

La couleur et les minéraux

Introduction

Dans cet article nous présentons les grandes lignes des théories scientifiques qui permettent d'expliquer la coloration des minéraux.

Parmi les différents paramètres d'identification des minéraux, on peut citer par exemple : la structure cristallographique, la dureté, la densité, la composition chimique, l'éclat ..., et notamment la couleur qui semble être un des critères de reconnaissance le plus « évident ».

Toutefois, même s'il est vrai que certains minéraux possèdent leur couleur propre comme le vert de la malachite ou le bleu de l'azurite, il arrive qu'un même minéral se rencontre dans des couleurs différentes tel que le quartz ordinairement incolore, est violet dans le cas de l'améthyste, jaune orangé dans le cas de la citrine, fumé, morion, etc...

Une question se pose : quelle est l'origine de la couleur des minéraux, et le lien avec leur composition chimique ou leur structure cristallographique ?

Longtemps, les interprétations de l'origine de la couleur des minéraux faisaient appel aux notions courantes d'idiochromatisme (coloration propre due à un composant chimique majeur), d'allochromatisme (coloration due à la présence d'éléments chimiques en traces) et de pseudochromatisme (phénomènes physiques régis par l'optique cristalline). Les travaux et les recherches de G.H. Faye, P.G. Manning et E.H. Nickel en 1968 sur le pléochroïsme de la tourmaline, de la cordiérite, de la vivianite et du chloritoïde, ont constitués les prémices de l'explication de la couleur par des principes physiques à l'origine de quatre théories qui seront développées ci-après.

Aujourd'hui, grâce aux progrès techniques et scientifiques, notamment par la mise au point d'outils plus précis dans l'échelle de l'observation et permettant également de synthétiser les minéraux et les analyser, comme par exemple : la radiocristallographie, la spectroscopie, l'absorption atomique, la résonance magnétique, et la microscopie électronique par transmission haute résolution (HRTEM), ces quatre théories ont pu être vérifiées et développées, favorisant ainsi la compréhension des origines de cet effet visuel qu'est la couleur.

Afin de bien comprendre le phénomène, depuis son origine jusqu'à sa perception, nous présentons dans un premier temps comment l'œil humain perçoit la couleur, puis, à travers quelques exemples, nous illustrerons les quatre principales théories physiques qui permettent de décrire l'ensemble des processus à l'origine de la couleur des minéraux.

La nature et la perception de la couleur

a) La couleur, quelques notions

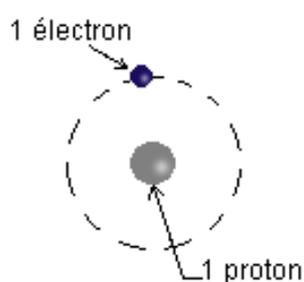
La couleur, un effet visuel, résulte de l'interaction entre la lumière (énergie) et les électrons des atomes constituant la matière.

On peut définir la lumière « blanche », du soleil, comme une superposition continue de faisceaux d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'onde λ (en mètre). En 1672, Newton réalise une expérience et démontre que la lumière blanche se décompose au travers d'un prisme de verre en lumières monochromatiques (du rouge au violet dans le domaine du visible). Pour une bonne compréhension, il suffira de retenir qu'à un faisceau de longueur d'onde donnée correspond une couleur (faisceau monochromatique) et que des combinaisons de faisceaux produisent toutes les couleurs que nous connaissons. Ainsi la couleur est liée à une propriété physique interne de la lumière, et l'ensemble des longueurs d'ondes présentes dans la lumière s'appelle le « spectre ». La matière peut interagir avec la lumière et modifier ce spectre et donc sa coloration.

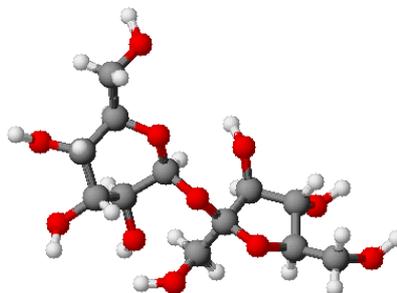
On distingue deux types d'interactions entre les particules de la lumière (photons) et la matière ainsi que différents niveaux d'interaction (atomique, moléculaire et cristallographique) (cf. schéma ci-dessous) :

- les **interactions chimiques** : Il s'agit de *phénomènes d'absorption*. Une partie de l'énergie de la lumière est absorbée soit par des éléments de transition, des centres colorés, par des transferts de charges dans des groupements de plusieurs atomes.
- les **interactions physiques** : Il s'agit de *phénomènes optiques*. La direction de la lumière est perturbée mais pas son intensité.

