



Cours de gemmologie

Nora Engel

Sections de tourmalines, photo de R. Weller, Cochise College

Avertissement

Ce cours de gemmologie n'est ni un traité à propos des gemmes ni un ouvrage de consultation. Il s'agit d'un condensé des principaux concepts de géologie, chimie, cristallographie et d'optique cristalline qui sont nécessaires à toute personne désireuse de s'initier à la gemmologie.

La gemmologie qui a été souvent considérée plus comme un Art que comme une Science est enseignée à des étudiants de toute provenance : bijoutiers, joailliers, designers, lapidaires et diamantaires, artistes et de nombreux amateurs de pierres précieuses. C'est dans un but didactique que, dans ce cours, les explications sont données dans des termes simples et sont agrémentées de nombreuses illustrations. Parfois une explication nécessite un petit exercice dont la solution, si elle n'est pas accessible dans le chapitre, est présentée à part. A la place d'un glossaire, nous proposons à la fin de chaque chapitre une liste de mots-clés ; chaque mot-clé est mis en évidence dans le texte. C'est à l'étudiant de constituer son propre glossaire en tirant une définition du texte ou même en se référant à d'autres lectures.

Dans les derniers chapitres, nous portons une attention particulière sur les fraudes et les règles commerciales en vigueur. Ces chapitres sont destinés à celles et ceux qui sont plus particulièrement attirés par le commerce des pierres. De même, les principes de base d'optique qui ont rendu possibles les méthodes d'identification de spectrométrie, sont maintenant accessibles au néophyte. Ce sont là des domaines et des préoccupations de la gemmologie actuelle.

Après avoir acquis ces premières connaissances, le lecteur pourra consulter Le bréviaire des pierres précieuses. On y trouve une description des principales gemmes minérales ou d'origine organique. Il pourra également relire Le Monde merveilleux des Pierres précieuses pour s'informer de sujets annexes à la gemmologie tels le travail de la taille ou certaines appréciations de la beauté des gemmes.

Tout au long du cours, un accent particulier est mis sur l'aspect pratique de la gemmologie. En effet, dans mon enseignement, j'ai beaucoup insisté sur l'identification et l'observation des gemmes, et j'espère que l'étudiant aura une occasion près de chez lui d'observer et même d'analyser des gemmes. Le vocabulaire scientifique utilisé dans ce texte prend son origine dans les sciences de l'observation qui trop souvent ne sont plus enseignées ainsi dans les cursus académiques.

J'ai ici privilégié les termes courants des gemmologues. Les scientifiques pourront trouver les termes exacts dans une note de bas de page. Ce cours de gemmologie a été dispensé pendant plus d'une décennie aux élèves-apprentis bijoutiers-joailliers de l'Ecole d'Arts appliqués de Genève (Département de l'Instruction Publique de l'Etat de Genève) grâce auxquels mon enseignement a beaucoup évolué.

Table des matières

<p>Chapitre 1 Les gemmes dans la nature</p> <p>1. La croûte terrestre</p> <p>2. Les roches <i>les roches éruptives - les roches sédimentaires - les roches métamorphiques</i></p> <p>3. Origine des minéraux</p> <p>4. Les gemmes dans la nature</p>	7
<p>Chapitre 2 Eléments de chimie minérale</p> <p>1. Les états de la matière</p> <p>2. L'atome et quelques éléments chimiques</p> <p>3. La liaison chimique <i>structure cristalline - propriétés physico-chimiques - formules chimiques simples.</i></p> <p>4. Les minéraux</p>	13
<p>Chapitre 3 Les cristaux</p> <p>1. Les éléments de symétrie - un peu de géométrie</p> <p>2. Les 7 systèmes cristallins <i>les troncatures - les axes de rotation.</i></p> <p>3. L'habitus et les formes des cristaux</p> <p>4. Particularités cristallines <i>cristaux maclés - polymorphisme - isomorphisme - pseudomorphoses.</i></p>	19
<p>Chapitre 4 Propriétés physiques des minéraux</p> <p>1. Clivage, cassure et dureté</p> <p>2. La densité <i>mesure hydrostatique au moyen d'une balance - méthode par immersion dans des liqueurs de haute densité - à propos de la précision de la mesure.</i></p> <p>3. Les réactions de la matière à la lumière <i>la lumière - la polarisation de la lumière - la réfraction de la lumière dans la matière - la réflexion - réfraction et réflexion sont indissociables - réflexion partielle et totale - lumière et cristaux - la mesure des caractères optiques au réfractomètre.</i></p> <p>4. La couleur <i>la couleur des gemmes - la dispersion de la lumière ou le feu le pléochroïsme - la luminescence - quelques mots sur la diffraction.</i></p>	29

Chapitre 5 Les instruments du gemmologue 53

1. L'observation "à l'oeil nu"
2. La loupe
3. Le microscope
4. Le polariscope
5. Le réfractomètre
6. Le dichroscope
7. Le spectroscope par absorption
8. Les lampes ultraviolet et les filtres

Chapitre 6 Les pierres de synthèse et les imitations 65

1. Quelques définitions
2. Un peu d'histoire
3. Les pierres de synthèse
 - les méthodes par fusion sèche (Verneuil, Czochralski) -*
 - la méthode hydrothermale - la méthode par le flux -*
 - procédés spéciaux - identification de pierres de synthèse (les indices*
 - les plus courants).*
4. Les imitations
 - les imitations du diamant - les verres - les plastiques.*
5. Les traitements des gemmes
 - quelques traitements fréquents sur des pierres taillées*
 - traitements de quelques cabochons et de perles.*
6. Les pierres composées

Chapitre 7 Le marché des gemmes 78

1. L'offre et la demande
 - le maintien des prix - "dumping" et monopole - la thésaurisation.*
2. Le marché des diamants
3. Les pierres de joaillerie
4. Les pierres exceptionnelles
5. Commerce des gemmes
 - marché illicite - conformité selon les règles éthiques.*

Bibliographie 89

Introduction

La Gemmologie est la Science des Pierres précieuses. Ce qu'on appelle "pierre" communément, se rapporte à toute substance inorganique du règne minéral. Une "**pierre précieuse**" qui est pour nous synonyme de **gemme** est une pierre qui présente un intérêt pour l'Homme. Plus de 90 % des pierres précieuses ou gemmes proviennent de minéraux naturels. C'est une toute petite fraction des minéraux existants dans la nature : sur les 4000 espèces minérales connues, seule une trentaine d'entre elles sont couramment utilisées. Pour qu'une "pierre" soit considérée comme **gemme**, elle doit répondre à trois critères de qualité :

le beauté - la durabilité - la rareté.

La beauté qui fascine l'œil de l'observateur soit par une couleur profonde, un éclat particulier, un effet optique spécial, est une appréciation subjective qui prend en compte :

- pour les gemmes **transparentes** :
 - pour celles qui sont incolores, elle dépend du feu (ou effet "arc-en-ciel), de l'éclat (propension à la réflexion de la lumière dans la gemme) et de son degré de transparence.
 - pour les pierres **translucides**, qu'elles soient incolores ou colorées, la teinte et l'aspect extérieur sont importants. Parmi des derniers on tient compte de l'effet formes d'inclusions particulières, mais aussi d'effets lumineux tels l'opalescence, l'iridescence, la chatoyance, l'astérisme etc..
 - pour les minéraux opaques, c'est la capacité de bien réfléchir leur couleur, à prendre un beau poli ou à d'autres aspects particuliers.

Tous ces caractères relatifs à la beauté sont mis ultérieurement en évidence par la taille et le polissage.

La durabilité ou **inaltérabilité** qui grâce à la résistance aux frottements mécaniques et à une insensibilité aux agents chimiques en garantit la durabilité et la pérennité dans le temps. La poussière qui nous entoure renferme toujours un peu de quartz. Il est donc impératif qu'une gemme ait une dureté supérieure à celle de ce minéral.

La rareté qui lui confère la qualité d'objet convoité, donc coûteux, et en fait un symbole de richesse et de puissance.

* * *

Si la plupart des gemmes proviennent de substances minérales naturelles, on trouve aussi des gemmes d'origines organiques. Ce sont :

- les perles ou la nacre issues de sécrétions carbonatées de certains mollusques,
- les coraux qui sont des squelettes d'organismes marins,
- l'ivoire tirée de dents de mammifères (éléphant, hippopotame, mammoth...)
- l'ambre qui est une résine fossilisée de conifères
- le jais, un charbon végétal très pur,
- le copal, une résine de conifère durcie.

Il existe aussi des produits artificiels, fabriqués pour imiter les gemmes naturelles :

- des verres et des plastiques : colorés ou non, d'origine minérale ou organique;
- des gemmes synthétiques qui sont de vraies gemmes mais produites par l'homme au lieu de la nature;

- des gemmes artificielles n'existant pas dans la nature mais produite par l'homme;
- des pierres composées appelées "doublets" ou "triplets". Ce sont des collages de vraies gemmes sur du verre afin d'en augmenter le volume et d'obtenir l'aspect d'une pierre naturelle.

Le gemmologue doit pouvoir, par ses connaissances et avec l'aide d'appareils, identifier les gemmes véritables et dépister les imitations de celles-ci. Ce sont ces connaissances spéciales et l'usage de ces appareils particuliers qui font l'objet de ce cours. L'estimation de la valeur des gemmes demande en plus de connaissances une expérience commerciale qui est nécessaire en bijouterie et dans les métiers de la taille.

Les gemmes sont utilisées en Joaillerie ou Art des Pierreries, et en Bijouterie, Art des objets de luxe en Métaux nobles souvent rehaussés de Pierres précieuses. Naturelles ou synthétiques, elles sont aussi utilisées sur une très grande échelle dans bien des industries, soit en raison de leur dureté (abrasifs, pièces résistantes à l'usure), soit en raison de leurs propriétés optiques (nicols, lasers etc.).

Chapitre 1 : Les gemmes dans la nature

Les gemmes d'origine minérale les plus appréciées sont celles qu'on trouve dans la nature. Les minéraux de qualité gemme n'apparaissent pas n'importe où. Ils prennent naissance dans des conditions géologiques particulières que nous allons tenter de comprendre.

C'est la tâche des géophysiciens, pétrographes et géologues d'étudier le globe terrestre. Les astrophysiciens, eux, tentent de comprendre et d'expliquer la Galaxie dont notre système solaire fait partie, ainsi que celles qui l'entourent. A ces études, des mathématiciens et des physiciens apportent des résultats d'expériences et de calculs complexes qui amènent à des conclusions sur l'origine, la composition chimique et l'évolution de notre système solaire. Les résultats de toutes ces études nous permettent d'affirmer avec quasi certitude que la Terre est le produit d'un lent refroidissement d'une masse en fusion, qui aurait commencé à se solidifier il y a 4.6 milliards d'années. Le premier témoin de sa formation est une roche, un gneiss qui a été daté à 3.8 milliards d'années. La vie qui s'est développée graduellement, d'abord sous forme de cellules puis d'organismes de plus en plus complexes, fait en quelque sorte partie de son développement. Les plus anciennes formes de vie ou plus anciens fossiles que les paléontologues aient découverts, remontent à un milliard d'années. A cette époque, des magmas en fusion ont donné naissance, par refroidissement, à des roches éruptives. Des roches sédimentaires se sont déposées dans des zones d'effondrement qui ont formé les très anciens océans. Elles sont les témoins d'activités atmosphériques intenses qui se seraient produites dès la genèse dans une atmosphère chargée d'eau. On pense que la plupart des roches datant de cette époque, ont été remaniées par la suite lors de bouleversements tectoniques ; ces roches, dites métamorphiques, ont entièrement perdu leur aspect ou leur assemblage minéralogique d'origine. Peu à peu, au cours d'un processus qui a duré plusieurs centaines de millions d'années, notre globe a pris la forme que nous lui connaissons. La dynamique qui lui a donné naissance continue dans les temps présents. Les volcans et les tremblements de terre en sont les témoins les plus spectaculaires. Lorsque les conditions géologiques et chimiques sont réunies, il est possible que, dans l'écorce terrestre, des minéraux se développent en beaux cristaux. Ces minéraux, une fois taillés, vont donner les gemmes que nous pouvons admirer.

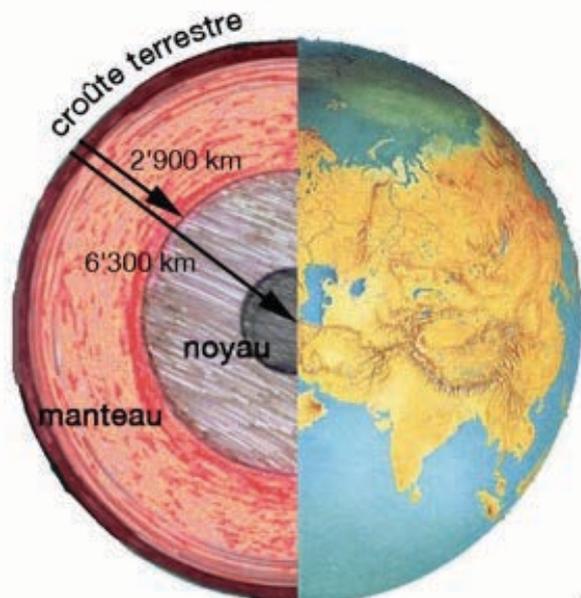
La croûte terrestre

La croûte terrestre forme la surface de notre planète. Si on considère une coupe de notre planète, on peut dire qu'elle en constitue une partie infime, mais combien vitale pour nous !

On ne sait que peu de choses des manteaux et noyaux terrestres.

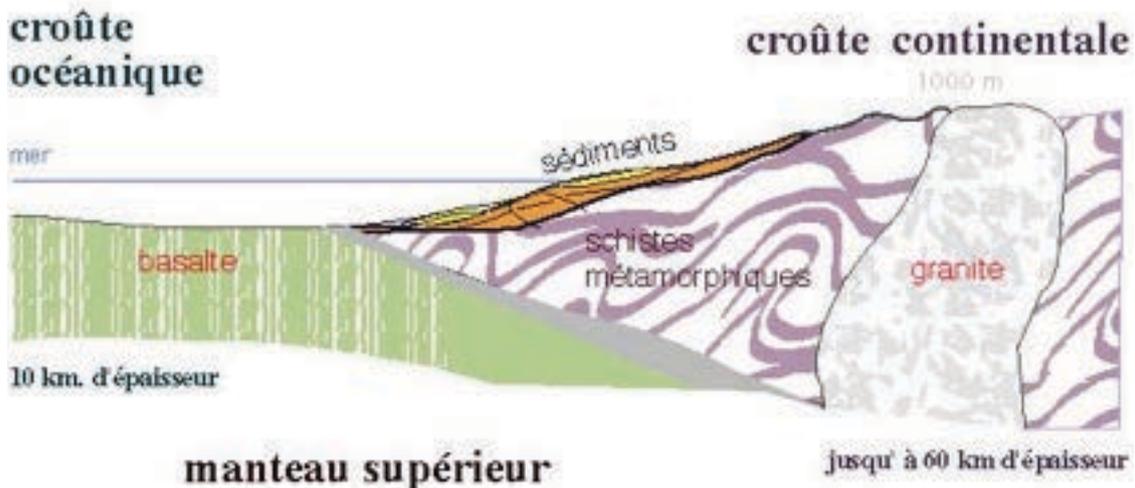
Le noyau serait constitué de métaux, d'un alliage de nickel et de fer, d'une partie interne solide de densité élevée de 12.5 et d'une partie externe visqueuse relativement moins dense (10.5).

Le **manteau** serait de composition chimique similaire à celle de la croûte terrestre, mais comprendrait des minéraux formés sous de très hautes pressions. D'où une densité également élevée, variant de 4.6 vers le noyau à 4.2 vers l'extérieur.



On connaît la **croûte terrestre** par les roches qui nous environnent dont les géologues ont pu reconstituer la position à l'époque de leur formation. On distingue ainsi dans l'écorce terrestre :

- une **croûte océanique** formant le fond des océans, de faible épaisseur, une dizaine de km
- seulement, d'une densité moyenne de 3.3.
- une **croûte continentale** constituant les continents, d'épaisseur variable allant de 30 à 60 km et d'une densité se situant entre 2.7 à 3.3.



Les roches

Les croûtes continentale et océanique sont formées de roches de composition minéralogique spécifique. Pour notre propos, nous dirons qu'une roche est constituée de minéraux.

On distingue trois types de roches selon leur milieu d'origine : les roches éruptives (provenant d'un magma), les roches sédimentaires, et les roches métamorphiques ; ces dernières sont issues de la transformation dans la croûte terrestre d'autres roches.

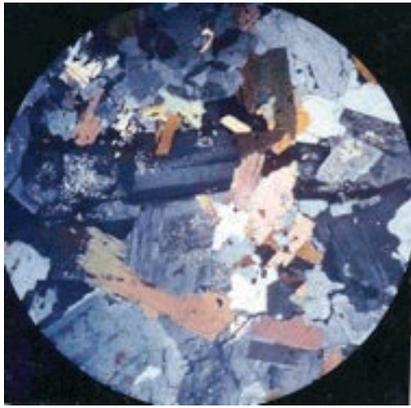
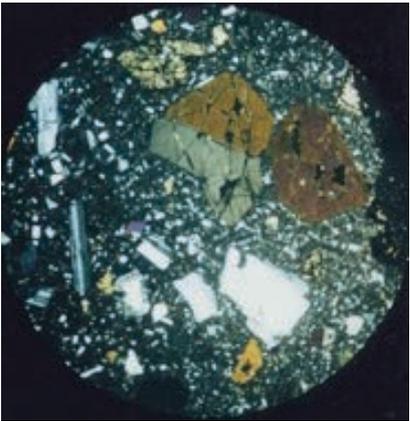
Les roches éruptives

Les roches éruptives (appelées également "roches magmatiques") sont produites par la solidification d'un magma (ou masse minérale en fusion), qui, provenant des profondeurs, fait intrusion dans l'écorce terrestre. On reconnaît par leur composition minéralogique et leur aspect ou texture :

- les **roches profondes** consolidées massivement et lentement dans l'épaisseur même de la croûte terrestre ; les minéraux qui les constituent sont développés en cristaux bien formés. On dit que la roche a une texture grenue ("formée de grains") ;
- les **roches volcaniques** qui s'épanchent à la surface du sol par les volcans et s'y consolident rapidement ; Il n'y a que certains minéraux qui parviennent à bien se former et le ciment entre ces minéraux reste vitreux. On parle de texture porphyrique.

