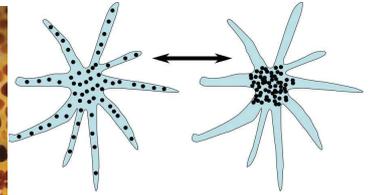
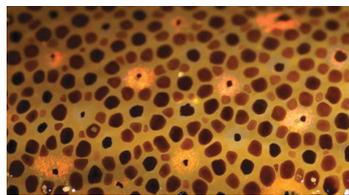
Le flamant rose doit sa couleur à son alimentation. Celle-ci est essentiellement constituée de petites crevettes qui se nourrissent d'algues qui renferment un pigment de la famille des caroténoïdes. C'est ce qui explique la couleur blanche des jeunes oisillons et la rose des adultes.



Cellules à pigments

Les pigments peuvent être dans la cellule ou dans des structures externes telles que les poils, les plumes, la cuticule (carapace des insectes) ou la coquille.

Les deux principales classes de cellules pigmentées sont les **chromatocytes** où les pigments ne bougent pas et les **chromatophores**. L'aspect de ces cellules peut varier par changement de forme de la cellule ou de la répartition des pigments.



Couleurs physiques

Iridescentes

La lumière est **diffractée** par les cristaux photoniques, des **interférences** sont générées et créent des couleurs irisées (deuxième poster consacré aux couleurs physiques).



Couleurs des animaux

Non-iridescentes

Ces couleurs sont observées lorsque les rayons lumineux sont **diffusés** par des structures ordonnées aperiodiques ou quasi-periodiques.



Combinaisons de couleurs

Les couleurs structurelles (physiques) se superposent souvent aux couleurs pigmentaires.



Chez le paon, la mélanine est indispensable à l'établissement du motif coloré. En effet, les animaux qui ne produisent pas de mélanine sont complètement blancs.

La couleur verte observée, notamment, chez certains amphibiens et oiseaux est produite par l'association d'un bleu structurel et d'un jaune pigmentaire.



Variations de couleurs

Il existe de nombreux cas où les animaux changent de coloration. Ceci en fonction du stade de leur vie, des saisons, de leur environnement ou de leurs émotions. Le contrôle est hormonal ou nerveux.

Changements physiologiques

Développement. Chez les goélands, les mâles et femelles sont presque identiques. Le juvénile possède un plumage très différent. Il mue 8 fois avant d'acquieser son plumage d'adulte. Le processus prend 4 ans et il y a, chaque fois, un plumage d'été et un plumage d'hiver.

Le lophophore resplendissant présente des couleurs vives lorsqu'il a atteint la maturité sexuelle. Avant, son apparence est proche de celle de la femelle.



Saisons. Le renard polaire présente un pelage brun pendant l'été et blanc en hiver.

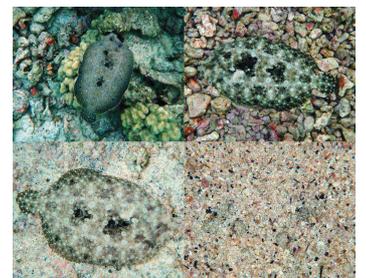


Changements morphologiques

Dans ce cas, des processus bien plus rapides interviennent, de l'ordre de la seconde ou de la minute. Ils font intervenir des changements de formes des **chromatophores** (voir cellules à pigments) et/ou des **iridophores**. Ces derniers sont des cellules qui stockent des molécules provoquant des reflets iridescents à la surface de la peau.

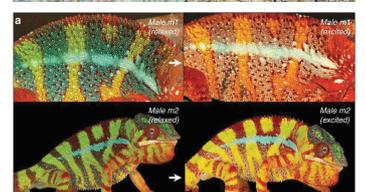
Environnement.

Le turbot tropical, un poisson plat, est capable de se camoufler en changeant de couleur.



Emotion.

Ces photos montrent les changements de couleurs lorsqu'un caméléon mâle calme s'excite.