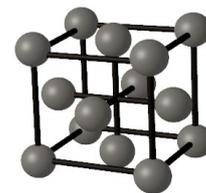
Echelles d'interactions entre photons de la lumière et la matière :



A l'échelle atomique



A l'échelle moléculaire



A l'échelle du cristal

b) L'œil humain

L'œil humain se compose de la rétine, élément sensible à la lumière. La partie centrale de la rétine est elle-même composée de trois types de cônes. Ces derniers jouent le rôle de capteurs et permettent la perception du jour et des couleurs, notamment les trois couleurs fondamentales : le rouge, le vert et le bleu. Il ne faut pas confondre les cônes avec les bâtonnets, situés en partie périphérique de la rétine, qui eux sont sensibles à l'intensité de la lumière.

L'œil humain « distingue » les ondes lumineuses de longueur d'onde comprise entre un intervalle de 400 nm (le violet) et de 700 nm (le rouge). Cet intervalle est appelé le domaine visible (ou spectre du visible).

Lorsque de la lumière (du soleil par exemple) atteint de la matière, une partie de cette lumière est absorbée ou transmise, les autres ondes sont réémises. Ces ondes réémises composent le spectre de la couleur de l'objet. Par exemple, la chlorophylle d'une plante absorbe la lumière rouge et bleu-violet et renvoie la lumière verte. La plante est perçue de couleur verte par notre œil, car le reste du spectre de la lumière blanche a été absorbé.

Ce qu'il faut retenir c'est que la couleur perçue par l'œil humain est le complémentaire de la lumière absorbée. Dans la suite de cet article, nous nous intéressons aux raisons de l'absorption de certaines longueurs d'onde dans les minéraux, et donc à la couleur que nous percevons. Nous parlerons également d'effets optiques perçus par l'œil comme une coloration.

Les origines de la couleur des minéraux

Un minéral est une substance naturelle de composition chimique et de structure cristallographique bien définies. Selon les éléments constitutifs (les atomes) et la structure du minéral (l'agencement des atomes dans l'espace selon une périodicité et une symétrie précise), il peut se produire différentes interactions avec la lumière du visible donnant lieu à la couleur du minéral.

Quatre théories physiques ou encore appelées formalismes ont été mises en évidence pour expliquer les processus à l'origine de la couleur au sein des minéraux. Il s'agit :

1. de la Théorie des bandes de valence,
2. du formalisme du champ cristallin,
3. du formalisme des orbitales moléculaires,
4. de l'optique cristalline.

Nous illustrerons les principes de ces théories par des exemples minéralogiques.

➤ La théorie des bandes de valences :

Elle concerne les métaux, les semi-conducteurs et les semi-conducteurs dopés. Le principe de la théorie des bandes est basé sur l'interaction entre les photons incidents de la lumière et les

électrons de la matière. Pour simplifier, imaginons l'atome comme un noyau recouvert d'une succession de couches où l'on peut trouver des électrons.

Dans un cristal métallique, les électrons circulent librement dans une couche appelée « bande de conduction », la couche la plus éloignée du noyau, et vont directement interagir avec les photons incidents. Ces derniers arrivent à la surface des métaux et vont être immédiatement réémis ce qui confère au cristal un éclat métallique, un fort pouvoir réfléchissant et les propriétés de conductivité thermique et électrique. Les métaux sont opaques : ils ne sont pas traversés par les photons et sont sans couleur (nuance de gris) tels que l'argent par exemple. Il existe toutefois des exceptions, certains métaux comme l'or ou le cuivre paraissent colorés : une partie des photons bleus (de hautes énergies) pénètrent dans l'or alors que les photons rouges et jaunes (basses énergies) sont immédiatement absorbés puis réémis par la surface, c'est pour cela que l'or paraît jaune. Pour l'anecdote, c'est aussi pour cette raison qu'une (très) fine feuille d'or est transparente pour un éclairage bleu à ultraviolet, car non suffisamment absorbé sur une faible épaisseur.