La composition minéralogique des roches éruptives ordinaires est peu variée et correspond à une composition chimique relativement uniforme. On distingue toutefois des roches riches en minéraux sombres ou roches basiques, de densité élevée (2.9 à 3.4), principaux constituants de la croûte océanique et de la base de la croûte continentale ; et des roches comprenant une majorité

de minéraux clairs ou roches acides (densité de 2.65 à 2.85), qui constituent la masse de la croûte continentale.

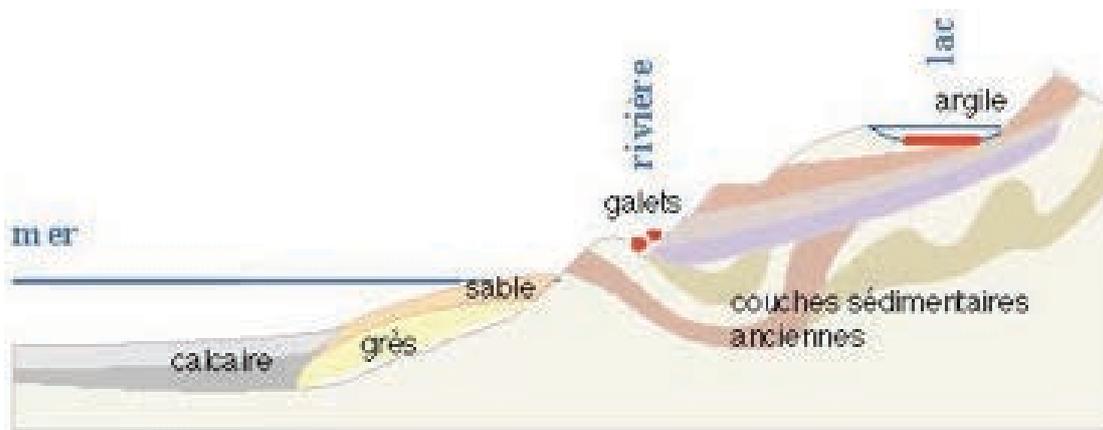
<i>Quelques roches éruptives</i>		
	<i>roches acides</i>	<i>roches basiques ("roches vertes")</i>
roche volcanique roches profondes	<i>rhyolite, dacite</i> GRANITE	BASALTE <i>gabbro</i>
grossissement 60 X environ		
^		
	<i>Le granite est la roche la plus fréquente de la croûte continentale. De texture grenue et bien cristallisée, elle se compose de quartz, feldspath et mica.</i>	<i>Le basalte est la roche la plus habituelle de la croûte océanique. De texture porphyrique, elle est caractérisée par une masse vitreuse avec quelques minéraux plus gros.</i>

photos : Muséum de Genève. granite de Baveno, Italie et basalte de Bohême, Tchéquie

Les roches sédimentaires

Les roches sédimentaires sont le produit des résidus des roches terrestres qui, au terme d'un processus d'érosion, se sont déposés dans des bassins (lits de rivières, lacs ou mers...). Ces formations sont souvent stratifiées : elles se présentent en couches. La roche qui en résulte peut contenir des minéraux de la roche dont elle est issue dans la mesure où ceux-ci ont résisté aux agents physiques et chimiques pendant leur transport. C'est le cas des roches détritiques, en particulier de **sables** ou de **grès** qui sont riches en quartz. Dans les **calcaires**, par contre, qui sont des roches chimiques ou biochimiques formées en milieu marin, il n'y a pas de trace de la roche d'origine, mais l'apport d'organismes marins, en particulier de coquilles, est important. Ces roches sont principalement constituées de calcite.

On peut trouver dans toutes roches sédimentaires des **fossiles**, ou restes pétrifiés d'organismes végétaux ou animaux. Parmi les roches sédimentaires, on compte aussi les houilles, charbons, bitumes et pétroles qui sont des roches formées principalement de carbone sédimentaire et dont la matière d'origine consistait en des débris organiques. Citons également des dépôts sédimentaires qui proviennent de l'évaporation d'eaux chargées d'ions qui permettront la cristallisation de minéraux tels le gypse et le sel gemme.



Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques proviennent de roches éruptives ou de roches sédimentaires qui ont subi des modifications de nature chimique (agissant sur la composition) ou de nature physique (agissant sur la structure et la texture de la roche). Ce sont des "recuits" produits sous des pression et température élevées dans la croûte terrestre, parfois avec un apport chimique extérieur.

Exemples de roches métamorphiques

Roche d'origine	Roche métamorphique
calcaire	marbre : formé de calcite avec une texture grenue
argile	schistes : divers minéraux autres que des argiles présentant une texture schisteuse
basalte	amphibolite : formée principalement d'amphiboles (famille de minéraux)
granite	gneiss : roche de même composition minéralogique que le granite, mais de texture gneissique.

Au cours de la lente formation des montagnes, par exemple, des roches prises sous d'énormes masses peuvent subir des transformations causées par de hautes pression et température ; on parle de **métamorphisme régional ou général**. Lors de l'intrusion de magmas dans la croûte terrestre, la roche environnante subit des transformations locales dues à de fortes chaleurs et à l'apport de substances chimiques particulières. Dans ce dernier cas, on parle de **métamorphisme de contact**.

Origine des minéraux

Une espèce minérale¹, caractérisée par une composition chimique bien précise, ne cristallise que lorsque des conditions géologiques appropriées sont réunies. Les prospecteurs de gemmes auront vite compris que ce n'est pas dans n'importe quelle roche qu'ils trouveront les beaux cristaux qui les intéressent.

Origines possibles des principales gemmes

Type de roche	Minéraux constitutifs des roches et minéraux accessoires de qualité gemme qui les accompagnent parfois.
roches éruptives acides (pegmatites)	feldspaths, micas, quartz béryl, zircon, topaze, tourmaline, corindon, chrysobéryl, spinelle
roches éruptives basiques	minéraux ferre-magnésiens, feldspaths corindon, grenats, feldspaths, jadéite, néphrite, péridot, diamant
roches métamorphiques	calcite, feldspaths, quartz corindon (rubis, saphir), spinelle, chrysobéryl, béryl, grenats, jadéite, néphrite
roches sédimentaires	calcite, dolomie, argile, quartz opale, turquoise

Dans ce tableau, nous mentionnons plusieurs minéraux qui constituent les roches (quartz, les familles des feldspaths ou des micas, la calcite, la famille des argiles...). Ils sont ténus, mal formés pour la plupart, fréquents et parfois fragiles ; en conséquence, ils sont peu intéressants pour les bijoutiers ou les joailliers. Ni les grains de quartz trouvés dans un sable, ni les feldspaths laiteux des granites ne pourront être montés sur bague. Par contre, le quartz **améthyste** ou la **Pierre de lune** (un feldspath) intéresseront les bijoutiers. Il y a aussi des espèces minérales qui en tant que telles, sont recherchées des bijoutiers, par exemple le **diamant** !

Les gemmes dans la nature

Les gisements des pierres précieuses ne se trouvent que dans certains contextes géologiques bien précis. Et en plus, pour qu'un gisement soit apprécié, il doit non seulement produire des gemmes de qualité irréprochable mais en une quantité suffisante de manière à assurer sa rentabilité. On considère ici deux grandes catégories de gisements : les **gisements primaires** et les **gisements secondaires**.

Les gisements primaires

Les gemmes peuvent apparaître dans des gisements d'origine magmatique ou sédimentaire. Ce sont des minéraux accessoires ou accidentels qui se sont développés en beaux cristaux. Ces gisements sont rares.

Les **kimberlites** sont des roches basiques issues des profondeurs du manteau supérieur qui, sous des pressions considérables, sont parvenues en surface. Ce sont les seuls gisements primaires exploités pour le **diamant**.

¹ minéral et espèce minérale sont ici synonymes. Nous définirons ces termes plus loin aux chapitres 2 et 3.

La plupart des gisements se produisent après la formation de leur roche-mère : on trouve les gemmes dans des filons, des roches métamorphiques ou dans des vides de diverses origines.

De nombreux **filons** sillonnent l'écorce terrestre. Ils sont issus de montées magmatiques dans les anfractuosités de la roche favorisant la circulation de gaz et permettant ainsi le développement de beaux et grands cristaux. Les cristaux d'**améthyste** peuvent se développer dans les cavités de roches basaltiques.

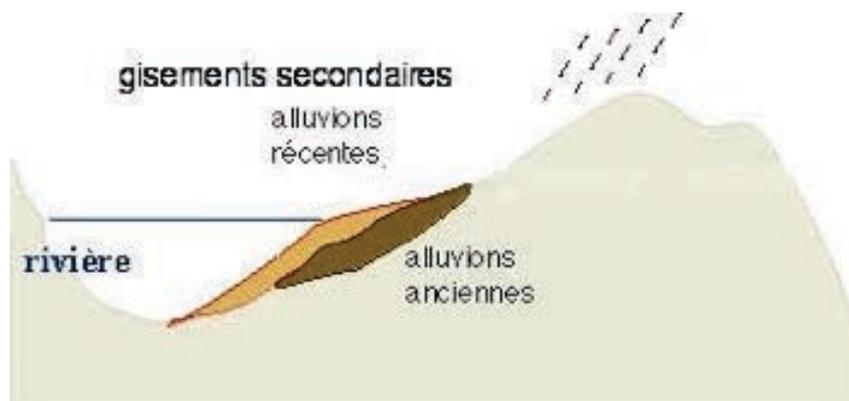
Ce sont des marbres issus d'un **métamorphisme de contact** qui fournissent les **corindons (rubis et saphir)**, à l'état primaire.

Les **pegmatites** sont des roches situées en bordure des granites dans lesquelles un processus lent de cristallisation à partir de gaz (appelé pneumatolyse) a permis la formation de beaux et grands cristaux.

Un gisement primaire peut être altéré par l'action lente et corrosive des eaux souterraines. Il en résulte un dépôt de minéraux dans des vides ou cavités de la roche. Sous nos latitudes et dans notre contexte géologique, les stalactites et stalagmites trouvées dans les grottes sont constituées de calcite. Dans d'autres régions, ce processus d'**altération superficielle** favorise, près des gisements de cuivre, de magnifiques dépôts de **malachite** (qui est, comme la calcite, un minéral de la classe des carbonates). Les veines de **turquoise** sont formées par un procédé similaire.

Les gisements secondaires

Ils proviennent de la désagrégation due aux processus de l'érosion des gisements primaires, matériel qui sera par la suite déposé dans des **alluvions**. On les appelle **placers** ou **gisements alluvionnaires**. Ce sont des produits "détritiques" qui ont été remaniés et transportés par les eaux. L'action de celles-ci favorise la concentration, vers le bas, des matériaux denses alors que les minéraux qui sont légers et tendres peuvent être amenés au loin ou bien sont dissous. Des placers plus anciens, peuvent se situer sous d'autres couches de sédiments ou même de laves ; leur contenant n'est ainsi pas renouvelé.



La description des méthodes de recherche et de prospection des gisements sort du cadre de ce cours. C'est en surface qu'on décèle d'abord la présence de gemmes. On estime ensuite la teneur et l'étendue du gisement. L'extraction de la roche qui contient les bruts s'effectue dans des mines souterraines ou à ciel-ouvert. On procède par la suite à un tri de manière à éliminer la gangue (ou roche-mère dans laquelle s'est formé le minéral), soit par :

- élimination des minéraux magnétiques à l'aide d'électro-aimants,
- séparation des produits par densité,
- enfin, par un tri manuel et un classement approprié.

Chapitre 2 : Eléments de chimie minérale

Ce chapitre résume en quelques pages des notions élémentaires de chimie que chacun devrait connaître avant d'aborder l'étude des pierres précieuses. Ce rappel met l'accent sur des notions de base et il permet une approche simplifiée de la classification des minéraux utilisée en gemmologie.

Les états de la matière

La matière se présente de trois manières : à l'état gazeux, liquide ou solide.

Ces trois états sont importants dans le cadre de l'étude des gemmes. Si les gemmes sont toujours des solides, des inclusions dans la gemme peuvent contenir des gaz ou des liquides.

A l'état solide, on distingue :

- **l'état cristallin** : le solide est constitué d'atomes de composition homogène et parfaitement ordonnés. Cette structure atomique (ou **structure cristalline**) permet le développement géométrique des faces extérieures (p. ex. le quartz "cristal de roche" qui, dans la nature se présente sous la forme de cristaux transparents incolores formant des prismes hexagonaux).
- **l'état amorphe** : les atomes ne sont pas ordonnés dans la substance minérale qui ne possède pas de faces apparentes (p. ex. le verre).

Il existe un état intermédiaire entre ces deux états. Il s'agit de cristaux qui n'ont pas pu se développer correctement et sont restés infiniment petits. La substance se présente en agrégat de ces microcristaux et n'a pas de forme extérieure particulière. On la qualifie de **microcristalline**. La **calcédoine** est du quartz microcristallin.

L'atome et quelques éléments chimiques

Rappelons que L'atome est constitué d'un noyau formé de **protons** et de **neutrons** ainsi que d'**électrons** qui gravitent autour du noyau. Rappelons que les protons sont de charge positive alors que les neutrons sont neutres. Les électrons, de plus petite taille que les protons ou les neutrons sont, eux, chargés négativement. C'est le nombre de protons qui définit la nature de l'atome. Donc, chaque atome porte un numéro, le numéro atomique ou nombre de protons. L'atome de fer, par exemple, comprend toujours 26 protons. Les atomes ont une aptitude soit à donner (**cation**), soit à recevoir des électrons (**anion**). Le fer, qui est un cation, aura tendance à expulser 2 ou 3 électrons ; on dit qu'il est de charge² positive 2+ ou 3+. L'oxygène, un anion, aura tendance à capturer 2 électrons, et il est chargé négativement à 2-. Les nombres de neutrons sont aussi variables ; ils déterminent les divers isotopes d'un élément chimique.

Un **élément chimique** est constitué d'atomes de même nature. On connaît actuellement plus d'une centaine d'éléments chimiques, dont 90 ont été trouvés à l'état naturel, sous forme de gaz, de liquide ou de solide. Le cuivre ou l'or peuvent être trouvés à l'état pur dans la nature ; on parle alors de cuivre natif et d'or natif. Les éléments chimiques s'associent entre eux pour former des corps simples (comme l'or ou le cuivre natifs) ou des corps composés (p. ex. l'oxyde de fer, minéral hématite). C'est ainsi qu'on les trouve dans la croûte terrestre.

Comme le montre le tableau ci-après, seuls une dizaine d'éléments constituent les 99 % de la croûte terrestre ! Signalons encore des éléments chimiques particulièrement rares comme le lithium (de charge 1 +), le béryllium (de charge 2 +) ou le bore (de charge 3 +) qui peuvent entrer dans la composition chimique d'espèces minérales de qualité gemme.

² le terme utilisé en chimie est "valence", ici équivalent à la charge.

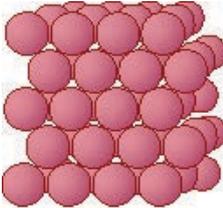
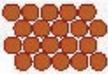
La liaison chimique

La plupart des atomes coexistent en s'associant à d'autres atomes formant ainsi des **molécules** qui elles-même s'associeront et formeront les corps. Il s'opère alors une liaison chimique, c'est-à-dire une mise en commun d'électrons engagés par chacun des atomes. On distingue :

- la liaison iono-covalente entre un cation et un anion : les électrons sont attirés par les anions, ce qui tend à les grossir. Par exemple, le sodium Na se lie au chlore Cl de manière ionique³ pour donner la molécule qui constitue le minéral NaCl appelé sel gemme et aussi halite. Lorsque la mise en commun d'électrons entre les atomes est équitable, les électrons gravitent à mi-chemin entre les deux atomes et il se forme une liaison purement covalente, comme, par exemple, pour le diamant composé de carbone uniquement.
- la liaison métallique : lorsque les électrons "naviguent" librement dans la matière qui en résulte ; ils peuvent être induits par un courant électrique. Ce sont par exemple les métaux des bijoutiers (Cu, Ag, Au etc...).

Dans les minéraux, les atomes sont liés entre eux par l'un ou l'autre de ces 2 types de liaison. Comme le montre le tableau ci-dessous, l'oxygène est omniprésent dans la croûte terrestre et la plupart des minéraux sont des oxydes ou des dérivés, et ils sont conditionnés par des liaisons iono-covalentes.

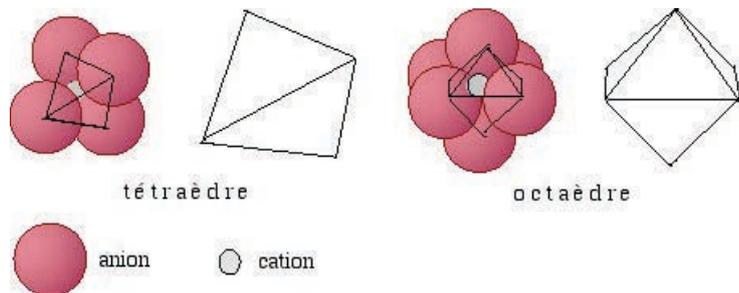
Les principaux éléments chimiques de la croûte terrestre

	nom et symbole	% nb d'atomes	N°	charge	taille	masse atomique	
	oxygène	O	61.5	8	2 -	1.40 Å	16
	Silicium	Si	20	14	4 +	0.41 Å	28.1
	aluminium	Al	6	13	3 +	0.50 Å	27.0
	hydrogène	H	2.8	1	1 +	0.32 Å	1.0
	sodium	Na	2.3	11	1 +	0.95 Å	23.0
	calcium	Ca	1.8	20	2 +	0.99 Å	40.1
	fer	Fe	1.8	26	2+ 3+	0.76, 0.64	55.8
	magnésium	Mg	1.7	12	2 +	0.65 Å	24.3
	potassium	K	1.2	19	1 +	1.33 Å	39.1
	autres éléments	0.9					

³ en chimie, on utilise "électrovalent".

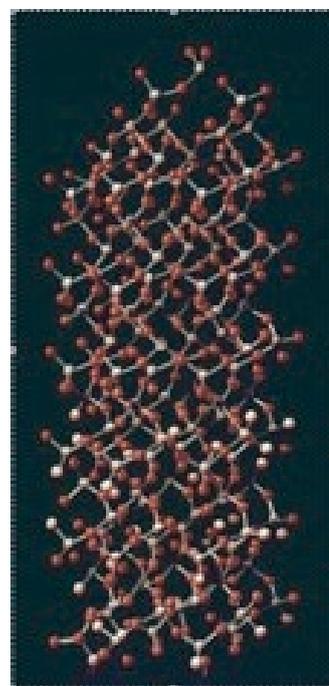
Structure cristalline

Dans les minéraux, les atomes s'agencent de manière ordonnée. On appelle cet agencement **structure cristalline**. Une des particularité de l'oxygène est de constituer des groupements anioniques⁴ qui comme des briques, constituent la charpente de la structure cristalline. Ces briques ont des configurations très stables : par exemple une configuration en tétraèdres avec 4 oxygènes entourant un cation de silicium (comme dans le quartz) ; ou encore une configuration d'octaèdre ou d'autres figures géométriques (cube ou triangle).