Types de sources lumineuses

Soleil :

<https://pixabay.com/en/sun-bright-yellow-sunset-sky-1953052/> - CC - consulté le 13/08/2017

Lave :

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fissure_eruption_in_Holurhraun_\(Iceland\),_13._Septembre_2014.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fissure_eruption_in_Holurhraun_(Iceland),_13._Septembre_2014.JPG) - CC - consulté le 13/08/2017

Feu :

<https://pixabay.com/en/fire-light-energy-yellow-power-2197606/> - CC - consulté le 13/08/2017

Bougie :

<https://pixabay.com/en/candles-light-lights-evening-64177/> - CC - consulté le 13/08/2017

Lampe :

<https://pxhere.com/fr/photo/761127> - CC - consulté le 13/08/2017

Arc électrique :

<https://pxhere.com/en/photo/536742> - Domaine public - consulté le 20/08/2017

LED :

- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LED-Schema.svg> - CC - consulté le 17/08/2017
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diodos_LED_foto.png - CC - consulté le 13/08/2017
- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBG-LED.jpg> - CC - consulté le 13/08/2017
-

Luminol : <https://www.dreamstime.com/stock-photo-foot-print-trace-bathroom-under-uv-light-developing-evidence-place-bloody-crime-image81377973> - acheté le 14/08/2017

Billet de banque :

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:050euro-uv.jpg> - CC - consulté le 13/08/2017

Tube fluorescent:

https://en.wikipedia.org/wiki/Fluorescent_lamp#/media/File:Fluorescentfixturebelow20806.JPG - Domaine public - consulté le 13/08/2017

Passer par toutes les couleurs : Crédits photographiques

Pictogramme de sécurité :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Warnweste_gelb.jpg - CC - consulté le 16/01/2018

Cadran de montre :

<https://www.flickr.com/photos/stratman2/13653921334> - CC - consulté le 13/08/2017

Luciole :

https://de.wikipedia.org/wiki/Luciferine#/media/File:Photinus_pyrallis_Firefly_glowing.jpg - CC - consulté le 13/08/2017

Champignon :

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_biolumineszenten_Pilzen#/media/File:Mycena_chlorophos.jpg - CC - consulté le 16/08/2016

Propriétés de la lumière

Faisceau lumineux :

https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_pointer#/media/File:Laser_Pointers.jpg – CC – consulté le 18/08/2017

Ombre :

<https://pxhere.com/fr/photo/873171> - Domaine public - consulté le 18/08/2017

Absorption :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_matter_absorption.svg - CC – consulté le 18/08/2017

Réflexion :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_matter_reflection.svg – CC – consulté le 18/08/2017

Diffusion :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_matter_scattering.svg – CC – consulté le 18/08/2017

Réfraction :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_matter_refraction.svg - CC – consulté le 18/08/2017

Diffraction :

- **Trou circulaire**
https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffraction#/media/File:Diffraction_disc_calculated.png – CC – consulté le 18/08/2017
- **Trou carré :**
https://fr.wikipedia.org/wiki/Diffraction#/media/File:Diffraction_ouverture_carree.png – CC – 18/08/2017
- **Fente :** https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diffraction_of_a_single_slit.jpg – CC – consulté le 22/08/2017

Lumière blanche

Arc en ciel :

<https://www.publicdomainpictures.net/fr/view-image.php?image=151295&picture=double-rainbow-sky-landscape&jazyk=FR> – Domaine public – consulté le 23/08/2017

Lumière visible : à partir de

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-fr.svg – CC – consulté le 19/08/2017
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Spectre.svg> – CC – consulté le 19/08/2017

Prisme :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sz%C3%ADnsz%C3%B3r%C3%B3d%C3%A1s_prizm%C3%A1n1.jpg – CC – consulté le 23/08/2017
- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Prisma.png> – CC – consulté le 23/08/2017
- <https://www.flickr.com/photos/121935927@N06/13580411493> - CC - 19/08/2017

Synthèse additive

- Avec des prismes : V. de Bergeyck – domaine public – le 28/08/2017
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Additive_color.svg – Domaine public – consulté le 19/08/2017

Nature de la lumière

Onde dans l'eau :

<https://pixabay.com/en/stones-pebble-water-wave-244244/> - CC – 29/08/2017

Onde sinusoïdale :

V. de Bergeyck – Domaine public - créé le 16/01/2018, d'après :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sinusoidal_Wave.svg – Domaine public.