Dans la structure électronique des semi-conducteurs, on distingue également la « bande de valence », comportant les électrons susceptibles d'interagir avec les photons, séparée de la bande de conduction vide, sans électrons, par une bande interdite appelée « intervalle de bande » ou « gap ». Suivant la largeur de cet intervalle, les photons vont interagir de façon différente suivant leur énergie liée à leur longueur d'onde et vont exciter les électrons « colorant » ainsi le minéral.

Par exemple : pour un gap faible, le minéral aura un éclat métallique à sub-métallique et de couleur gris à noir comme la galène ou la blende, gris métallique pour la stibine, ou encore jaune métallique pour la pyrite ou la marcassite. Il y a besoin de peu d'énergie pour que les électrons « sautent » la bande interdite.

Pour un intervalle de bande un peu plus large, nécessitant des photons de plus hautes énergies (bleu, violet), il résultera une coloration rouge jaune. On peut citer le soufre, le réalgar, l'orpiment ou encore le cinabre.

Les semi-conducteurs dont le gap est trop important et les isolants, de ce fait aucune interaction n'est possible entre photons et électrons, et par conséquent ils sont incolores comme le diamant, le quartz ou la calcite. Cependant, des impuretés peuvent apporter ou créer des manques d'électrons agissant comme intermédiaires dans la bande interdite. Ces paliers intermédiaires permettent une interaction avec la lumière, et colorer le minéral.

C'est de cette manière que s'explique l'existence du célèbre diamant bleu, le « Hope ». Longtemps, les scientifiques ont pensé que la couleur bleue provenait de traces d'aluminium. Toutefois, les recherches ont permis de mettre en évidence qu'une infime quantité de l'élément Bore « dope » le minéral en électrons et lui confère sa couleur bleue intense.

➤ Le champ cristallin :

Cette théorie regroupe les terminologies classiques d'idiochromatisme, d'allochromatisme et introduit le concept de piège : les centres colorés.

a) La coloration idiochromatique :

La malachite ou l'azurite par exemple, carbonates de cuivre hydratés, ont une couleur dite « idiochromatique », due à la présence d'ions cuivre (II) Cu^{2+} en grande quantité dans le minéral. Ce dernier figure dans la formule chimique du minéral et donne une seule couleur caractéristique du minéral. Un même ion, comme le cuivre, peut donner différentes couleurs : bleue pour l'azurite ou vert pour la malachite. Il existe principalement 12 ions métalliques responsables de coloration. Autre exemple : l'ion Fer, élément le plus abondant dans la croûte terrestre, se trouve sous différents états, « valence » : notamment Fe^{2+} et Fe^{3+} . La couleur verte de l'Olivine, le vert céladon des céramiques, la couleur ocre des Ogres de Rustrel dans le Vaucluse mais encore le rouge du grenat almandin trouvent leurs origines dans la présence d'ions Fer en grande quantité.

b) La coloration allochromatique :

La coloration des minéraux dite « allochromatique » est produite par certains ions métalliques (éléments de transition), présents en très petite quantité. Ces ions métalliques sont des impuretés présentes à l'état de " traces " dans le minéral ; sans impuretés, de tels cristaux sont théoriquement incolores. La coloration verte intense des émeraudes ou le rouge soutenu du rubis s'expliquent par la présence d'impuretés, à savoir des ions chrome Cr^{3+} . Dans l'exemple du diamant bleu déjà évoqué (le « Hope »), on pensait que cette couleur était due à des traces d'aluminium. Cependant, l'infime quantité de Bore donne cette coloration, dont la théorie des bandes de valences en précise l'origine. Cette coloration est toutefois bien de type allochromatique car le Bore n'entre pas dans la formule chimique du diamant composé de carbone pur.

c) Les centres colorés :

Des défauts dans la structure cristallographique du minéral, liés généralement à une irradiation naturelle (radioactivité du milieu dans lequel croît le minéral) ou artificielle, génèrent ce qu'on appelle des centres colorés et sont responsables de la coloration du minéral, qui sans ces défauts serait incolore.

On distingue comme types de défauts de la structure cristalline : les lacunes ou ions manquants et les ions additionnels (interstitiels). Ces « pièges » changent le nombre d'électrons disponibles, et donc l'interaction avec la lumière.