Ces briques ont des configurations très stables : par exemple une configuration en tétraèdres avec 4 oxygènes entourant un cation de silicium (comme dans le quartz) ; ou encore une configuration d'octaèdre ou d'autres figures géométriques (cube ou triangle).

Dans l'exposition des Minéraux du Muséum de Genève, on peut voir des modèles de structures cristallines et visualiser dans la troisième dimension, l'agencement des atomes dans les cristaux.



Structure cristalline du quartz SiO₂

En rouge les oxygènes et en brun les siliciums. On note l'alternance des oxygènes (anions) et des siliciums (cations). Du fait du caractère électrique de la liaison ionique, chaque cation est lié exclusivement à des anions et vice versa (photo Muséum de Genève).

Propriétés physico-chimiques

La liaison chimique conditionne non seulement l'aspect et la forme extérieure du composé ou minéral, mais aussi ses propriétés physiques : ainsi l'aspect métallique des minéraux métalliques et leur malléabilité. Le soufre (S, N° 16 dans le tableau périodique), lorsqu'il se lie à des atomes comme le fer ou le cuivre par liaison métallique donnera un minéral possédant un éclat métallique (p. ex. la *pyrite*, Fe S₂). Les minéraux à liaisons iono-covalentes peuvent être parfaitement transparents et extrêmement durs, résistant aux attaques mécaniques et chimiques (le diamant, C - formé de carbone pur - liaison covalente ; le corindon, Al₂ O₃) ; mais d'autres sont tendres ou facilement dissous (le sel gemme ou halite, NaCl, sodium et chlore - liaison ionique).

⁴ "groupement anionique" et "groupe anionique" sont synonymes. On l'appelle parfois "radical".

Formules chimiques simples

Pour des composés iono-covalents, on calcule la composition chimique à partir des charges des des anions et des cations. Pour être stable, un composé doit être électriquement neutre et la condition suivante doit être remplie :

$$(\text{charge du cation}) \times (\text{nombre de cations}) = (\text{charge de l'anion}) \times (\text{nombre d'anions})$$

N.B. Les charges des éléments chimiques qui nous concernent sont données dans le tableau des "principaux éléments chimiques de la croûte terrestre".

Petite méthode pour l'établissement de formules chimiques simples

- reporter la charge du cation et celle de l'anion sur le nombre de manière inversée :

exemple pour le **quartz** :

silicium (Si), cation de charge 4+ et oxygène (O), anion de charge 2- → Si₂O₄

réduire la formule trouvée au plus petit dénominateur commun → SiO₂

exemple pour le **corindon** :

aluminium (Al) de charge 3+ et oxygène de charge 2- → Al₂O₃

- Lorsque plusieurs cations sont présents dans la formule chimique, on procède de la même manière en décortiquant la formule et en considérant chaque fois un anion et un cation.

exemple pour le **chrysobéryl** :

béryllium (Be) 2+ et oxygène 2- après calcul du ppdc → BeO

aluminium (Al) 3+ et oxygène 2- → Al₂O₃

total : → BeAl₂O₄

Les minéraux

Une *espèce minérale*⁵ est définie par une structure cristalline de composition chimique précise : elle se compose d'atomes en nombre fini qui s'ordonnent dans un réseau cristallin. On connaît environ 4'000 espèces minérales, mais seules quelques dizaines d'entre elles peuvent posséder une qualité gemme et se prêter à la bijouterie ; les plus fragiles, les pierres de collection, sont soigneusement préservées. Pour le bijoutier-joaillier, une douzaine d'espèces minérales sont vraiment importantes. Les formules chimiques peuvent être simples (**quartz, corindon, diamant**) mais peuvent aussi se compliquer en présence de groupements anioniques⁵. Les chimistes et les minéralogistes distinguent alors cette partie de la formule chimique pour définir une vingtaine de classes "chimiques" dans lesquelles ils classent les espèces minérales.

Dans une structure cristalline, le groupe anionique se présente toujours une géométrie stable. Le groupement carbonate est constitué de 3 atomes d'oxygène centrés sur un atome de carbone et possède une configuration triangulaire. Le groupe Si O₄ forme un tétraèdre (voir le dessin plus haut). Dans les structures cristallines les groupes anioniques se lient à d'autres cations pour conserver l'équilibre électrique (Na, Ca, Mg, Fe etc.). Le groupement anionique est en effet caractérisé par une charge négative (ch GA) qui doit être compensée par une charge positive et

⁵ "espèce minérale" est synonyme de "minéral" pour un minéralogiste.

que nous calculons dans les exemples ci-dessous en utilisant la condition énoncée à la page précédente.

$$[(\text{charge du cation}) \times (\text{nombre de cations})] - [(\text{charge de l'anion}) \times (\text{nombre d'anions})]$$

Nomenclature et symboles de quelques groupes anioniques

	composition et charge		calcul de la charge du groupe	groupe anionique
carbonates	1 C ⁴⁺	3 O ²⁻	1x4 (+) - 3x2 (-) = 2-	(CO ₃) ²⁻
sulfates	1 S ⁶⁺	4 O ²⁻	1x6 (+) - 4x2 (-) = 2-	(SO ₄) ²⁻
phosphates	1 P ⁵⁺	4 O ²⁻	1x5 (+) - 4x2 (-) = 3-	(PO ₄) ³⁻
silicates	1 Si ⁴⁺	4 O ²⁻	1x4 (+) - 4x2 (-) = 4-	(SiO ₄) ⁴⁻
	1 Si ⁴⁺	3 O ²⁻	1x4 (+) - 3x2 (-) = 2-	(SiO ₃) ²⁻

Dans le carbonate de calcium CaCO₃ qui compose la calcite, le calcium de charge 2+ vient équilibrer la charge 2- du groupe (CO₃)²⁻ et l'équilibre chimique est réalisé. D'autres formules chimiques sont très compliquées : le boro-silicate de magnésium et de fer ... est le nom "chimique" de la tourmaline ! Les espèces minérales sont groupées dans une vingtaine de classes. Le premier critère de la classification tient compte uniquement de la composition chimique.

Classes chimiques des minéraux

I. Minéraux dépourvus d'oxygène

Eléments natifs	Minéraux constitués d'un seul élément.
Halogénures	[Cl] ¹⁻ , [F] ¹⁻ , plus rarement [I] ¹⁻ et [Br] ¹⁻ .
Sulfures	[S] ²⁻ , comprend aussi [As] ³⁻ , [Sb] ³⁻ , [Se] ²⁻ , [Te] ²⁻ .
Sulfosels	[AsS ₃], [SbS ₃], [AsS ₄], [SbS ₄], [As ₄ S ₁₃], etc..

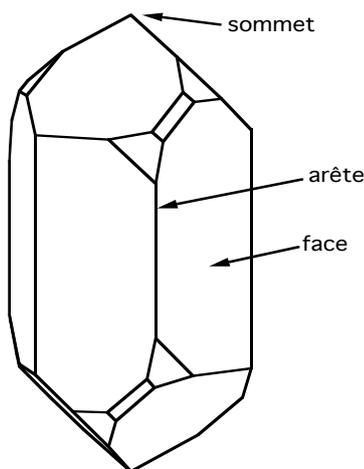
II. Minéraux oxygénés, non silicatés

Oxydes & hydroxydes	[O] ²⁻ , [OH] ¹⁻ , comprend aussi [Nb ₂ O ₆] ²⁻ , [Ta ₂ O ₆] ²⁻ , .
Carbonates	[CO ₃] ²⁻ , comprend aussi [NO ₃] ¹⁻ .
Borates	[BO ₃] ³⁻ , [B ₂ O ₅] ⁴⁻ , [B ₇ O ₁₃] ⁵⁻ , etc..
Sulfates	[SO ₄] ²⁻ , comprend aussi [CrO ₄] ²⁻ , [TeO ₃] ²⁻ , [SeO ₃] ²⁻ .
Tungstates *	[WO ₄] ²⁻ , comprend aussi [MoO ₄] ²⁻ .
Phosphates	[PO ₄] ³⁻ , comprend aussi [AsO ₄] ³⁻ , [VO ₄] ³⁻ , [SbO ₄] ³⁻ .

III. Silicates et alumino-silicates

Nésosilicates	[SiO ₄] ⁴⁻ .
Sorosilicates	[Si ₂ O ₇] ⁶⁻ .
Cyclosilicates	[Si ₃ O ₉] ⁶⁻ , [Si ₄ O ₁₂] ⁸⁻ , [Si ₆ O ₁₈] ¹²⁻ .
Inosilicates	[SiO ₃] ²⁻ , [Si ₄ O ₁₁] ⁶⁻ .
Phyllosilicates	[Si ₂ O ₅] ²⁻ , [AlSi ₃ O ₁₀] ⁵⁻ , [Al ₂ Si ₂ O ₁₀] ⁶⁻ .
Tectosilicates	[AlSi ₃ O ₈] ¹⁻ , [Al ₂ Si ₂ O ₈] ²⁻ , [Al ₂ Si ₃ O ₁₀] ²⁻ , [Al ₂ Si ₇ O ₁₈] ²⁻ .

Chapitre 3 : Les cristaux



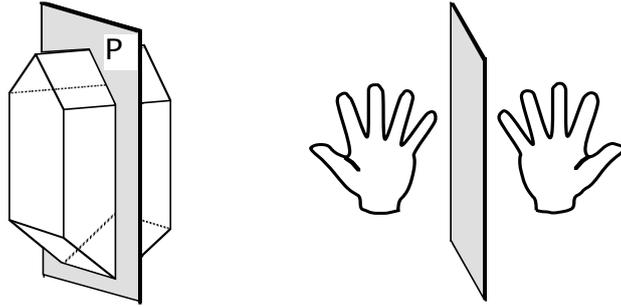
Un **cristal** est composé d'un arrangement ordonné à répétition infinie d'atomes (une structure cristalline). C'est grâce à cette répétition que la forme géométrique régulière du cristal est possible. Un cristal présente des plans, les **faces**, qui se coupent en créant des **arêtes**, lesquelles, en se rencontrant en un point, forment des **sommets**. D'après les lois de la cristallographie, les cristaux sont classés dans **7 systèmes cristallins**.

Le but de la cristallographie (ou science des cristaux) est de déterminer l'arrangement des atomes dans la matière. Comme il n'existe pas d'appareil qui permette l'observation directe de la matière à l'échelle atomique, le cristallographe a recours à une méthode de calcul complexe : à partir de mesures effectuées par Rayons X ou par d'autres ondes de longueur très courte, il va calculer et ainsi reconstituer l'arrangement atomique. Si la matière est amorphe, cet arrangement sera quelconque. Par contre, pour des cristaux comprenant une structure cristalline et une composition chimique précises, soit la majorité des minéraux, cet arrangement est bien précis. La structure cristalline est alors décrite par la plus petite entité (motif ou unité asymétrique) qui sera reproduite par les lois de la symétrie dans un volume plus grand (la maille élémentaire) qui, elle, sera reproduite par simple translation et finira par couvrir un volume visible à l'oeil. C'est grâce à la répétition ordonnée (non quelconque) des atomes dans un volume que l'analyse des cristaux par la méthode des Rayons X est possible. L'image photographique obtenue par Rayons X est comme une empreinte digitale du cristal ou du minéral. Mais pour pouvoir l'analyser correctement, il faut recourir à des méthodes de calcul complexes qui demandent l'utilisation d'ordinateurs. A dimension humaine, on peut analyser chaque cristal par des axes de symétrie simples que nous allons étudier. Ces mêmes lois de symétrie permettent de reconstituer, à l'échelle atomique, l'agencement du motif dans la maille élémentaire. Le cristallographe distingue 7 systèmes cristallins, qu'il subdivise en 32 groupes (les groupes ponctuels) pour classer les cristaux qu'il aura étudié à l'échelle macroscopique. Pour pouvoir analyser les photographies rayons X, il considère une subdivision plus fine, soit 230 groupes (les groupes d'espaces) dans lesquels il classe tous les cristaux. Dans un but d'identification des minéraux, nous nous satisferons de l'étude des 7 systèmes cristallins et des principaux axes de symétrie que les régissent.

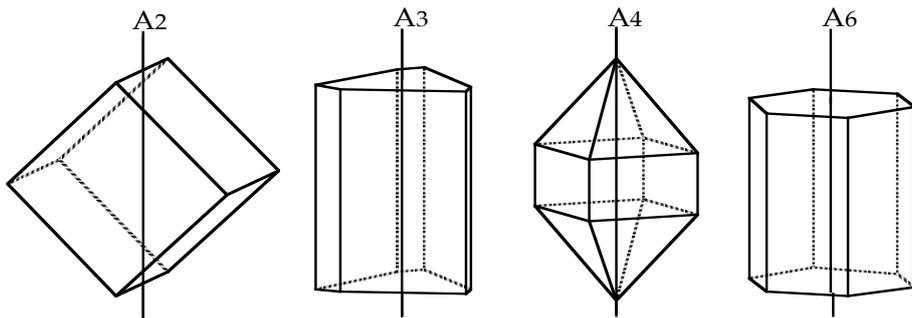
Les éléments de symétrie

Rappelons quelques principes de la symétrie ainsi que des définitions de termes qui nous seront utiles pour l'étude macroscopique des cristaux.

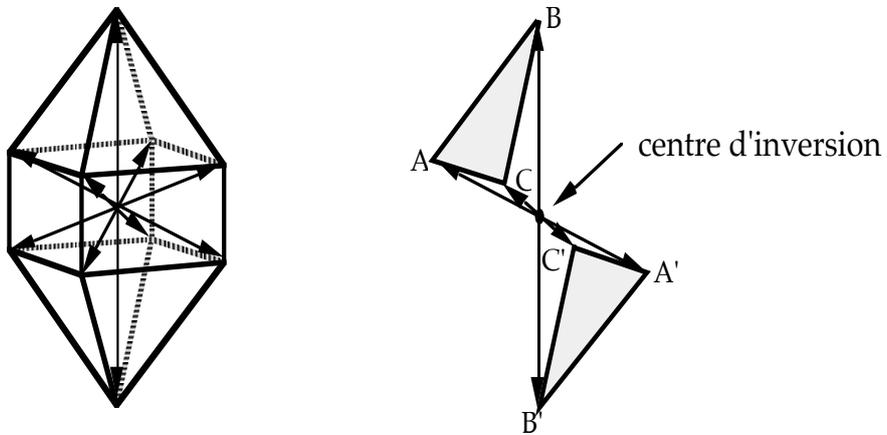
- **Le centre de symétrie** : si tous les points d'un objet peuvent être répétés sur des droites concourantes à un point et à égales distances de part et d'autre de celui-ci, on dit qu'il possède un centre de symétrie. Toutes les faces d'un solide qui possède un centre d'inversion sont parallèles deux à deux. Les parallélépipèdes ont donc tous un centre d'inversion.
- **Le plan de symétrie** (ou plan miroir) : si tous les points d'un objet peuvent être répétés sur des normales (perpendiculaires) à un plan et à égales distances de part et d'autre de celui-ci, on dit qu'il possède un plan de symétrie.
- **Les axes de symétrie** (ou axes de rotation) : si au cours d'une rotation autour d'une droite, un objet prend une autre ou plusieurs autres positions identiques qui s'opèrent à angle constant, on dit qu'il possède un axe de rotation d'ordre n .



Le plan de symétrie agit comme un miroir



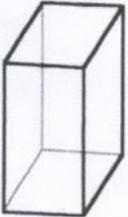
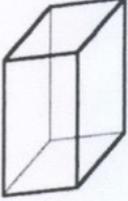
Comme l'axe d'un carrousel voici les axes de rotation d'ordre 2, 3, 4 et 6



Répétition d'une face par un centre d'inversion

Les 7 systèmes cristallins

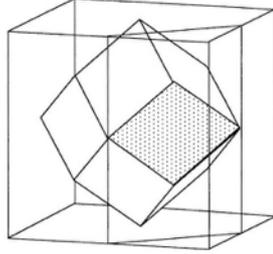
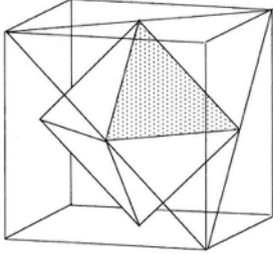
On définit chaque **système cristallin** par un polyèdre fondamental possédant les éléments de symétrie et représentant la forme la plus simple du système. Ce polyèdre est un parallélépipède pour tous les systèmes, sauf pour le système hexagonal pour lequel c'est un prisme hexagonal. Le polyèdre fondamental matérialise en quelque sorte, chaque système cristallin .

Caractéristique des 7 systèmes cristallins			
Système cristallin	Polyèdre fondamental	Eléments de symétrie caractéristiques	Exemple de minéral
Cubique		4 axes d'ordre 3 3 axes d'ordre 4	diamant spinnelle grenats
Quadratique ou Tétraonique		1 axe principal d'ordre 4	zircon
Hexagonal		1 axe principal d'ordre 6	béryl
Rhomboédrique ou Trigonal		1 axe principal d'ordre 3	quartz corindon tourmaline
Orthorhombique		3 axes d'ordre 2	chrysobéryl topaze péridot
Monoclinique		1 axe d'ordre 2	spodumène orthose
Triclinique		pas d'axes ni plans	labradorite

Les troncatures

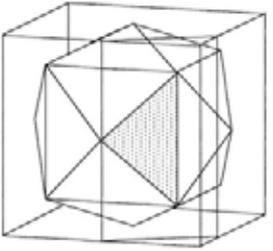
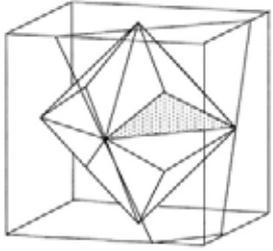
Par les troncatures des sommets ou des arêtes du polyèdre fondamental, on peut réaliser toutes les formes de cristaux idéales tout en respectant la symétrie du cristal indiquée dans le tableau sous "axe de rotation principal".