Onde électromagnétique : V. de Bergeyck, d'après

- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectre.svg> – CC – consulté le 19/08/2017
- <https://pixabay.com/en/cook-cuisine-four-micro-ondes-oven-1293095/> - CC – consulté le 30/08/2017
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique#/media/File:Domaines_du_spectre_%C3%A9lectromagn%C3%A9tique.svg – CC – consulté le 30/08/2017
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-fr.svg – CC – consulté le 19/08/2017

La vue chez l'Homme

La vue :

<http://lewebpedagogique.com/brefjailuleblogduprofdesvt/2013/11/25/conception-de-la-vision/> - CC - consulté le 01/11/2017

L'œil :

<https://askabiologist.asu.edu/bâtonnets-et-cônes> - CC - consulté le 01/11/2017

La rétine :

<https://askabiologist.asu.edu/b%C3%A2tonnets-et-c%C3%B4nes> – CC – consulté le 04/11/2017

Les cellules photosensibles

Les bâtonnets : V. de Bergeyck d'après

- https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Organization_of_rod_photoreceptors_in_the_mammalian_retina.png – CC – consulté le 03/11/2017
- [https://de.wikipedia.org/wiki/St%C3%A4bchen_\(Auge\)#/media/File:Schema_Retina.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/St%C3%A4bchen_(Auge)#/media/File:Schema_Retina.jpg) – CC – consulté le 03/11/2017
- <http://webvision.med.utah.edu/book/part-ii-anatomy-and-physiology-of-the-retina/photoreceptors/> - CC – consulté le 03/11/2017
- <https://cnx.org/contents/mpniV4N8@1.23:s3XqfSLV@9/Sensory-Perception> - CC- consulté le 03/11/2017
- <https://www.oercommons.org/courseware/module/15305/overview> - CC - consulté le 04/11/2017

La perception visuelle : de la rétine au cerveau :

<http://www.21siecle.quebec/table-des-matieres-2/la-lecture-dune-image-ecran-2/> - CC – consulté le 04/11/2017

Taux d'absorption des photons en fonction de la longueur d'onde par les différents photorécepteurs :

http://svtrenoir.free.fr/documents/SvtRenoir_1S/Chp1_Vision1S_web/res/TP1S_1-4.eWeb/co/TP_Doc2a.html - CC - consulté le 04/11/2017

Pigments réiniens :

<http://lewebpedagogique.com/michelsvt/?p=31775> – CC – consulté le 04/11/2017

Perception des couleurs :

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Daltonisme> - CC- consulté le 04/11/2017
- https://en.wikipedia.org/wiki/Color_blindness - CC - consulté le 04/11/2017

Test d'Ishihara :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Daltonisme> - CC - consulté le 04/11/2017

Couleurs pigmentaires

Pigments :

<https://pixabay.com/fr/couleurs-pigments-festival-houx-787744/> - CC – consulté le 21/09/2017

Colorants :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainbow_of_food_natural_food_colors.jpg , CC – consulté le 30/01/2018.

Sensations colorées :

Vinciane de Bergeyck, le 18/02/2018, CC BY-NC 4.0

Longueur d'ondes et couleurs :

Vinciane de Bergeyck, le 05/03/2018, CC BY-NC 4.0

Lumière colorées et couleurs :

Vinciane de Bergeyck, le 18/02/2018, CC BY-NC 4.0

Pigments et colorants

Peinture rupestre :

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/07/Lascaux2.jpg>, Domaine public – consulté le 30/01/2018

Orpiment :

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orpiment_\(Chine\)_6.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orpiment_(Chine)_6.jpg), Domaine public – consulté le 30/01/2018

Cinabre :

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cinnabar-d6a.jpg>, CC – consulté le 29/01/2018

Malachite :

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Malachite-Copper-285192.jpg>, CC – consulté le 29/01/2018

Azurite :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Azurite_from_China.jpg, , CC – consulté le 29/01/2018

Garance :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rubia_tinctorum_-_K%C3%B6hler%E2%80%93s_Medizinal-Pflanzen-123.jpg, Domaine public – consulté le 30/01/2018

Indigotier :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Indigofera_suffruticosa_-_K%C3%B6hler%E2%80%93s_Medizinal-Pflanzen-076.jpg, Domaine public – consulté le 30/01/2018

Mangoustan :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Garcinia#/media/File:Garcinia_morella_-_K%C3%B6hler%E2%80%93s_Medizinal-Pflanzen-063.jpg, Domaine public – consulté le 30/01/2018

Cochenille :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dactylopius_coccus_05.JPG, CC – consulté le 29/01/2018

Passer par toutes les couleurs : Crédits photographiques

Murex :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Murex_sp.jpg, CC – consulté le 29/01/2018

Seiche :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sepia_officinalis_modell.jpg , CC – consulté le 30/01/2018.