Le critère de reconnaissance du phénomène des centres colorés est la disparition de la couleur du minéral par son exposition à la lumière ou à la chaleur puis son rétablissement par irradiation. Cette découverte, fruit d'expérimentations et de longues recherches, est parfois (malheureusement) détournée pour modifier ou améliorer une coloration d'un minéral.

Prenons le cas de la fluorite : sa couleur violette s'explique par la présence de centres colorés où un ion fluorure F^- manque résultant d'un défaut de croissance (milieu pauvre en F^-) ou résultat d'une irradiation. Cette lacune va être considérée comme un électron se substituant à l'ion F^- manquant (cf. schéma ci-dessous). Cet électron va interagir avec les photons et être responsable de la couleur du minéral.

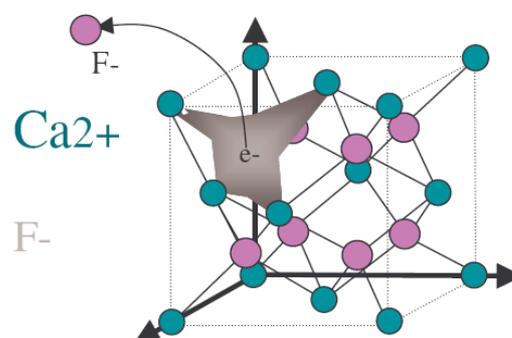


Figure : Structure cristallographique de la fluorite où un électron remplace l'ion F^- au sein de la lacune.

(d'après Alain ABREAL).

On peut citer d'autres exemples : l'améthyste dont la couleur violette résulte du remplacement, au sein de la structure du minéral, d'un ion Si^{4+} par un ion Fe^{3+} ; le quartz fumé où des traces d'ions Al^{3+} se substituent à l'ion Si^{4+} . Ces substitutions d'un cation par un autre de degré d'oxydation inférieur vont provoquer des lacunes et la coloration du minéral.

Nous avons parlé des interactions entre la lumière et la matière à l'échelle atomique (ions, électrons), dans le paragraphe suivant nous verrons que ces interactions interviennent également à l'échelle moléculaire (d'un groupement d'atomes).

➤ Les orbitales moléculaires :

On parle de *formalisme orbital moléculaire* lorsque les atomes regroupés en molécule ou chaînes de molécules vont mettre en commun certains de leurs électrons : il se produit alors ce qu'on appelle des « transferts de charge ». Selon la taille (longueur) de la molécule et du type de liaison entre atomes, les niveaux d'énergie d'interaction entre les photons et les électrons « libres » vont varier et seront responsables de la coloration du minéral. En effet, il résulte des transferts de charge un niveau d'interaction moyen au niveau de toute la molécule, modifiant l'absorption de la lumière à certaines longueurs d'ondes, et donc la couleur. Ce phénomène de coloration concerne notamment la matière organique, mais également de nombreux minéraux.

Trois processus de transferts de charge ont été observés :

- les transferts de charge *métal - métal*,
- les transferts de charge *métal - non métal*,
- et les transferts de charge *non métal - non métal*.

✓ les transferts de charge *métal – métal* – cas de l'aigue-marine :

L'aigue-marine est de la famille des béryls (émeraude), il s'agit d'un aluminosilicate de béryllium de formule chimique $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$, contenant des ions fer (II) Fe^{2+} en impuretés :

Sa couleur bleue peut s'expliquer par la présence de ces traces de fer mais aussi lorsque le fer Fe^{2+} passe à l'état Fe^{3+} par le biais d'un atome d'oxygène O : un transfert de charge (un électron passe d'un ion à l'autre) se produit avec absorption d'énergie dans le jaune et l'orange puis réémission correspondant à la couleur bleue.

La coloration par transfert de charge *métal – métal* concerne la magnétite, le saphir bleu, la manganite et bien d'autres minéraux.

✓ les transferts de charge *métal – non métal* – cas de la vanadinite :

La vanadinite est un chlorovanadate de plomb de formule chimique $Pb_5(VO_4)_3Cl$. Pour l'anecdote : la vanadinite est exploitée comme minerai de vanadium, utilisé pour durcir le plomb.

Sa couleur orangée rougeâtre peut s'expliquer par la présence de ces traces de chrome mais aussi lorsqu'un transfert d'électrons s'effectue depuis O^{2-} vers l'ion métallique V^{5+} (vanadium). Alors, on a une absorption dans les hautes énergies (bleu, violet) et réémission des longueurs d'ondes de basses énergies : il en résulte une couleur orangée.