Quelques formes obtenues par troncatures symétriques du cube



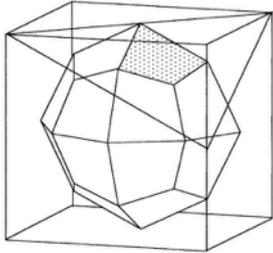
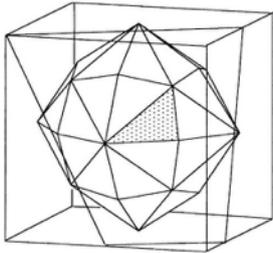
à gauche: octaèdre obtenu par troncature symétrique sur les sommets

à droite: dodécaèdre rhomboïdal obtenu par troncature symétrique des douze arêtes.



à gauche: triakis octaèdre, ou octaèdre pyramidé, est obtenu par troncature oblique des sommets.

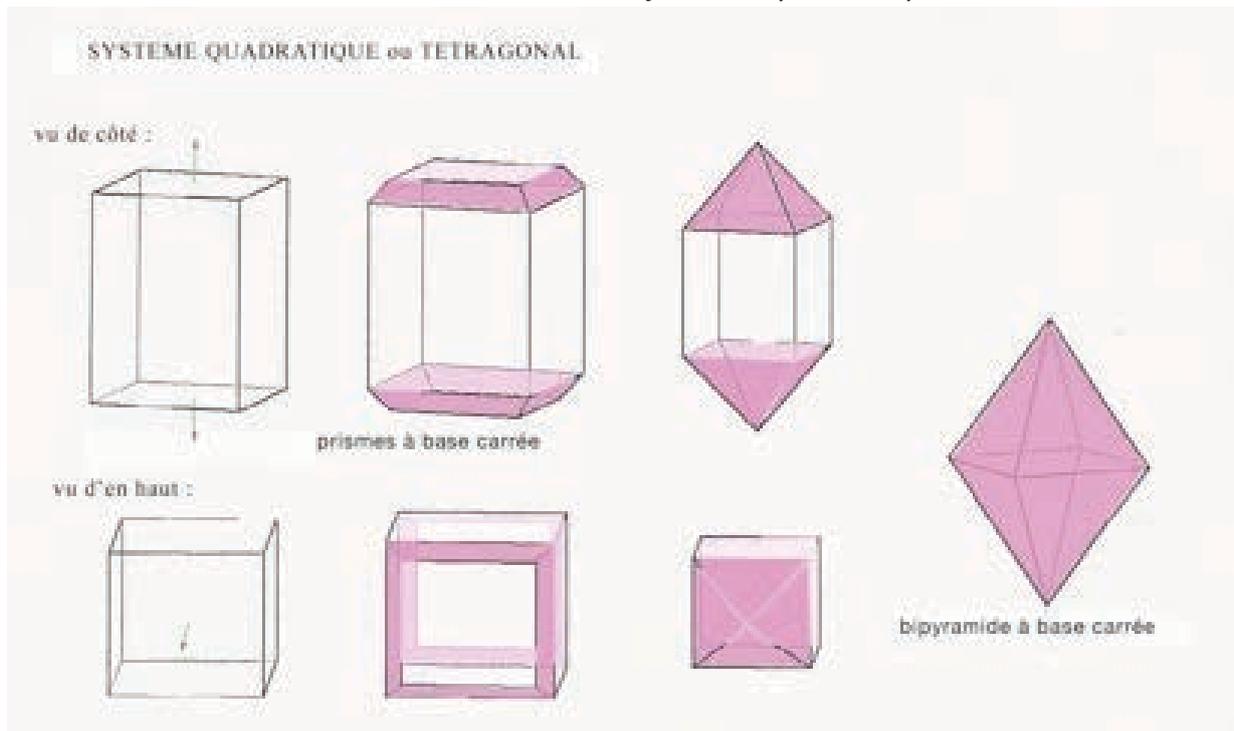
à droite: cube pyramidé obtenu par troncature oblique des arêtes.



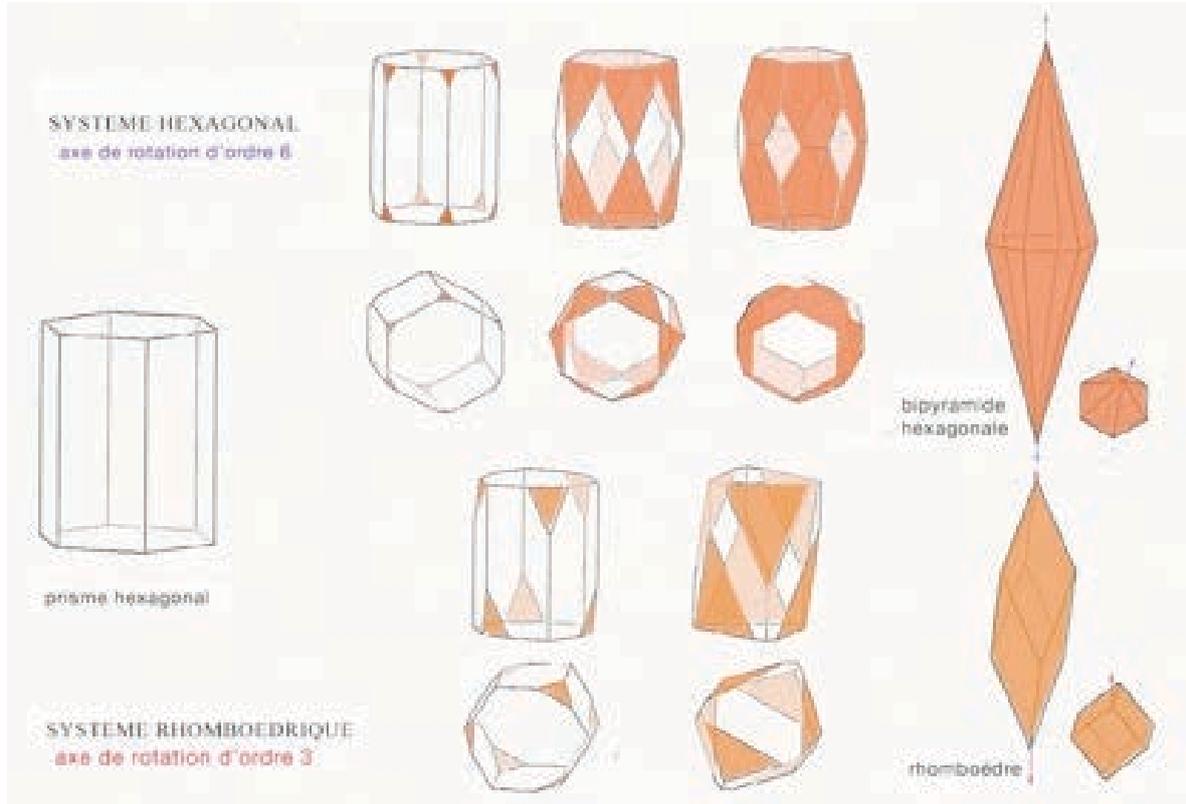
à gauche: hexakis octaèdre obtenu par troncature asymétrique des sommets.

à droite: trapézoèdre obtenu par troncature oblique des sommets.

Formes dérivées du système quadratique



Formes dérivées des systèmes hexagonal et rhomboédrique



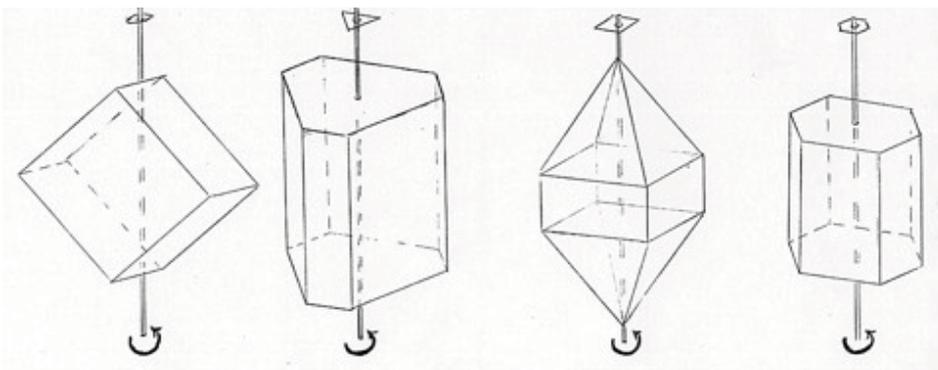
Les axes de rotation

On analyse les cristaux au moyen d'éléments de symétrie. Ceci est moins immédiat pour des cristaux qui présentent un développement irrégulier de leurs faces. Mais il faut savoir que dans un cristal l'angle entre 2 faces est constant, quelque soit leur développement relatif. Donc, seule l'orientation des faces importe et l'angle qui existe entre les faces est la seule caractéristique réelle de la symétrie.

Sur des petits cristaux, les minéralogistes mesurent ces angles avec un appareil appelé goniomètre. Des goniomètres utilisent la propriété de réflexion de la lumière sur les faces du cristal (à l'identique de la réflexion de la lumière sur un miroir). Nous pouvons faire ces mêmes analyses sans aucun appareil sur des cristaux suffisamment bien formés.

Les formes de cristaux sont ainsi caractérisées par des axes de rotations d'ordres 2, 3, 4 ou 6 qui sont les seules rotations possibles. On remarque dans chacune de ces formes l'invariabilité des angles formés par les faces.

Formes idéales analysées au moyen d'axes de rotations



Pour notre propos, nous ajouterons que les formes qui obéissent à la même symétrie et possèdent de mêmes axes de rotation, appelé ici **axes de rotation principaux**, appartiennent au même système cristallin. Pour chaque système cristallin, ces axes sont cités sur le tableau ci-dessus. Notons que l'axe de rotation principal caractérise la plus haute symétrie dans l'analyse du cristal. Dans l'exemple du système quadratique que nous matérialisons par un prisme à base carrée ou par une règle carrée (dans les exemples imagés plus haut), il y a en plus de l'axe d'ordre 4, 2 fois 2 axes d'ordre 2. Dans cet exemple, l'axe de plus haut ordre de rotation est l'axe d'ordre 4, soit l'axe de rotation principal qui définit le système quadratique. Le système cubique est caractérisé par 4 axes d'ordre 3 passant par les 8 sommets du cube. On leur ajoute les 3 axes d'ordre 4 qui passent, eux, par le centre des faces (voir le dessin ci-dessus).

L'habitus et les formes des cristaux

Les minéraux développent naturellement une morphologie qui leur est propre. C'est ce qu'on appelle l'**habitus** du minéral. Dans la mesure où les formes du cristal sont visibles on se sert, pour nommer l'habitus, de la nomenclature que nous venons d'étudier. Dans le tableau qui suit, on remarque que les cristaux cubiques possèdent une grande variété de formes. On peut analyser ces formes en retrouvant les axes de rotation principaux. On peut également les obtenir par troncature des sommets ou des arêtes du polyèdre fondamental.

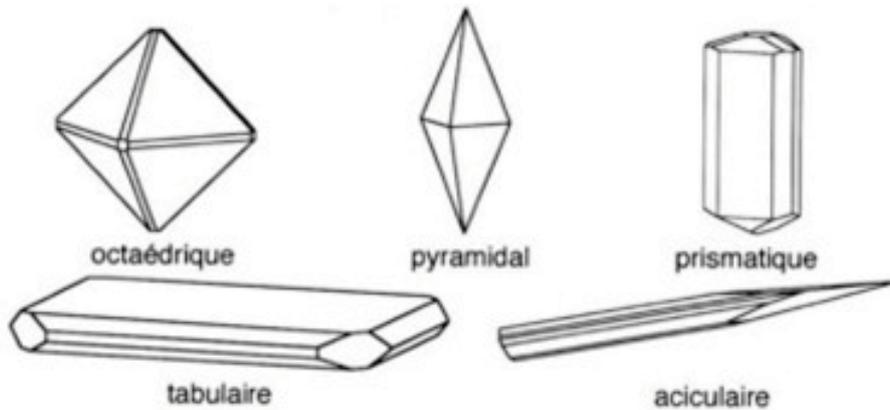
Habitus de quelques minéraux de qualité gemme

Système cristallin	habitus	exemple de minéraux
Cubique	cube, cuboctaèdre	diamant
	octaèdre	spinelle, diamant
	trapézoèdre	grenat almandin
	dodécaèdre	grenat grossulaire
	tétraèdre	spinelle
	dodécaèdre pentagonal	pyrite
Quadratique	prisme à base carrée	zircon
	bipyramide à base carrée	
Hexagonal	prisme à base hexagonale	béryl
	bipyramide à base hexagonale	
Rhomboédrique	prisme à base hexagonale	quartz
	prisme à base triangulaire	tourmaline
	bipyramide à base hexagonale	corindon
Orthorhombique	prisme à base losange (rhombe)	topaze
	prisme à base rectangle	chrysobéryl
Monoclinique	prisme	spodumène
Triclinique	prisme	labradorite (feldspath)

N.B. Un minéral peut se présenter sous divers habitus suivant son gisement, mais il appartient toujours à un seul et même système cristallin.

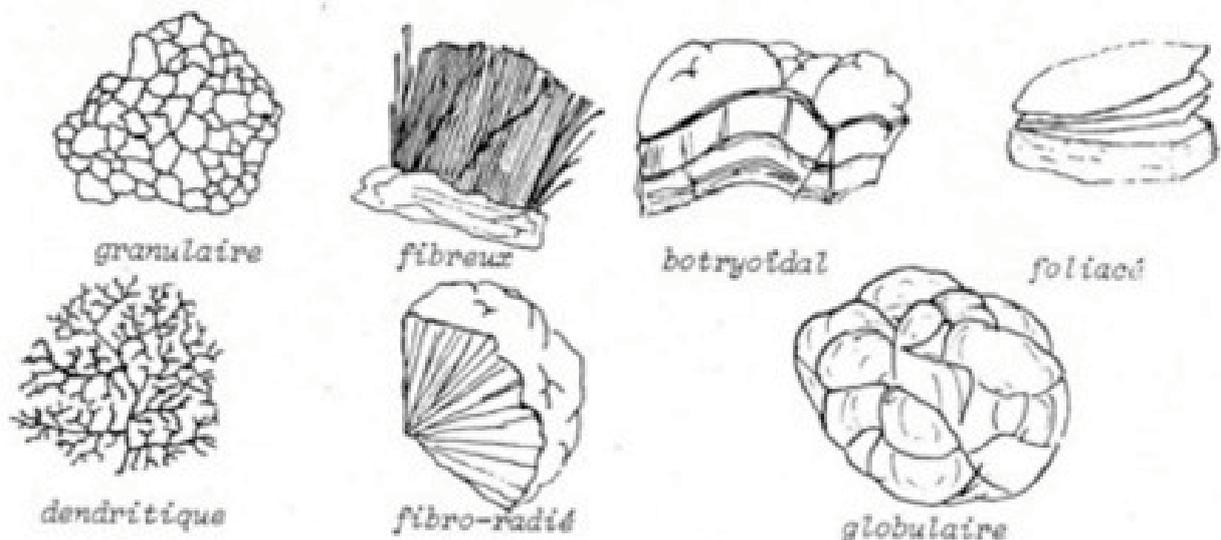
En plus des noms d'habitus réservés à des cristaux bien formés, il existe d'autres termes pour qualifier un habitus. Il arrive que des minéraux ne privilégient que certaines directions de croissance, d'où un habitus "tabulaire" ou "aciculaire" (en aiguille).

Quelques noms qualifiant des habitus



D'autres minéraux restent à l'état microcristallin et se présentent par exemple sous une forme microscopique ; ils ont, à l'échelle macroscopique, un aspect particulier qui fait leur identité. Pour qualifier les habitus d'agrégats de minéraux, on utilise des adjectifs, dont certains sont évocateurs comme "botryoïdal" en forme de grappes de raisin ou "dendritique" (ou arborescent), en forme d'arbre.

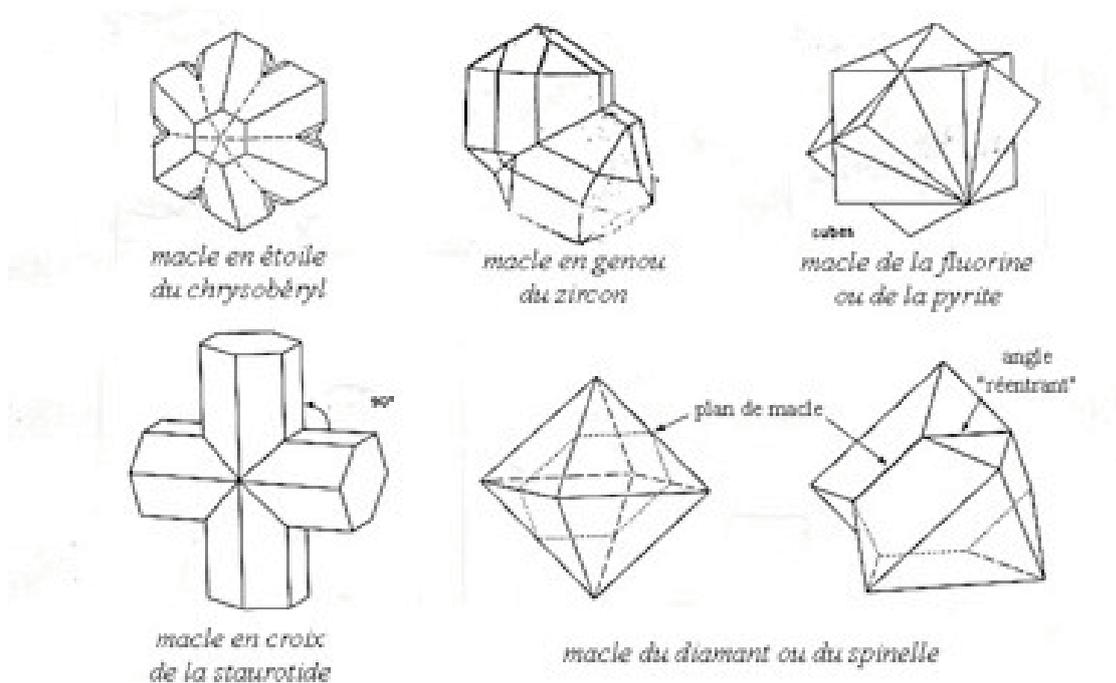
Quelques noms d'habitus utilisés pour qualifier des agrégats de minéraux



Particularités cristallines

Cristaux maclés

Dans la nature, les cristaux croissent souvent à plusieurs en formant des agrégats. Ces groupements sont dus à des circonstances fortuites au moment de leur croissance et sont reconnaissables à leur arrangement irrégulier. Lorsque, par contre, plusieurs individus (ou cristaux) se présentent accolés les uns aux autres en obéissant à des lois géométriques bien précises, on parle alors de *macle* et de **cristaux maclés**. La macle du diamant par exemple, provient d'une rotation de 180° de 2 individus autour d'un plan (plan de macle). Il existe aussi des macles par pénétration (la macle en étoile du chrysobéryl, ou la macle en croix de la staurotide). On reconnaît les cristaux maclés aux angles "rentrant" qu'ils présentent.



macle en croix de la staurotide.