Mauvéine :

- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mauv%C3%A9ine>, Domaine public – consulté le 30/01/2018
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mauvein_Fuchsin_und_Methylviolett_ERSTE_brauchbare_Teerfarbstoffe_P1080427.JPG, CC – consulté le 29/01/2018

Clés des couleurs chimiques

Couleurs primaires et secondaires des peintres :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Color_mixture.svg – Domaine public – consulté le 19/08/2017

Couleurs primaires et secondaires des imprimeurs :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sintesis_sustractiva_plano.svg – CC – consulté le 19/08/2017

Cercle chromatique :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CYM_color_wheel.png – CC – consulté le 22/01/2018

Classification de Munsell :

- <http://www.drморon.org/is-black-a-color/>, CC - consulté le 14/02/2018
- https://fr.wikiversity.org/wiki/Colorim%C3%A9trie/Classification_des_couleurs, CC – consulté le

Couleurs physiques - 1

Parapente :

<https://pixabay.com/fr/parapente-mouche-de-l-air-ciel-3108937/>, – consulté le 01/02/2018

Diffusion de Rayleigh :

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diffusion_rayleigh_-_2.png, CC – consulté le 01/02/2018

Arc-en-ciel :

- https://en.wikipedia.org/wiki/File:Full_featured_double_rainbow_at_Savonlinna_1000px.jpg
– CC – consulté le 13/09/2017
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8e/Rainbow_formation.png, CC –
consulté le 01/02/2018

Interférences :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inter_destru.png, CC – consulté le 05/02/2018
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inter_constru.png, CC – consulté le 05/02/2018
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thin_film_interference_phase_1.svg, CC –
consulté le 05/02/2018

Bulles de savon :

<https://pxhere.com/fr/photo/1165934> - CC - consulté le 21/09/2017

Flaque d'huile :

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oelfleckerp.jpg>, CC – consulté le 05/02/2018

Couleurs physiques - 2

Cristaux photoniques :

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702108700567#fig2>, CC – consulté le 11/02/2018

Disque optique :

- https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_disc, CC – consulté le 11/02/2018.
- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CDgroove.jpg>, CC – consulté le 11/02/2018.
- https://en.wikipedia.org/wiki/File:Afm_cd-rom.jpg, CC – consulté le 11/02/2018.

Nacre :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mother-of-pearl_internal-beads2_hg.jpg, CC – consulté le 05/02/2018
- https://en.wikipedia.org/wiki/Structural_coloration#/media/File:Bruchfl%C3%A4che_eines_Perlmutterst%C3%BCcks.JPG, Domaine public – consulté le 08/02/2018

Papillon morpho :

- <http://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-blue-morpho-butterfly>, Domaine public – consulté le 06/02/2018
- <http://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-blue-morpho-butterfly-wing-ridges>, © Shinya Yoshioka, Osaka University – usage conforme aux utilisations autorisées - consulté le 06/02/2018
- <http://www.nisenet.org/catalog/scientific-image-blue-morpho-butterfly-wing-microribs>, © Shinya Yoshioka, Osaka University – usage conforme aux utilisations autorisées - consulté le 06/02/2018

Aphrodita aculeate :

- <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-3182/5/2/026005>, © IOP Publishing - consulté le 12/02/2016

Opale :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opal-b_hg.jpg, CC – consulté le 12/02/2018
- <http://www.mdpi.com/2075-163X/8/1/12>, CC – consulté le 13/02/2018

Couleurs des végétaux

Chlorophylles :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chl_a.jpg, CC – consulté le 01/02/2018.
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Selbe_river_basin_vegetation_graphic_file_Mongolia_2011.jpg, CC – consulté le 14/02/2018
- https://en.wikipedia.org/wiki/Autumn_leaf_color, CC – consulté le 14/02/2018
- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IndianSummer.jpg>, Domaine public – consulté le 14/02/2018

Caroténoïdes :

- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta-carotene-conjugation.png>, Domaine public – consulté le 14/02/2018
- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta-carot%C3%A8ne.jpg> CC – consulté le 01/02/2018.