La coloration par transfert de charge *métal – non métal* concerne également la crocoïte, la goethite, la scheelite, etc...

✓ les transferts de charge *non métal – non métal* – cas du Lapis-Lazulis :

Il s'agit de la délocalisation d'électrons sans l'intervention d'ions métalliques.

Le Lapis-Lazulis ne contient aucun électron libre, toutefois les recherches ont montré que les unités moléculaires de soufre S^3 sont responsables de la couleur bleue de ce minéral. Ce dernier a été utilisé comme pigment jusqu'au XIX^{ème} siècle pour son bleu qualifié d'« outremer ».

D'autres minéraux trouvent leur coloration dans la présence de pigments organiques tels que l'ambre, l'ivoire, le corail, la lignite, etc...

c) Quelques mots sur la fluorescence et la phosphorescence.

Nous avons parlé jusqu'à présent des origines de la couleur liées à la composition chimique des minéraux. Avant d'aborder les phénomènes optiques à l'origine de certaines colorations, mentionnons les propriétés de fluorescence et de phosphorescence de certains minéraux. Il se produit avec certains éléments chimiques (le carbone par exemple), un phénomène de décalage dans le spectre de certaines longueurs d'onde. Ce phénomène est cependant très peu visible de façon ordinaire, car masqué par les phénomènes mentionnés jusqu'à présent. Il est possible d'observer le phénomène en plaçant des minéraux sous lumière ultra-violette (invisible à l'œil), sans aucune autre source de lumière : il est alors possible d'observer le décalage de cette lumière dans une gamme visible à l'œil. Le minéral semble alors être une source de lumière... Cependant, ce qui est perçu est bien la lumière de la lampe à ultra-violets, dont les longueurs d'ondes ont été décalées. Ce qui distingue la fluorescence de la phosphorescence, est la durée du phénomène (la phosphorescence restitue les photons plus « lentement » et donc plus longtemps). A titre d'exemple, on peut évoquer le cas bien connu de la fluorite.

➤ Les phénomènes optiques :

Nous avons vu à travers les trois théories décrites précédemment que la coloration du minéral peut résulter de l'interaction entre la lumière et les électrons des atomes constituants des minéraux.

Nous développerons, dans cette partie, les effets colorés régis par les phénomènes physiques et plus particulièrement par l'optique cristalline : la lumière va interagir avec certaines caractéristiques physiques ou structurales du minéral telles que des inclusions, une texture particulière ou une structure lamellaire déterminée par exemple. On parle alors de coloration « pseudochromatique ». La lumière n'est pas absorbée par la matière : elle est diffusée, réfléchiée, diffractée, etc. : sa direction est perturbée par un obstacle.

a) La dispersion :

Prenons l'exemple d'un prisme (illustré par le schéma ci-dessous) : un rayon de lumière blanche arrive dans un prisme et va être dévié de sa trajectoire initiale : la lumière blanche va se séparer en plusieurs faisceaux de lumière monochromatique (dispersion chromatique). C'est ce qui se produit également lors de l'apparition d'un arc-en-ciel : la lumière du soleil va être dispersé par les fines gouttelettes de pluie.

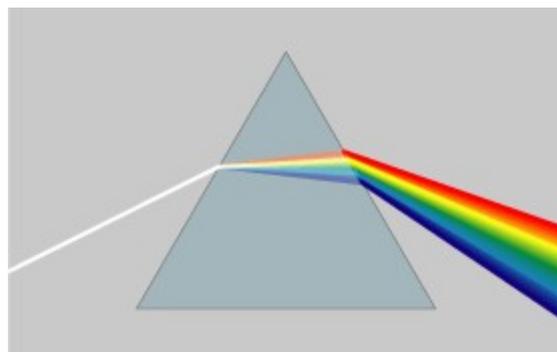


Figure : dispersion de la lumière blanche au passage d'un prisme (d'après WIKIPEDIA).

Ceci s'explique car un milieu (eau, minéral, verre) est caractérisé par son indice de réfraction $n = c/v$, où c est la célérité de la lumière dans le vide et v sa vitesse dans le milieu considéré.