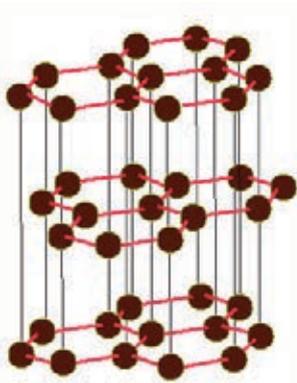
fluorine, macles par interpénétration



rubis (Mysore, Inde), macles polysynthétiques (en fines lamelles).

Polymorphisme

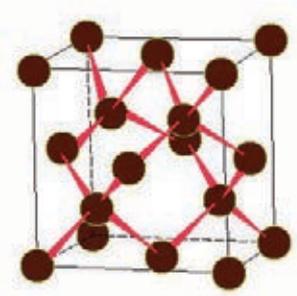
Un composé chimique peut cristalliser sous plusieurs formes cristallines selon les conditions de pression et température auxquelles il est soumis. Le carbone ne cristallise sous forme de diamant que dans des conditions de très hautes pression et température réunies à l'état naturel dans les gisements de kimberlites. Le plus souvent, dans la croûte terrestre, il cristallise sous la forme de graphite.



graphite

système hexagonal
 habitus : massif, rarement
 en cristaux tabulaires hexagonaux
 dureté : 1 à 2
 densité : 2.2
 facile à écraser
 éclat métallique

(photo Jo Edkins)



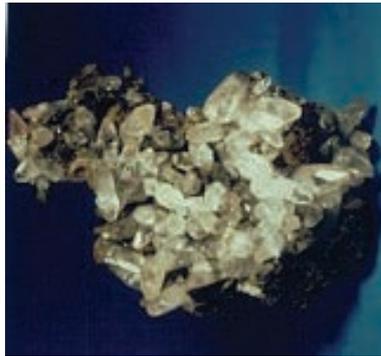
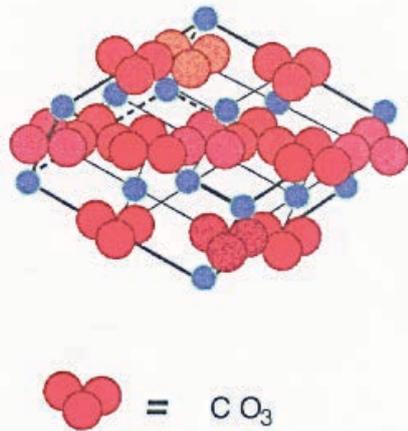
diamant

système cubique
 habitus : octaèdre,
 dodécaèdre, "cube",
 ici la forme plus rare du cuboctaèdre.
 dureté = 10
 densité = 3.52
 éclat adamantin
 (photo Muséum de Genève)

Les dureté et densité, le clivage ainsi que l'éclat sont des propriétés physiques des minéraux indiqués pour comparaison. Elles seront définies ultérieurement au chapitre 4.

Isomorphisme

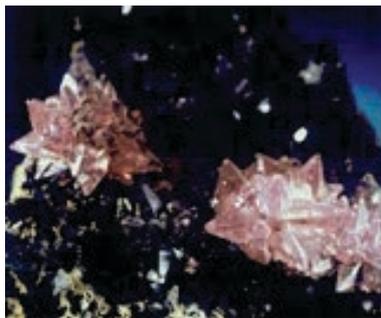
Lorsque des minéraux ont des compositions chimiques légèrement différentes, mais possèdent la même structure cristalline, on parle de minéraux **isomorphes**. La famille des grenats est une famille de minéraux isomorphes. C'est également le cas des nombreux carbonates à l'exemple des minéraux ci-dessous. La calcite est le carbonate de calcium ; dans la smithsonite, du zinc a remplacé le calcium et dans la rhodochrosite, c'est le manganèse qui est présent. Ces différentes compositions chimiques confèrent également à chaque minéral des propriétés physiques particulières. On trouve de la calcite et de la rhodochrosite massives taillées en cabochons.



CaCO_3 calcite
système rhomboédrique
habitus : rhomboèdre,
scalénoèdre
dureté : 3
densité : 2.7
clivage parfait



ZnCO_3 smithsonite
système rhomboédrique
habitus : rhomboèdre,
scalénoèdre, souvent
en masse botryoïdale.
dureté : 4 à 5
densité : 4.3
clivage parfait



MnCO_3 rhodochrosite
système rhomboédrique
habitus : rhomboèdre,
scalénoèdre, massif.
dureté : 3 à 4
densité : 3.7
clivage parfait

Pseudomorphose

Il arrive que des cristaux présentant l'habitus d'un minéral soient remplis d'une substance chimique qui ne correspond pas à la formule chimique de ce minéral. C'est qu'un autre minéral s'est substitué à ce premier minéral. On parle alors de **pseudomorphose**. L'oeil-de-tigre est de la silice qui s'est substituée à une "amiante" tout en conservant sa structure fibreuse. Un autre exemple : les ammonites pyritisées sont formées de pyrite cristallisée dans la coquille d'ammonites lors d'un processus de fossilisation.



Oeil-de-tigre



Ammonite pyritisée

Chapitre 4 : Propriétés physiques des minéraux

Chaque espèce minérale présente des propriétés bien particulières, qui, comme leur habitus, font leur identité. On peut gratter, fracturer, brûler ou simplement observer un minéral, et à chaque manipulation ou observation, on obtiendra un indice de la nature de ce minéral. Gratter un minéral contre un objet plus ou moins dur donne une indication de la dureté du minéral. Si on le fracture, son type de cassure aura certains aspects qui peuvent être révélateurs de sa ... structure cristalline! En le brûlant, on obtiendra des informations sur sa composition chimique et la température de son point de fusion. Finalement, si on l'observe à la lumière et sous différents éclairages, l'éclat ou le feu que nous pourrions admirer dévoilera quelques-unes de ses réactions face à une onde lumineuse.

L'identification d'un minéral ne se fait pas de manière aussi simple. Pour analyser les propriétés physiques des minéraux, les minéralogistes ont recours à des expériences de laboratoire et à un appareillage de haute précision exigeant une manipulation délicate. Il existe toutefois des moyens rapides de détermination, qui donnent suffisamment d'information et permettent l'identification de la substance. Le gemmologue utilise ces méthodes dans le but de déterminer des bruts. Pour l'analyse des pierres taillées, il s'aide d'appareils relativement simples qui donnent une mesure précise des caractères optiques de la gemme ; il procède également à une mesure de la densité. Ce sont les propriétés physiques qui servent directement à la détermination des gemmes (cassure, dureté, densité, et caractères optiques) qui font l'objet de ce chapitre.

Les minéraux présentent encore bien d'autres propriétés telles que conductivités électrique ou thermique, dont l'analyse entre dans le cadre de laboratoires spécialisés, ceci pour l'identification des diamants, par exemple.

Les minéraux possèdent des caractéristiques propres, qui sont le reflet de l'arrangement des atomes dans leur structure cristalline. Elles déterminent des propriétés invariables pour chaque espèce minérale. Ce sont :

- **le clivage** ou l'absence de clivage
- **la cassure**, c'est-à-dire l'aspect de la cassure
- **la dureté**
- **la densité**
- des caractères optiques :
 - **l'isotropie** ou **l'anisotropie**
 - le ou les **indices de réfraction** dont dépend l'éclat
 - **l'absorption** ou **la diffusion**, responsables de la coloration
 - **le pléochroïsme** témoin de variations de couleurs
 - **la dispersion** ou le feu de la pierre

1. Clivage, cassure et dureté

Dans de nombreux cristaux, la cohésion entre atomes est relativement plus faible dans certains plans de la structure cristalline. En conséquence, ces cristaux peuvent se fendre facilement selon ces directions de moindre résistance. C'est ce qu'on appelle le **clivage** d'un minéral. On reconnaît les plans de clivage par leur aspect "planaire" et lisse. Ils peuvent apparaître à l'intérieur de cristaux parfaitement transparents et également dans des pierres taillées ; ils se caractérisent alors par des irisations (comme une irisation produite par un reflet sur de l'huile). On qualifie le clivage par les termes "parfait", "imparfait" ou bien "nul" en l'absence de clivage.

De nombreuses espèces minérales possèdent des clivages. On retiendra 3 gemmes qui présentent un clivage parfait :

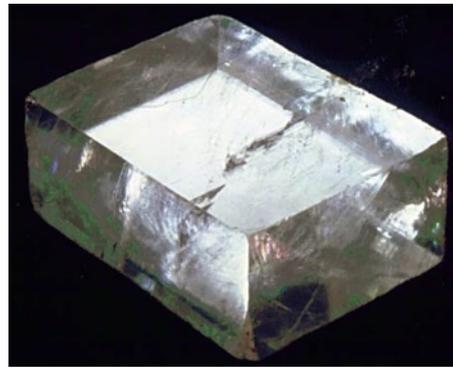
- le diamant (clivage selon les 4 plans de l'octaèdre)
- la topaze (clivage à la base du prisme)
- le spodumène (clivage selon 2 plans du prisme)

Attention ! à l'atelier, au sertissage de pierres connues pour leur clivage, comme le diamant, un choc mal à propos peut définitivement endommager la gemme !

Lorsqu'on maltraite ou casse un minéral ou que le minéral présente des fractures, l'aspect de ces cassures est également révélateur de l'espèce minérale. En terme technique, on parle de la cassure d'un minéral. Une cassure peut être conchoïdale (ce qui signifie "qui a l'aspect d'un coquillage") dans le cas d'une substance qui possède un réseau cristallin sans propriété de clivage, par exemple le quartz, ou pour une substance amorphe comme le verre (les tessons de bouteille !). La cassure peut être esquilleuse lorsque le minéral a une faible propension au clivage par exemple le péridot qui peut présenter des esquilles à l'image d'un os fracturé. Elle est nette dans le cas d'un minéral possédant un clivage parfait.



obsidienne (verre volcanique) cassure conchoïdale, aucun clivage



Rhomboèdre de clivage de la calcite cassure nette, clivage parfait

Lorsque le minéral présente une macle et que cette macle s'est formée selon un plan appelé "plan de macle", le minéral est fragilisé et peut se casser dans ce plan. On appelle ce genre de cassure un "parting". Un prisme hexagonal de corindon, s'il est maclé, peut ainsi se débiter en lamelles⁶.

On observe souvent des cassures sur les arêtes des pierres taillées. Si elles sont un indice supplémentaire à l'identification de la gemme, elles déprécient la qualité des pierres précieuses. Les arêtes des pierres taillées sont particulièrement délicates et afin d'éviter de produire ces défauts, il est recommandé d'emballer les gemmes pièce par pièce.

Le minéralogiste définit la dureté d'une substance comme la résistance que la cohésion de ses molécules oppose à la destruction de sa structure. En pratique, il s'agit de la résistance offerte par un minéral lorsqu'on cherche à l'entamer par une rayure.

Pour une détermination de la dureté d'un minéral, on a défini 10 minéraux de référence, d'une dureté allant de 1 à 10. Cette échelle des duretés s'appelle "échelle de Mohs". Ils sont classés de manière que chaque minéral raye celui qui le précède et est rayé par celui qui le suit.

⁶ Se rapporter au paragraphe "cristaux maclés" au chapitre précédent.



Petite boîte contenant 8 des minéraux de référence de l'échelle de Mohs

Echelle de Mohs	
1. talc	6. orthose
2. gypse	7. quartz
3. calcite	8. topaze
4. fluorine	9. corindon
5. apatite	10. diamant

Quelques trucs :

- l'ongle raye les minéraux de dureté inférieure à 2.
- un canif raye tous les minéraux de dureté inférieure à 4.
- l'acier trempé raye les minéraux de dureté 5-
- le verre raye les minéraux de dureté inférieure à 7.



On trouve dans le commerce des jeux de tiges serties à leurs extrémités de minéraux de référence de dureté.

Commentaires à propos de la dureté

Il existe d'autres méthodes de mesure de la dureté qui sont couramment utilisés par des spécialistes. On mesure par exemple la dureté à l'aide d'un appareil de précision appelé scléromètre. Une mesure précise de la dureté selon la méthode Rosival, révèle que le diamant est 140 fois plus dur que le corindon, que le corindon est 60 fois plus dur que la topaze et que cette dernière n'est que 4 fois plus dure que le quartz ! Nous ne retiendrons pas ces chiffres et nous nous référerons à l'échelle de Mohs, qui nous suffira largement pour résoudre nos problèmes de détermination.

Des minéraux peuvent présenter des différences de dureté assez importantes selon l'endroit où le test de rayure est effectué. La direction des plans clivage est également importante.

Le disthène (ou cyanite) est connu pour sa dureté qui varie de 4 à 7 selon la direction selon laquelle on opère le test ! Quant au diamant, sa dureté est de 10, mais dans certaines directions seulement ... elle est inférieure à 10 dans le plan de la base carrée de l'octaèdre. C'est la raison pour laquelle il est possible de scier les diamants à l'aide de scies à diamant et de les tailler, c'est-à-dire de les polir contre de la poudre de diamant.

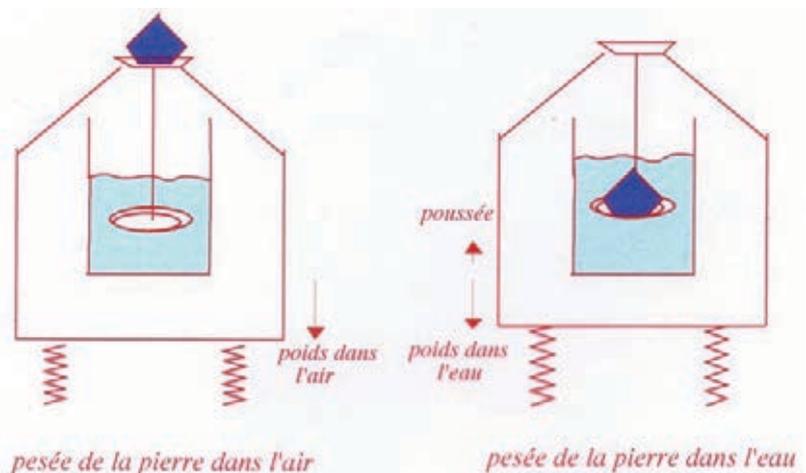
Les attaques mécaniques comprennent aussi la résistance au choc ou à l'écrasement. Notons, par exemple, que le diamant est le plus dur de tous les minéraux. Cependant, il est fragile et un simple choc, une chute sur un sol dur, s'il se produit sur un plan de clivage, suffit à le briser. Toutefois, il est vrai que les minéraux les plus durs sont en général aussi les minéraux les plus résistants aux attaques mécaniques. On remarquera que les minéraux que l'on trouve dans des placers sont en général de dureté supérieure à 7, c'est-à-dire plus durs que les grains de quartz qui constituent à plus de 90 % les sables des rivières.

2. La densité

La densité d'un minéral est relative à la nature des atomes qui composent le minéral d'une part, et d'autre part à l'arrangement plus ou moins compact des atomes dans la structure cristalline. C'est donc, tout comme la cassure, le clivage ou la dureté, un caractère inhérent à l'espèce minérale. Un quartz pur aura toujours une densité de 2,65.

Mesurer le poids spécifique ou la densité, c'est comme prendre le poids absolu d'un objet. On mesure en fait le poids d'un objet d'un volume donné, par exemple 1 dm³. Un litre d'eau contenu dans 1 dm³ pèse 1 kg. L'eau a donc un poids spécifique de 1 kg / dm³. Alors que le poids spécifique est de manière rigoureuse le poids d'un objet divisé par son volume, la densité exprime, elle, le rapport qui existe entre le poids d'un corps et le poids d'un volume d'eau égal à celui de ce corps. Pour les pierres taillées, de manière générale, il est difficile voire impossible de mesurer le volume avec précision, et donc le gemmologue effectuera une mesure de la densité et non du poids spécifique. La densité est un indice extrêmement fiable pour l'identification d'une espèce minérale.

Mesure hydrostatique au moyen d'une balance



On pèse la gemme dans l'air, puis on la pèse immergée dans de l'eau distillée. La différence entre le poids dans l'air et le poids dans l'eau s'appelle "la poussée" (flèche vers le haut) et cette poussée est égale au poids de l'eau contenue dans un volume égal à celui de la gemme. Comme le poids spécifique de l'eau est égal à 1, cette poussée sera donc simplement égale au volume de l'objet.

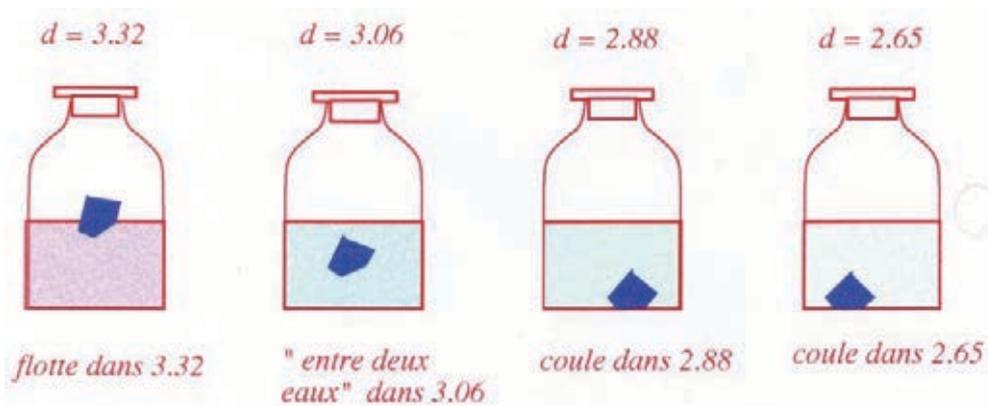
On calcule la densité par la formule :

$$\text{densité} = \frac{\text{poids dans l'air}}{\text{poids dans l'air} - \text{poids dans l'eau}}$$

Méthode par immersion dans des liqueurs de haute densité

Si on place dans de l'eau (dont la densité est de 1) un morceau de bois, il va flotter ; sa densité est inférieure à 1. Dans les mêmes conditions, un morceau de fer coule ; sa densité est supérieure à 1.