Flavonoïdes et anthocyanes :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Orange_violet_pansies.jpg, CC – consulté le 14/02/2018
- <https://pixabay.com/fr/fraises-fraise-acc%C3%A8s-salle-nature-2343487/>, Domaine public – consulté le 14/02/2018
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Anthocyane#/media/File:Kornblume.jpeg>, CC – consulté le 14/02/2018
- <https://de.wikipedia.org/wiki/Anthocyane#/media/File:Brombeere.jpg>, CC – consulté le 14/02/2018
- <http://www.geograph.org.uk/photo/2959426>, CC – consulté le 14/02/2018
- <http://www.geograph.org.uk/photo/2959425>, CC – consulté le 14/02/2018

Couleurs physiques :

- <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pollia.jpg>, CC – consulté le 14/02/2018
- <http://rsif.royalsocietypublishing.org/content/10/87/20130394>, CC – consulté le 14/02/2018

Couleurs des animaux -1

Percevoir les couleurs :

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Guide_de_nectar#/media/File:Mimulus_nectar_guide_UV_VIS.jpg, CC – consulté le 15/02/2018

Pigments synthétisés :

- <https://pixabay.com/fr/migration-int%C3%A9gration-migrants-3129340/>, Domaine public – consulté le 15/02/2018
- <https://pixabay.com/fr/%C3%A9cureuil-des-animaux-mignon-493790/>, Domaine public – consulté le 15/02/2018
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Coliade_de_la_luzerne#/media/File:McGeorge_Colias_eurytheme.JPG, Domaine public – consulté le 15/02/2018
- <https://www.nature.com/articles/lsa201356#f2>, CC – consulté le 15/02/2018

Pigments assimilés :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Caribbean_famingo5.jpg, CC – consulté le 15/02/2018

Cellules à pigments :

- <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatophore>, CC – consulté le 15/02/2018
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Chromatophore>, CC – consulté le 15/02/2018

Couleurs iridescentes :

- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chrysochroa_vittata_\(16773913003\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chrysochroa_vittata_(16773913003).jpg), CC – consulté le 17/02/2018
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoplie_bleue_\(Hoplia_coerulea\),_Meyrueis,_C%C3%A9vennes,_France_\(28042942823\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hoplie_bleue_(Hoplia_coerulea),_Meyrueis,_C%C3%A9vennes,_France_(28042942823).jpg), CC – consulté le 17/02/2018
- <https://www.flickr.com/photos/53421063@N02/16003517551>, CC – consulté le 17/02/2018
- <https://www.flickr.com/photos/bsmith4815/141129684>, CC – consulté le 17/02/2018
- <https://pxhere.com/fr/photo/609932> - CC - consulté le 21/09/2017
- https://it.wikipedia.org/wiki/Columba_livia, CC – consulté le 12/02/2018

Couleurs des animaux -2

Couleurs non-iridescentes :

- <https://www.flickr.com/photos/willexotic/8354871959/>, CC – consulté le 17/02/2018
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paletten-Doktorfisch_\(Paracanthurus_hepatus\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Paletten-Doktorfisch_(Paracanthurus_hepatus).jpg), CC – consulté le 17/02/2018
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dendrobates_azureus_\(Dendrobates_tinctorius\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dendrobates_azureus_(Dendrobates_tinctorius).jpg), CC – consulté le 17/02/2018
- https://en.wikipedia.org/wiki/File:Common_Kingfisher_Alcedo_atthis.jpg, CC – consulté le 17/02/2018
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruddy_Duck_\(Oxyura_jamaicensis\)_RWD2.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ruddy_Duck_(Oxyura_jamaicensis)_RWD2.jpg), CC – consulté le 17/02/2018
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mandrill_at_Singapore_Zoo.jpg, CC – consulté le 17/02/2018

Combinaisons de couleurs :

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Albino_peacock.jpg, CC – consulté le 06/02/2018
- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Agapornis_roseicollis_-Marwell_Zoo-8a.jpg, CC – consulté le 17/02/2018
- <https://www.flickr.com/photos/guppiecat/17917156590/in/photostream/>, CC – consulté le 17/02/2018

Changements physiologiques :

- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:American_Herring_Gull_\(Larus_smithsonianus\)_RWD3.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:American_Herring_Gull_(Larus_smithsonianus)_RWD3.jpg), CC – consulté le 17/02/2018
- https://en.wikipedia.org/wiki/Himalayan_monal, CC – consulté le 17/02/2018
- https://en.wikipedia.org/wiki/Himalayan_monal, CC – consulté le 17/02/2018
- <https://nl.wikipedia.org/wiki/Poolvos#/media/File:ArcticFoxSummer.jpg>, CC – consulté le 17/02/2018
- [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arctic_fox_\(6375703941\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arctic_fox_(6375703941).jpg), CC – consulté le 17/02/2018

Changements morphologiques :

- https://en.wikipedia.org/wiki/Peacock_flounder, CC – consulté le 17/02/2018
- <https://www.nature.com/articles/ncomms7368/figures/1>, CC – consulté le 17/02/2018