Une variation de cet indice ($n_1 \neq n_2$, où n_1 est l'indice de réfraction de l'air par exemple et n_2 de l'eau) sur le trajet d'un rayon lumineux va causer sa déviation, ou plutôt sa réfraction selon les lois de Snell-Descartes (cf. schéma ci-dessous).

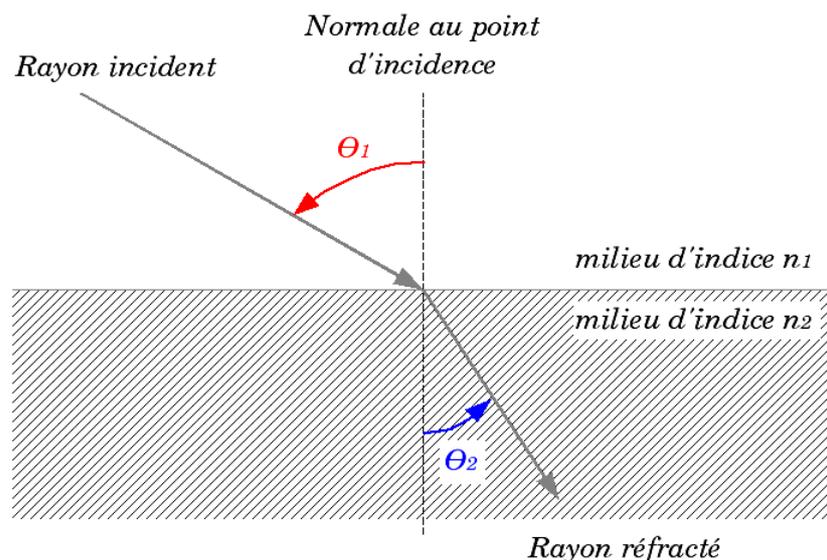


Figure : réfraction : rayons et angles utilisés dans la loi de Snell-Descartes. (d'après WIKIPEDIA).

Pour chaque longueur d'onde lumineuse, l'indice de réfraction sera différent, et donc l'angle de sortie à la surface. Chaque minéral se caractérise par un indice de réfraction donné, qui lui est propre. On parle alors de « feux » de gemme pour des minéraux à haut indice de réfraction tels que le diamant, le zircon, ou encore le démantôïde (variété de grenat ferrifère), dont l'éclat caractéristique est dû à la dispersion chromatique, accentué par la taille de la pierre.

b) La diffusion :

C'est le phénomène par lequel un rayonnement, comme la lumière, le son ou une particule en mouvement est dévié, réfléchi dans de multiples directions lorsque ce rayonnement rencontre un obstacle (on parle aussi d'« éparpillement »). Ce phénomène est sensible à la longueur d'onde et à la direction d'observation. Un exemple classique pour comprendre ce phénomène est la couleur bleue du ciel : une partie de la lumière émise par le soleil est réfléchi par l'atmosphère terrestre, une autre partie pénètre l'atmosphère plus ou moins directement, jusqu'à atteindre l'œil d'un observateur. Dans le cas de l'atmosphère terrestre, la diffusion des rayonnements provenant du soleil est d'autant plus grande que leur longueur d'onde est courte (bleu-violet). Un observateur regardant le soleil directement, ou au voisinage de celui-ci perçoit la lumière directe, faiblement diffusée (jaune-orangé), la lumière indirecte (le ciel) est la lumière fortement diffusée et perçue dans le bleu. On retrouve ce phénomène à des échelles plus faibles dans certains minéraux : on retiendra la couleur blanc-bleutée du feldspath « pierre de lune » résultant de la diffusion de la lumière par de fines particules en suspension dans le minéral translucide. Le chatoyement de l'œil de chat, l'éclat nacré des perles, le blanc laiteux de l'opale (opalescence), la couleur rose du quartz contenant de microscopiques aiguilles de rutiles, ces effets, pour n'en citer que quelques uns, résultent de la diffusion de la lumière par de fines particules, inclusions ou par de fines lamelles se chevauchant (dans le cas de la perle).