En remplaçant l'eau par des "liqueurs" de densités plus élevées et étalonnées avec précision, on peut déterminer, par une méthode comparative, la densité des minéraux et des gemmes. On plonge une gemme dans une liqueur et observe si elle flotte, coule ou encore reste "entre deux eaux". Si elle coule, la pierre est plus dense et donc on refera l'essai dans une liqueur plus dense, jusqu'à ce qu'elle flotte dans la liqueur qui est immédiatement supérieure à celle dans laquelle elle coule. Sa densité se situe entre les densités de ces 2 liqueurs. Si la pierre reste en flottaison, c'est qu'elle a exactement la densité de la liqueur utilisée.



Lorsqu'on emploie des liqueurs de densité, il faut observer une très grande propreté et ne jamais oublier de laver (avec du toluène ou du benzène) et sécher les gemmes et les pinces après chaque opération. Pour éviter trop de manipulations, commencer le test par une liqueur de densité intermédiaire (p. ex. d = 3.06). Il est recommandé d'effectuer cette mesure dans un local bien aéré.

A propos de la précision de la mesure

Toute mesure est entachée d'erreur ! Il s'agit de rester critique par rapport au résultat obtenu. Lorsqu'un doute subsiste, refaire la mesure plusieurs fois. En général, on privilégie la méthode hydrostatique qui donne un résultat au centième. Toutefois, l'erreur est trop importante pour des pierres de poids inférieur à 0.60 cts. Pour les petites gemmes en conséquence, il est préférable d'utiliser la méthode par immersion dans des liqueurs.

Dans tous les cas, une mesure de densité ne sera précise que si le minéral ou la gemme est de bonne qualité et ne présente que peu d'impureté. Une mesure effectuée sur une gemme présentant de nombreuses inclusions ou sur une roche sera biaisée.

Elaboration d'une liqueur de densité

Liqueurs qu'on peut trouver auprès de firmes spécialisées :

- *liqueur de Clerici, $d = 4.15$, prix élevé, extrêmement toxique (contient du thallium)*
- *di-iodométhane, $d = 3.33$, prix élevé, légèrement toxique*
- *bromoforme, $d = 2.88$, prix abordable, légèrement soporifique !*

Par dilution, en prenant soin de l'effectuer goutte à goutte et en agitant constamment, on peut préparer avec ces 3 liqueurs de base, des liqueur correspondant à divers minéraux de référence :

<i>Liqueur</i>	<i>densité recherchée</i>	<i>diluant et lavage</i>	<i>minéral témoin</i>
<i>Clerici (4.15)</i>	<i>4.00 3.70</i>	<i>eau distillée eau distillée</i>	<i>corindon chrysobéryl</i>
<i>Di-iodométhane (3.33)</i>	<i>3.06</i>	<i>toluène ou benzène</i>	<i>tourmaline</i>
<i>Bromoforme (2.88)</i>	<i>2.65</i>	<i>toluène ou benzène</i>	<i>quartz</i>

Pour étalonner convenablement les liqueurs, il faut que les minéraux de référence se maintiennent en flottaison, sans couler ni flotter sinon très lentement. On conserve les liqueurs dans des petits flacons hermétiquement fermés et à l'abri de la lumière. Le diiodométhane est relativement foncé à cause du iode qui a tendance à se libérer. Afin d'éclaircir la liqueur, on lui ajoute des petits morceaux de cuivre.

3. Les réactions de la matière à la lumière

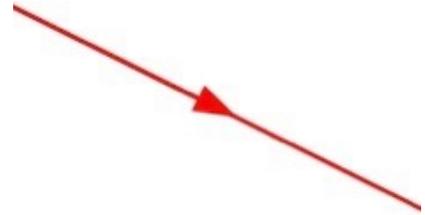
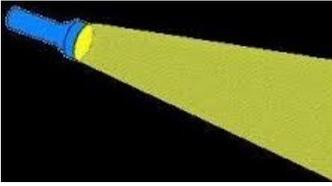
Lorsque la lumière est transmise au travers d'un corps ou est réfléchi par ce corps, elle réagit en fonction de la composition chimique et de la structure cristalline voire de l'absence de structure cristalline de ce corps. On a observé les phénomènes optiques dès l'Antiquité, mais ce n'est que tardivement, au XVIIIe siècle que des naturalistes ont réussi à définir les propriétés optiques de la matière, et il aura fallu attendre l'aube du XXe siècle pour qu'une explication scientifique de la lumière soit formulée. Il est important pour les gemmologues d'avoir quelques notions de ce chapitre de la physique qu'est l'optique cristalline. La construction des appareils d'identification utilisés en gemmologie se base sur des principes physiques telles que la réfraction, la réflexion et la polarisation de la lumière ainsi que l'absorption et la diffusion et d'autres encore... C'est par ces appareils, que le gemmologue observe les caractères optiques des gemmes et effectue des mesures. Et aussi, n'est-ce pas les jeux de lumière qui font la beauté des pierres précieuses ?

La lumière

Pour les physiciens, la lumière se compose d'un enchevêtrement de particules, les photons qui, en se déplaçant, transportent une énergie. Cette énergie se traduit en ondes électromagnétiques de longueur se situant entre 4'000 Å et 7'000 Å⁷ environ. C'est le spectre du visible, en d'autres termes les couleurs de l'arc-en-ciel. Notre oeil n'est pas assez sensible pour capter les vibrations que ces ondes produisent, mais il en reçoit les effets sous forme de rayons lumineux. Pourtant les ondes lumineuses vibrent avec une fréquence et des longueurs d'onde propres, et elle se déplacent à une vitesse définie. La vitesse se calcule par le produit de la fréquence et de la longueur d'onde. L'onde lumineuse se déplace ainsi dans le vide ou dans l'air à 300'000 km/s.

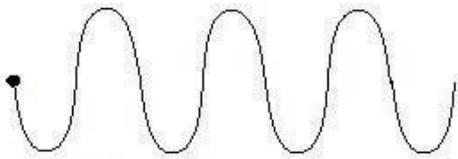
Si nous pouvions fixer l'image de l'onde lumineuse en un milliardième de seconde et l'agrandir énormément ... nous verrions peut-être ... des photons qui s'entrechoquent entre eux et des trains d'ondes qui vont en s'écartant les uns des autres formant un faisceau lumineux :

⁷ 1 Å [ångström] = 1 dix milliardième de mm

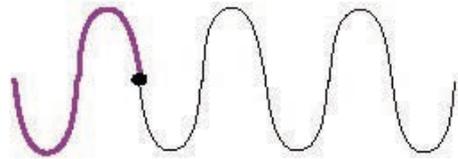


Du fait de la nature complexe de la lumière, on indique le trajet d'un rayon lumineux simplement par une flèche.

Illustration du déplacement d'une onde simple



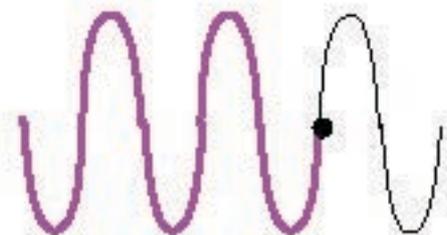
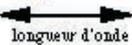
Ici, on montre le déplacement de l'onde. Pendant un laps de temps (admettons 0.2 secondes), le "point" parcourt une "image" d'onde. Par translation de cette "image", on reconstitue le parcours de cette onde simple.



*La **longueur d'onde** correspond à la projection d'une "image" d'onde dans la direction du déplacement, ici l'horizontale.*



*La **vitesse** de propagation de l'onde se calcule par la distance parcourue, exprimée en longueurs d'onde, divisée par le temps nécessaire à ce parcours. Si, dans ce dessin, on représente le trajet parcouru par le "point" dans un laps de temps qui est le même que pour l'onde d'en dessus (0.2 secondes), son déplacement est alors une fois et demie la longueur d'onde. Ici, la vitesse de l'onde sera donc une fois et demie plus grande que pour l'onde d'en dessus.*



Dans ce dernier dessin, l'onde a parcouru 2 fois et demie sa longueur d'onde qui est plus courte que dans les dessins précédents. Cependant, à l'horizontale, il s'agit de la même distance que dans le dessin d'en dessus. Or, si le "point" la parcourt dans le même laps de temps, la vitesse de cette onde sera la même que pour l'onde d'en dessus.

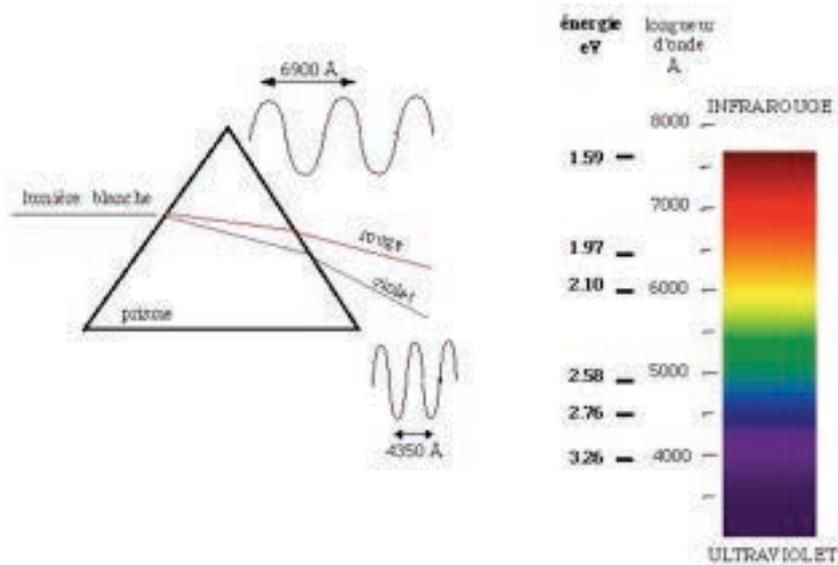


Pour caractériser les vibrations de l'onde, on utilise la fréquence, terme qui nous est familier par les ondes radio par exemple. Une onde vibre (se déplace de haut en bas sur notre dessin) et plus elle vibre rapidement plus sa vitesse sera grande. Fréquence, longueur et vitesse sont les trois grandeurs qui caractérisent une onde électromagnétique.

Pour la compréhension de la suite, il n'est pas indispensable de retenir tout cela ... mais de se rappeler de la vitesse et de la longueur d'onde.

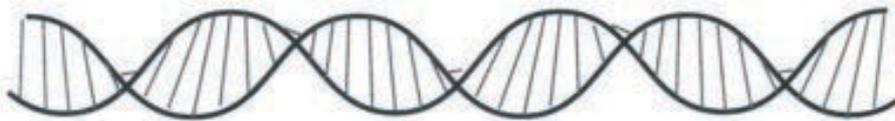
L'onde lumineuse, celle que notre œil est capable de percevoir, se déplace en "vrille" dans un mouvement complexe. Pour les physiciens, il s'agit d'une onde électromagnétique. La description de ces ondes est complexe. Pour notre explication, nous ne retiendrons que les paramètres de **longueur d'onde** et de **vitesse** expliqués dans l'encadré ci-contre.

Pour un rayon lumineux qui se déplace dans l'air ou dans le vide, on a pu constater que la **vitesse de la lumière** est de manière assez constante, de **300'000 km/s**. On a pu montrer que la lumière blanche se compose de l'addition des couleurs de l'arc-en-ciel et que le spectre du visible comprend des ondes de longueur se situant entre **4000 Å** et **7000 Å**.

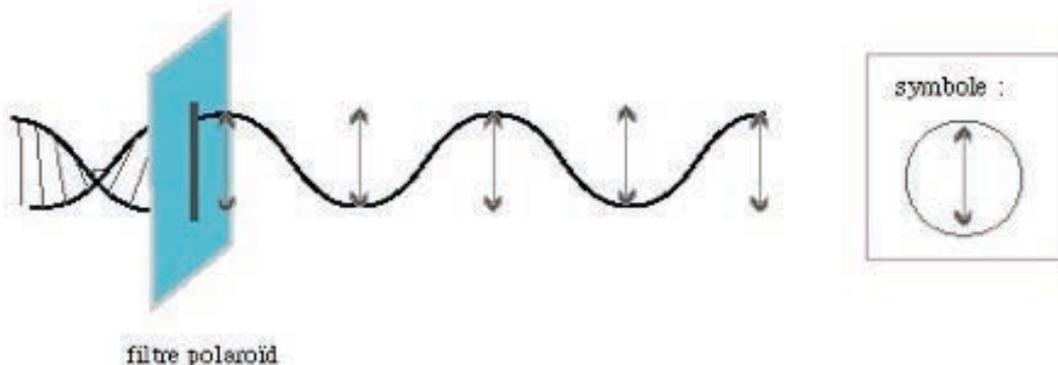


La polarisation de la lumière

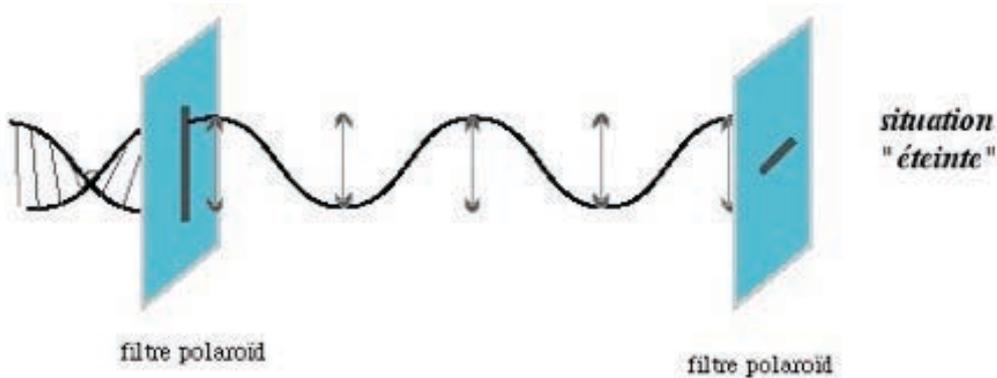
L'onde électromagnétique se déplace en vrille et vibre dans toutes les directions de l'espace :



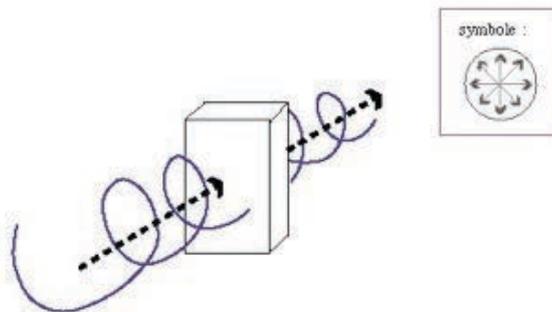
La lumière est dite "polarisée" dans un plan lorsque l'onde vibre dans une seule direction. C'est l'effet produit par un filtre polaroïd qui ramène l'onde à une seule direction de vibration.



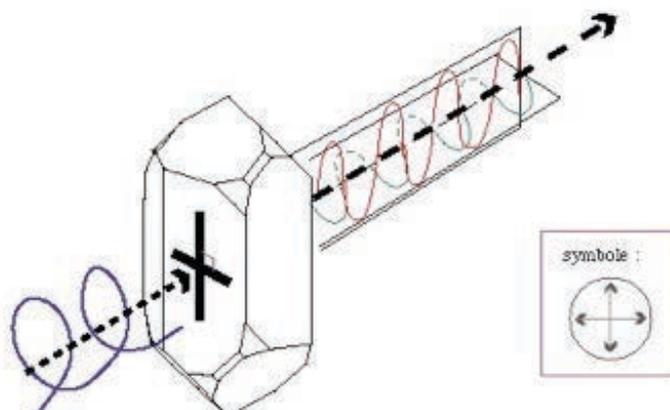
On interrompt le trajet de cette onde en plaçant un filtre polaroïd "à angle droit" du premier filtre. On dit que les filtres polaroïd sont "croisés" ... plus aucune lumière ne passe.



De nombreuses matières présentent pas ou peu d'interaction avec la lumière. Elles ne polarisent pas. Ce sont des matières isotropes telles les substances amorphes et les cristaux cubiques. Ce sont par exemple, le diamant, le spinelle ou bien le verre.



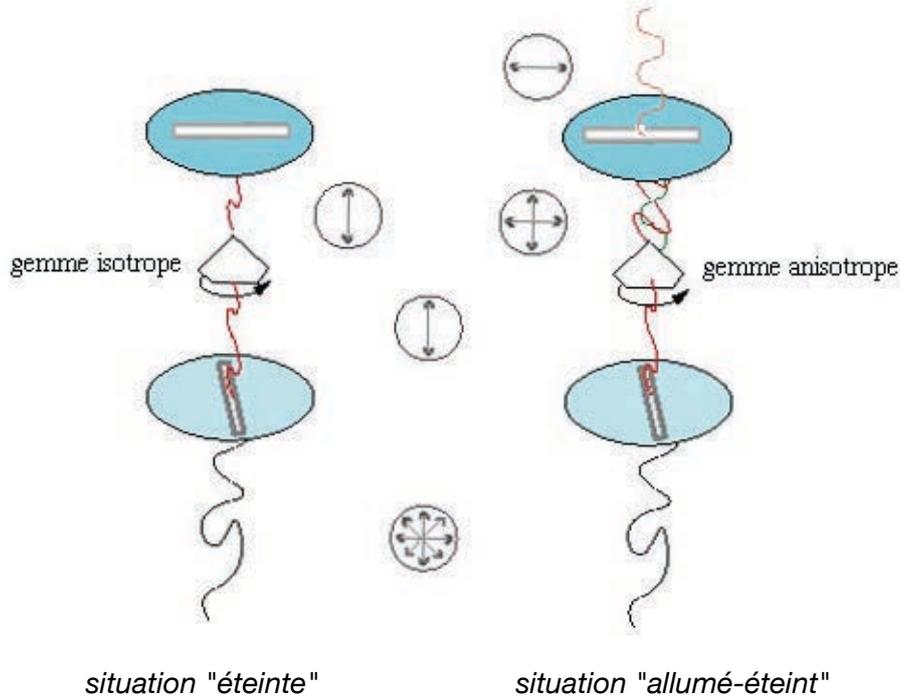
Les cristaux appartenant aux autres systèmes cristallins (quadratique, rhomboédrique, hexagonal, orthorhombique, monoclinique et triclinique) possèdent la propriété de scinder l'onde lumineuse en deux ondes polarisées dans deux plans perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. Dans ces cristaux dit "anisotropes", chacune des ondes se déplace à une vitesse qui lui est propre.