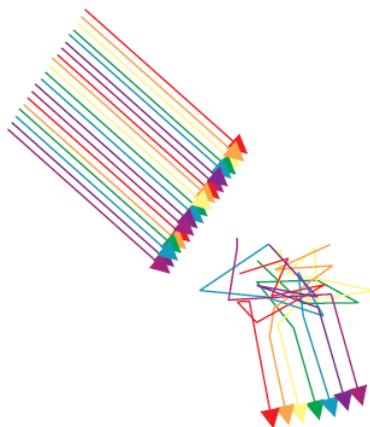


Figure : Phénomène de diffusions multiples (d'après Alain ABREAL).

c) La diffraction :

La diffraction est étroitement liée aux interférences lumineuses : les couleurs chatoyantes, vives et variées, l'iridescence de certains minéraux s'expliquent par des interférences entre les ondes lumineuses et un agencement régulier de structures au sein du minéral. Dans le cas de l'opale, ses teintes vives résultent de la diffraction de la lumière par un empilement régulier en plans successifs de billes de silice de taille homogène comme le montre les deux figures ci-dessous :

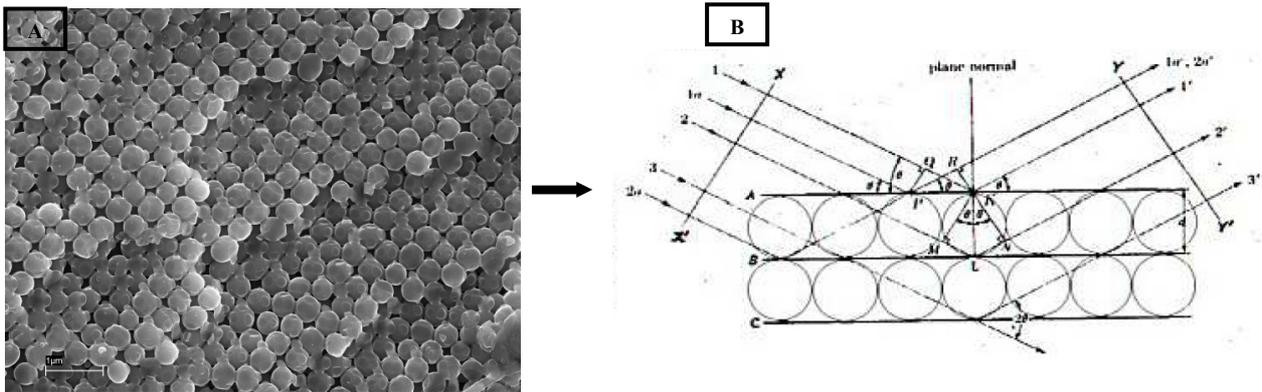


Figure A : image obtenue au microscope électronique à balayage représentant l'empilement régulier de billes de silice dans une opale

Figure B : phénomène de diffraction par des sphères de silice amorphe dans les opales (d'après Alain ABREAL).

Les couleurs variées, l'iridescence de l'opale vont dépendre de l'orientation de la lumière incidente, de la taille des billes, de l'espacement des différentes couches de billes et de l'espacement entre les billes.

Dans le cas de la labradorite, feldspath calco-sodique de formule chimique $((Ca,Na)(Al,Si)_4O_8)$, son iridescence (appelée aussi adulescence) est due à des interférences et des effets de diffraction de la lumière par la superposition microscopique en alternance de lamelles de feldspath calcique (anorthite) et de feldspath sodique (albite).

d) Les interférences lumineuses :

Il se produit des interférences lorsque deux ondes de même type se rencontrent et interagissent l'une avec l'autre : lorsqu'elles sont en phase, leurs amplitudes s'ajoutent, lorsqu'elles sont en déphasage : leur amplitudes se soustraient et peuvent conduire à l'extinction de ces ondes. Par la disparition de certaines ondes lumineuses de longueur d'onde donnée, il peut se produire une coloration.