Exemple d'un cristal anisotrope, le quartz

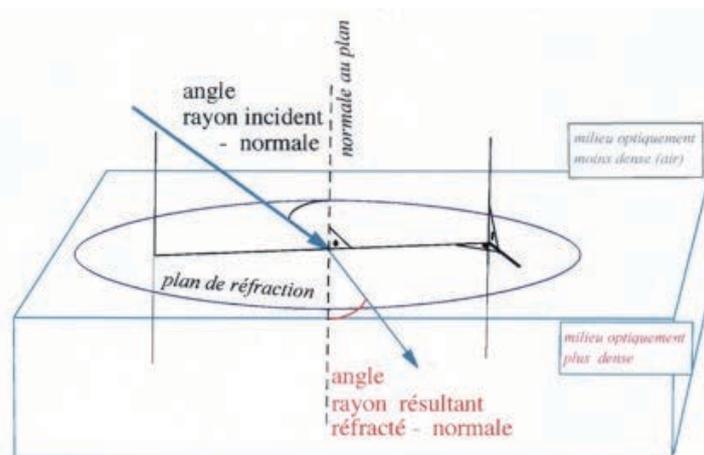
Le principe du polariscope

Le polariscope permet l'observation de la polarisation de la lumière dans une gemme transparente. Cet appareil se compose de deux filtres polaroïds "croisés". Dans le cas d'une gemme anisotrope, en faisant "tourner" la pierre, elle s'éclairera tous les quarts de tour (situation "allumé - éteint") et pour une gemme isotrope, elle restera éteinte au cours de sa rotation.



La réfraction de la lumière dans la matière

Lorsqu'un rayon lumineux pénètre dans un milieu, il va réagir : il sera freiné ou accéléré selon la densité optique des milieux. On constate de ce fait, que si le rayon incident touche obliquement la surface de séparation entre les 2 milieux, le rayon qui traverse l'autre matière va être dévié. C'est ce qu'on appelle la **réfraction** de la lumière.

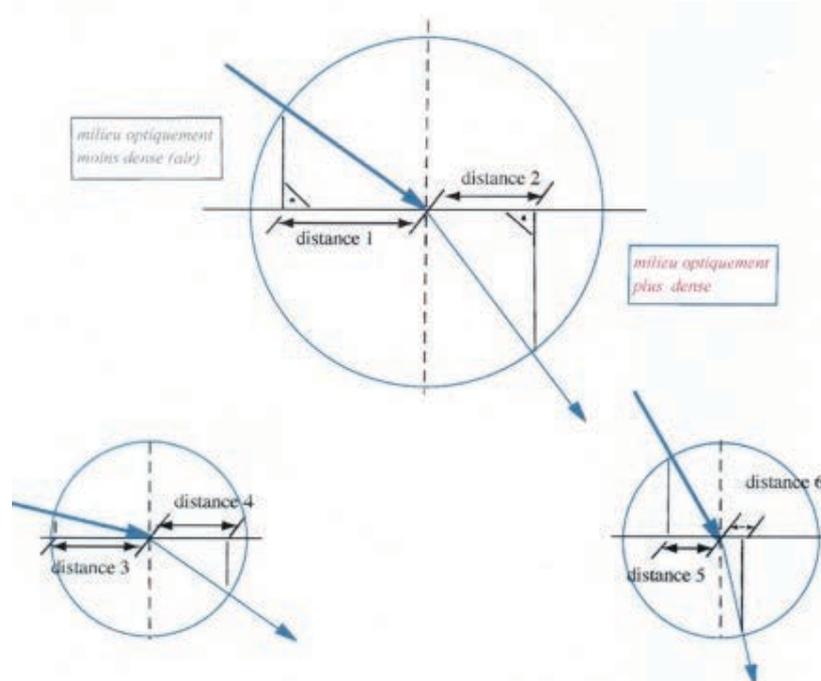


Les 2 lois de la réfraction :

1. le rayon incident et le rayon réfracté se situent dans un même plan perpendiculaire à la surface entre les 2 milieux ;
2. les rapports des "sinus" de l'angle d'incidence et de l'angle de réfraction (nommées distances 1, 2, 3, etc. dans les dessins ci-après) est constant pour 2 milieux donnés.

La première loi est illustrée dans le schéma ci-dessus dans lequel on a représenté le plan perpendiculaire au plan de réfraction qui contient les deux rayons, incident et réfracté, ainsi que la normale à ce plan.

Il est donc suffisant pour la compréhension de la réfraction de représenter ce plan. Sur les dessins suivants la droite horizontale représente le plan de réfraction, et la droite verticale, la normale à ce plan :



Pour des rayons lumineux se propageant d'un milieu 1 (l'air, par exemple) dans un autre milieu 2 (par exemple la gemme), les rapports des distances restent toujours le même quelque soit l'angle du rayon incident. Ceci est illustré par les trois dessins ci-dessus.

$$\frac{\text{distance 1}}{\text{distance 2}} = \frac{\text{distance 3}}{\text{distance 4}} = \frac{\text{distance 5}}{\text{distance 6}}$$

L'indice de réfraction (ou "réfringence", terme qu'on trouve parfois dans les livres), est un caractère optique indispensable à l'identification des gemmes. On le définit par le rapport des vitesses de l'onde lumineuse passant l'air puis la matière : plus l'onde est freinée dans la matière, plus son indice de réfraction sera élevé.

Pour la mesure de l'indice de réfraction (n), le milieu 1 est, par définition, l'air, et le milieu 2, un solide (comme une gemme) ou un liquide. On peut le mesurer grâce à la deuxième loi de la réfraction :

$$n = \frac{\text{distance 1}}{\text{distance 2}} = \frac{\text{vitesse de la lumière dans l'air}}{\text{vitesse de la lumière dans le milieu 2}}$$

L'indice de réfraction se calcule par un rapport, il n'a pas d'unité et sa valeur est toujours supérieure à 1.0. On attribue, par convention, $n = 1.0$ à l'air ou au vide.

N.B. Les liquides sont isotropes avec, comme pour les solides, un indice de réfraction. Pour l'eau $n = 1.33$; pour le di-iodométhane pur $n = 1.74$, pour le di-iodométhane enrichi de soufre (liquide du réfractomètre), $n = 1.80$.

L'éclat des gemmes est proportionnel à l'indice de réfraction

L'éclat d'une pierre précieuse est une appréciation subjective, mais elle dépend aussi de son pouvoir réflecteur, de son degré d'opacité et de la manière dont elle diffuse la lumière.

Le pouvoir réflecteur est la proportion de lumière réfléchi par rapport à la quantité de lumière reçue.

Pour les minéraux transparents, le pouvoir réflecteur est toujours assez faible et ne dépend que de l'indice de réfraction. La nature de la surface du minéral ou la présence d'inclusions microscopiques peut modifier l'éclat, et il existe toute une série de qualificatifs pour décrire l'éclat : résineux, laiteux, opalescent, terreux, soyeux, terne, etc...

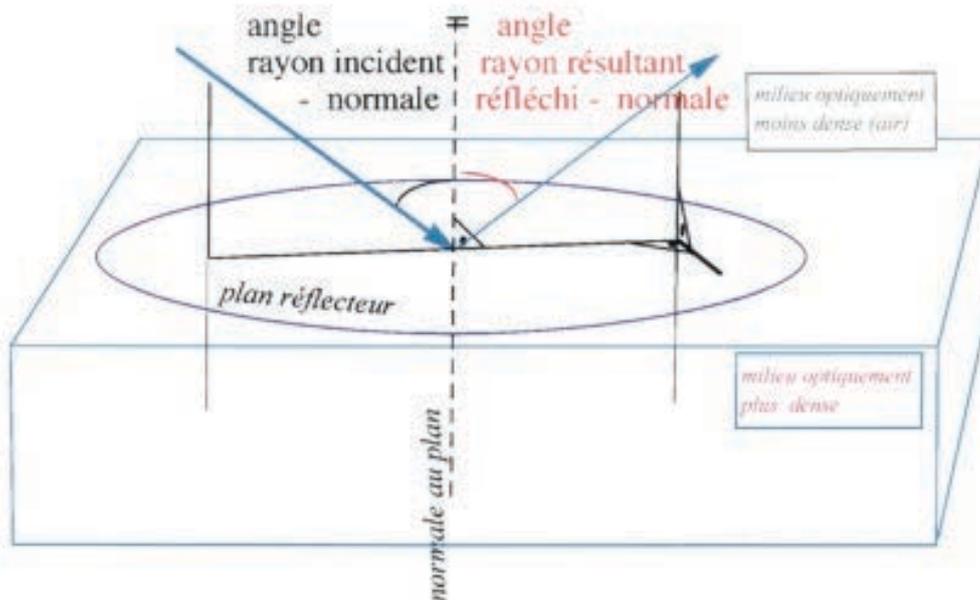
En gemmologie, on utilise les termes suivants :

Appréciation de l'éclat des minéraux transparents

Eclat	Pouvoir réflecteur	indice (n)	exemple
gras ou résineux	< 5 %	1.3 à 1.5	fluorine
vitreux	5 - 10 %	1.5 à 1.8	quartz
subadamantin	10 - 15 %	1.8 à 2.2	zircon
adamantin	> 15 %	> 2.2	diamant

Certains minéraux ont des indices si élevés qu'ils ont une apparence opaque. Les lois qui régissent le pouvoir réflecteur des minéraux opaques sont plus complexes. Nous ne retiendrons que l'appréciation de "métallique": l'hématite, d'indice $n = 3.0$, possède un éclat métallique.

La réflexion de la lumière



Au contact entre deux milieux, la lumière est également réfléchi... la surface de séparation entre les deux milieux est un miroir appelé plan réflecteur.

Les 2 lois de la réflexion :

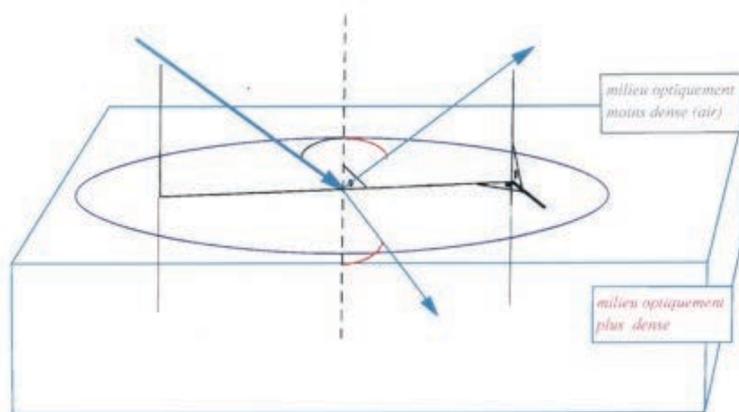
1. le rayon incident et le rayon réfléchi se situent dans un même plan perpendiculaire au plan réflecteur ;
2. l'angle formé entre le rayon incident et la normale est identique à l'angle formé entre le rayon réfléchi et la normale.

Réfraction et réflexion sont indissociables

Au contact entre deux milieux, le rayon lumineux est non seulement réfléchi, mais également réfracté selon les lois de la réflexion et de la réfraction.

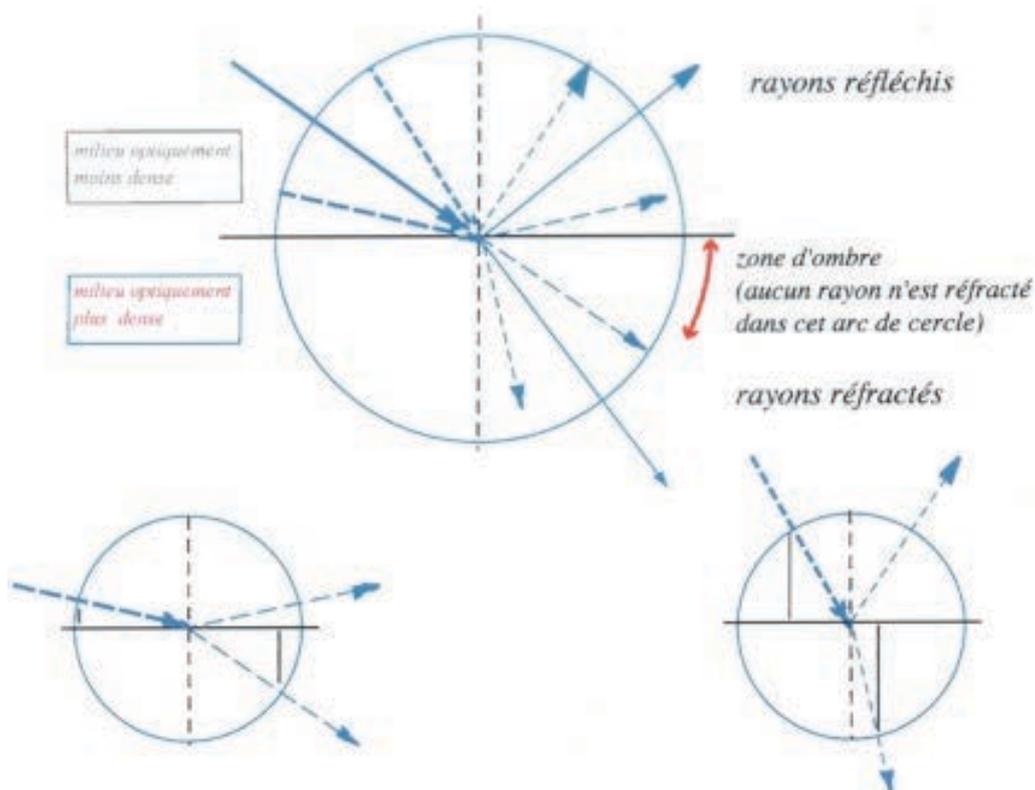
Notons que si le rayon touche à la perpendiculaire la surface entre deux milieux, il va être réfracté dans le milieu plus dense sans être dévié et réfléchi dans la même direction que le rayon incident (cas particulier).

Le rayon est entièrement ou seulement partiellement réfléchi en fonction de la nature des milieux traversés. L'intensité des rayons réfractés et réfléchis sera variable de cas en cas et peut dépendre de leurs angles d'incidence.



Réflexion partielle et totale

L'ensemble des rayons qui pénètrent un milieu optiquement plus dense sont réfléchis et également réfractés, en obéissant aux lois de la réflexion et de la réfraction. En conséquence, dans le milieu plus dense, certains rayons sont absents et une zone d'ombre apparaît.

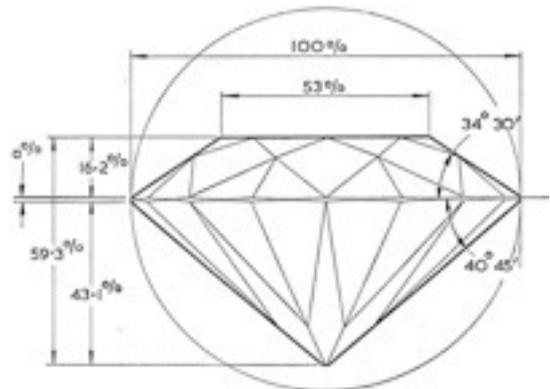


Ce phénomène peut être observé dans des pierres taillées dont les parties extérieures restent toujours sombre et sont soulignées par une ombre. Quant aux rayons qui sont réfractés et qui pénètrent dans la pierre, ils perdent de leur intensité.

La forme de taille idéale du diamant a été construite sur des calculs qui prennent en considération les angles de réfraction au travers de la table, l'intensité des rayons réfractés qui varie selon ces angles) et, en plus, les lois de la réflexion totale et partielle de la lumière dans la pierre. On cherche ainsi à faire réfléchir un maximum de lumière dans la diamant taillé.

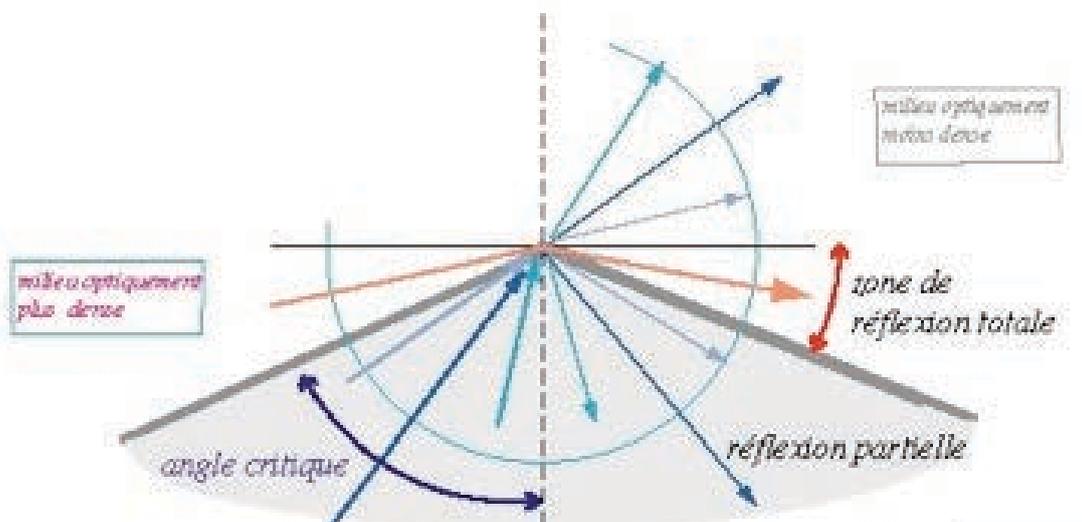
Pour faire disparaître le contour ou l'ombre de la pierre taillée, on l'immerge dans un liquide.

Une gemme incolore, par exemple un spinelle ($n = 1.72$), immergée dans une liqueur de densité (diiodométhane d'indice $n = 1.74$) peut ainsi disparaître, son contour n'est plus visible !