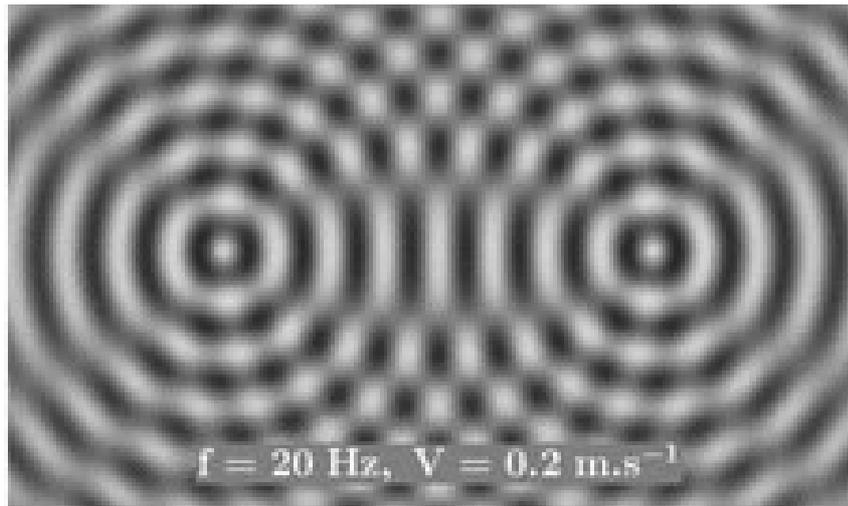


Figure : exemple d'interférence entre deux ondes circulaires

Le schéma ci-après décrit le trajet du rayon lumineux à travers la superposition de fines couches au sein d'une bulle de savon, les rayons réfléchis vont interférer et produire cette iridescence caractéristique de la bulle de savon.

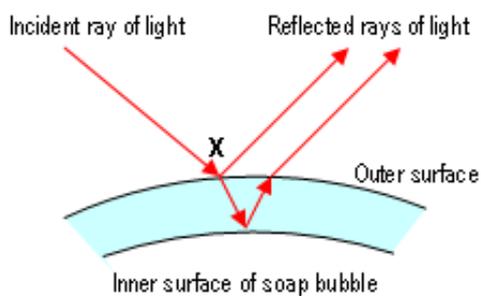


Image issue du site internet : hadf.wordpress.com/2007/07/09/.

Ce phénomène intervient également lorsqu'une fine couche d'oxyde recouvre la chalcopryrite, la bornite, l'hématite ou encore la chalcosine et suivant l'épaisseur de ce film d'oxydation, les teintes vont varier.

Conclusion

L'origine de la couleur des minéraux est plus complexe qu'il n'y paraît : elle fait appel à des connaissances en physique pour comprendre et étudier les interactions entre la lumière et la matière et requiert également des connaissances dans le domaine de l'optique cristalline, de la minéralogie, de la cristallographie, etc...

Nous avons vu qu'il existe différentes théories et processus qui peuvent se combiner entre eux. Ce qui rend encore plus difficile la détermination de l'origine de la coloration des minéraux.

Les recherches ont beaucoup progressé dans ce domaine au cours de ces dernières années pour approfondir les connaissances dans ce domaine. Les notions classiques d'allochromatisme, d'idiochromatisme et de pseudochromatisme ont été complétées par des analyses plus fines au niveau des interactions entre matière et lumière.

Ces connaissances sont parfois (malheureusement) détournées pour modifier ou améliorer une coloration d'un minéral.

La complexité des origines de la couleur, ne nous empêchera pas d'admirer la diversité et la beauté des couleurs des minéraux.

Bibliographie

- WIKIPEDIA
- «**La couleur dans les minéraux** », Alain ABREAL, juillet 2002, page 1 – 27.
- <http://www.geopolis-fr.com/doss2.html>, dossier : « **La couleur des cristaux et des minéraux** » par Jean-Christophe FILLOUX, professeur de sciences physiques dans un lycée de Poitiers (Vienne).
- <http://www.uwgb.edu/dutchs/acstalks/acs-colr.htm>, « **Why Minerals Are Colored** » by Steven DUTCH, Natural and Applied Sciences, University of Wisconsin – Green Bay.
- <http://www.uel.education.fr/>
- « Comprendre & enseigner la planète Terre », J.M. CARON, A. GAUTHIER, J.M. LARDEAUX, A. SCHAAF, J. ULYSSE et J. WOZNIAK, page 110.
- Le Règne Minéral, N° 2, Mars - Avril 1995, « La Couleur des Minéraux » par J. GALVIER, page 4 à 24.
- « Optique cristalline », cours d'Analyse des matériaux naturels par J. HONOREZ, professeur à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- <http://minerals.gps.caltech.edu/>
- <http://webmineral.brgm.fr:8003/mineraux/Main.html>
- <http://www.gemstone.org/gem-by-gem/french/demantoid.html>
- http://astro.ensc-rennes.fr/index.php?pw=funny_physics