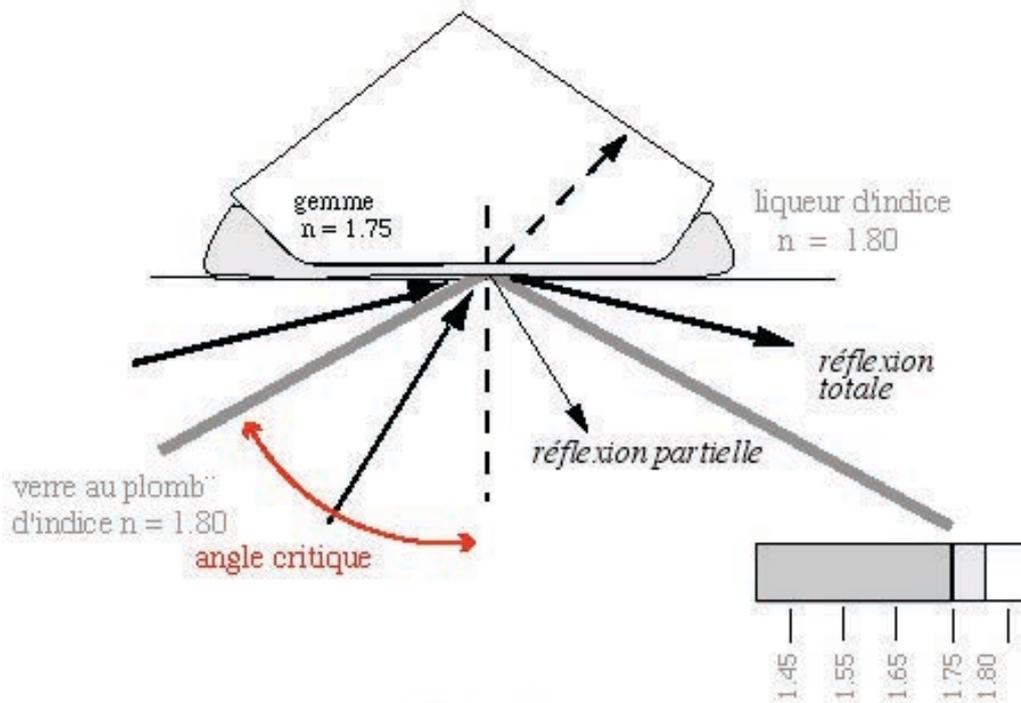
Taille idéale du diamant selon W. Epler

Lorsque le rayon lumineux passe au contraire de l'exemple d'en dessus, d'un milieu optiquement dense à un milieu moins dense, certains rayons notés en bleu dans le dessin ici, seront à la fois réfléchis et réfractés et de ce fait perdront de leur intensité, occasionnant une zone de réflexion partielle. Seuls les rayons qui ne peuvent pas être réfractés (rayon orange) seront entièrement réfléchis créant une zone de réflexion totale particulièrement intense.



Le principe du réfractomètre

On mesure l'indice de réfraction de la gemme grâce à la réflexion partielle et totale de la lumière et à l'angle critique occasionné sur le plan de contact entre les 2 milieux, le verre au plomb ($n = 1.80$) et la gemme ($n < 1.80$). La mesure s'effectue sous un éclairage monochromatique jaune.



Lumière et cristaux

Lorsque des rayons lumineux pénètrent dans un cristal, ils vont être freinés. En outre, dans les cristaux anisotropes, le rayon lumineux va être partagé en 2 rayons polarisés dans 2 plans perpendiculaires l'un par rapport à l'autre (voir plus haut, l'exemple d'un cristal anisotrope, le quartz). En plus, ces deux rayons sont caractérisés chacun par une vitesse de propagation et un indice de réfraction. C'est ce qu'on appelle la **biréfringence** ou double réfraction qu'on observe dans des cristaux **anisotropes**.

Rappelons que, dans un milieu **isotrope** ou **monoréfringent**, l'onde lumineuse vibre ou oscille à la perpendiculaire de la direction de déplacement dans toutes les directions de l'espace. Ceci se produit pour tous les cristaux du système cubique et les matières amorphes.

Pour des cristaux anisotropes (ou biréfringents) qui appartiennent aux systèmes quadratique, rhomboédrique, hexagonal, orthorhombique, monoclinique ou triclinique, on doit tenir compte de la biréfringence pour analyser correctement ces gemmes. La biréfringence s'observe même à l'œil dans certains cristaux (calcite, péridot) lorsque les angles des rayons réfractés sont suffisamment différents et que l'image qu'on observe au travers du cristal apparaît dédoublée.

L'expérience de la calcite tournante

Dans l'expérience de la calcite tournante, animation qu'on peut voir dans l'exposition des minéraux du Muséum de Genève, on fait les observations suivantes :

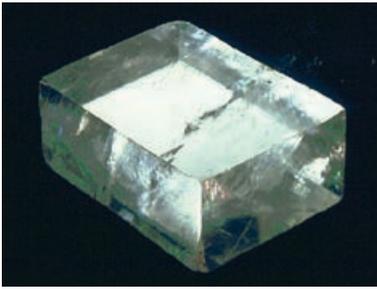
1. Le cristal tourne et transmet, de l'objet qui se situe derrière, une image dédoublée. En tournant le cristal, on s'aperçoit qu'une des 2 images tourne par rapport à l'autre et autour de l'autre.

En effet : le rayon incident est séparé en 2 rayons réfractés de forte biréfringence.

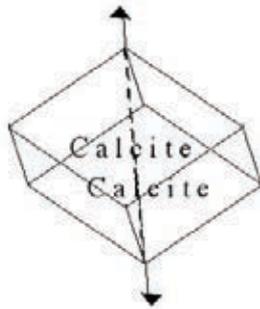
2. le cristal reste immobile, et un filtre polaroïd est actionné (il tourne) et rend invisible chacune des 2 images alternativement tous les 90°.

En effet : chacun des 2 rayons est polarisé à 90° l'un par rapport à l'autre.

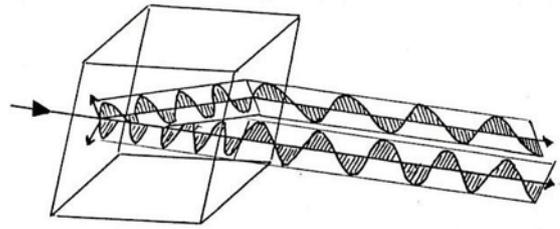
La biréfringence, son effet produit par un cristal de calcite



*rhomboèdre de calcite,
système rhomboédrique.*



*image dédoublée du
mot "Calcite" située
derrière le cristal.*



*la biréfringence, une représentation en terme
d'ondes polarisées par le cristal anisotrope*

En plus, si on est un fin observateur... on s'aperçoit qu'une des images n'est pas dans le même plan que l'autre. Chacun des rayons réfractés et polarisés possède une vitesse qui lui est propre et donc chacun des rayons a un indice de réfraction légèrement différent l'un de l'autre. C'est ce qui confère au minéral son caractère anisotrope (ou "biréfringent"). L'image immobile possède une même vitesse (et donc un même indice) quelle que soit la direction d'observation. On l'appelle "rayon ordinaire" (R.O.). Par contre, le rayon dit "extraordinaire" (l'image qui "tourne" ; R.E.) a une vitesse (et donc un indice) variable selon la direction d'observation. La biréfringence qui se calcule par la différence entre ces 2 indices est, pour la calcite, importante et le dédoublement de l'image qu'on a pu observer est le témoin de cette forte biréfringence.

La mesure des caractères optiques au réfractomètre

On mesure l'indice ou les indices de réfraction de la gemme au moyen d'un réfractomètre et on en déduit les caractères optiques. Comme nous le verrons au chapitre suivant, la mesure des indices de réfraction à l'aide d'un réfractomètre classique est délicate. Elle demande une grande attention. Soulignons que ces indications sont indispensables pour la détermination d'une espèce minérale et l'identification de la gemme.

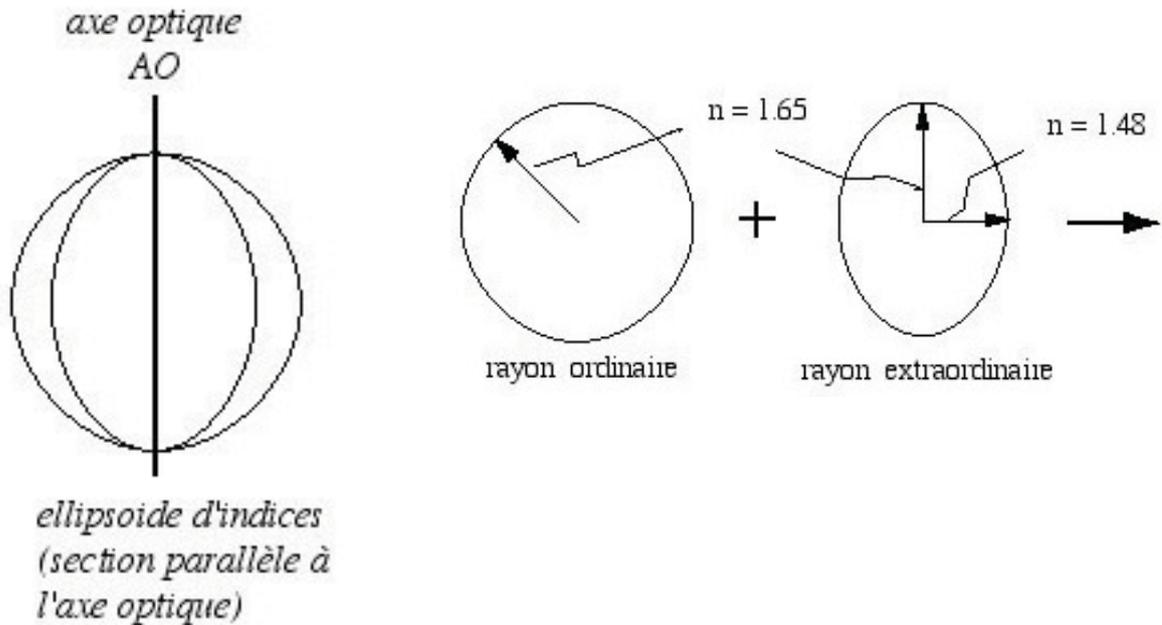
Lorsque la pierre est isotrope (le cristal appartient au système cubique ou bien il s'agit d'une matière amorphe), on ne relève qu'un seul indice.

Pour une gemme anisotrope, on mesurera 2 indices un " grand indice " et un " petit indice ". On analysera par la suite ces mesures afin de connaître avec précision les caractères optiques de la gemme. On pourra :

- définir si elle est uniaxe ou biaxe : on mesurera alors les respectivement 2 indices si elle est uniaxe, 3 indices si elle est biaxe ;
- calculer sa biréfringence ;
- déterminer son signe optique (positif ou négatif) ;
- et, éventuellement, trouver l'orientation de la facette mesurée par rapport à l'axe du cristal.

Analyse des caractères optiques d'un cristal uniaxe, la calcite

On analyse les caractères optiques des gemmes anisotropes à l'aide d'une représentation montrée ici pour la calcite. Dans l'espace, il s'agit d'une sphère de rayon $n_{R.O.}$ dans laquelle est incluse une forme oblongue un "ellipsoïde" dont le rayon ($n_{R.E.}$) varie selon la direction. Dans un plan (la facette mesurée de la gemme), on les représente par un cercle et une ellipse.



Le cercle, ici, inclut l'ellipse. La longueur des rayons correspond aux valeurs des indices de réfraction mesurés dans toutes les directions d'un plan.

Pour le rayon ordinaire (R.O.), la mesure de l'indice de réfraction (n) est le même quelque soit la direction de la mesure ; ici $n_{R.O.} = 1.65$

Pour le rayon extraordinaire (R.E.), l'indice (n) varie selon la direction de la mesure, on lui attribuera sa valeur minimale et $n_{R.E.} = 1.48$

- on calcule la biréfringence : $bir = n_{R.O.} - n_{R.E.} = 1.65 - 1.48 = 0.17$; on détermine son signe
- optique : négatif, par définition lorsque $n_{R.E.} < n_{R.O.}$;

On donne l'orientation de la facette mesurée : elle comprend l'axe optique ("AO //"). En effet, dans l'image, le cercle et l'ellipse se touchent en 2 points, et la droite qui les relie indique la direction de l'axe optique et par là, la direction de l'axe du cristal (axe d'ordre 3).

En pratique, cette représentation est obtenue par les mesures des indices des rayons ordinaire et extraordinaire dans plusieurs directions.

On verra au chapitre 5, comment, pour des cristaux anisotropes, on effectue systématiquement ces mesures.

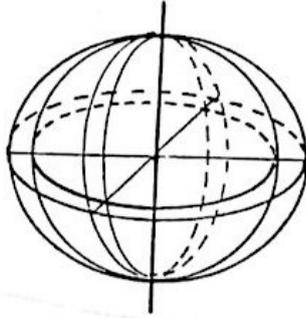
L'axe optique.

Dans l'analyse des caractères optiques de la calcite, nous avons remarqué que les rayons ordinaire et extraordinaire ont une même valeur dans une direction. Il s'agit de la direction de l'axe optique. On dira que la calcite est un cristal uniaxe ; dans ce type de cristaux l'axe optique unique correspond toujours à l'axe cristallographique (axes d'ordre 4, 3 ou 6) pour des cristaux quadratique, rhomboédrique ou hexagonal.

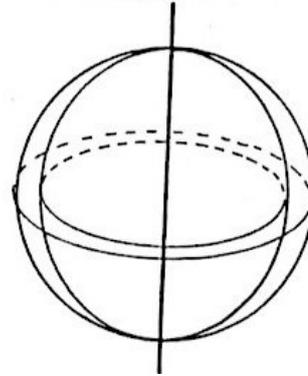
Ellipsoïdes d'indices pour des cristaux uniaxes

(indices de réfraction mesurés au réfractomètre)

A trois dimensions, un cristal uniaxe négatif est représenté par un ellipsoïde de forme allongée inséré dans une sphère ; dans un cristal uniaxe positif, l'ellipsoïde aplati entoure la sphère. L'ellipsoïde symbolise les mesures des indices variables obtenus pour le rayon extraordinaire, et la sphère la mesure de l'indice constant pour le rayon ordinaire. L'axe optique est ici vertical.



Surfaces d'onde pour un cristal uniaxe négatif, exemple la calcite



Surfaces d'onde pour un cristal uniaxe positif, exemple le quartz

Certains cristaux ont la propriété de scinder la lumière en 2 rayons extraordinaires. Leur représentation en deux ellipsoïdes d'indices est compliquée. Une des "ellipsoïdes" est comprise dans l'autre et elles se touchent en quatre points qui déterminent 2 droites qui se coupent au centre de la représentation. Il s'agit de cristaux biaxes dont les 2 axes optiques ont des directions différentes des axes cristallographiques. Ces cristaux appartiennent aux systèmes orthorhombique, monoclinique et triclinique.

<i>Les caractères optiques des solides</i>			
<i>caractères optiques</i>		<i>cheminement de la lumière dans le minéral</i>	<i>observations et mesures</i>
<i>isotrope</i>		<i>1 rayon non polarisé</i>	<i>un seul indice (n)</i>
<i>anisotrope</i>	<i>uniaxe</i>	<i>2 rayons polarisés : 1 rayon ordinaire 1 rayon extraordinaire</i>	<i>indice constant indice variable</i>
<i>anisotrope</i>	<i>biaxe</i>	<i>2 rayons polarisés 2 rayons extraordinaires</i>	<i>un "grand indice" (n_g) un "petit indice" (n_p) il faudra encore chercher l'"indice moyen" (n_m)</i>
<i>Chaque minéral possède des caractères optiques (indices de réfraction, uniaxe / biaxe etc..) bien déterminés en raison de sa structure cristalline et de son système cristallin. C'est leur analyse au moyen du réfractomètre (et du polariscope) qui permet de les caractériser et ainsi d'identifier la gemme. On mesure aussi un indice de réfraction pour les verres ou les liquides.</i>			
<i>Caractères optiques</i>	<i>état de la matière</i>	<i>système cristallin</i>	<i>exemples</i>
<i>isotrope</i>	<i>amorphe</i>		<i>verres</i>
	<i>cristallin</i>	<i>cubique</i>	<i>diamant, spinelle, grenats</i>
<i>anisotrope uniaxe</i>	<i>cristallin</i>	<i>quadratique hexagonal rhomboédrique</i>	<i>zircon béryl quartz, corindon tourmaline</i>
<i>anisotrope biaxe</i>		<i>orthorhombique monoclinique triclinique</i>	<i>chrysobéryl, topaze spodumène, orthose labradorite</i>

La couleur

Dans le paragraphe précédent, nous avons étudié les effets lumineux qui trouvent leur origine dans l'arrangement cristallographique de la matière ; nous y avons trouvé une explication de quelques phénomènes de l'optique cristalline tels la polarisation, la réfraction et la réflexion de la lumière. La matière produit encore d'autres effets qui, cette fois, sont causés par la nature des éléments chimiques qui constituent le minéral ou le verre. En termes physiques, ce sont des effets liés à l'absorption et la diffusion de la lumière par la matière. La couleur trahit l'absorption de la lumière. Les effets de fluorescence, qui contribuent à la coloration, sont dus à la diffusion de la lumière par le minéral. Ces phénomènes se produisent à l'échelle des atomes qui constituent le minéral, et même au niveau de leur enveloppe électronique. Ces phénomènes physiques ouvrent le champ de la spectroscopie, qui est à l'origine d'appareils utiles à l'identification des gemmes. Dans ce domaine, nous nous limiterons à étudier le spectroscope par absorption qui est un moyen classique d'identification. Il existe d'autres appareils de spectroscopie ou spectrométrie (infrarouges, ultraviolets, rayons X, microspectrométrie Raman ...) utilisés dans des laboratoires spécialisés.

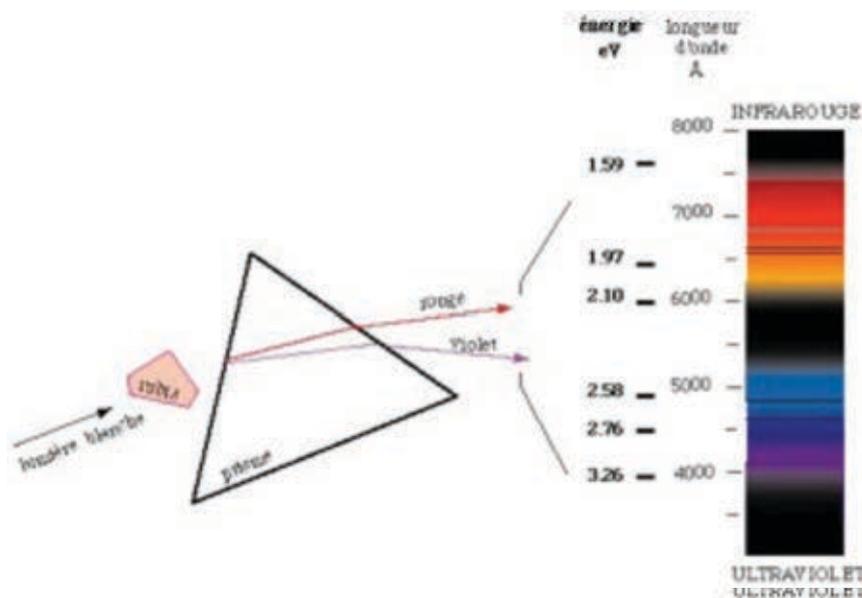
Toute matière a la propriété de refléter une couleur. La profondeur de la couleur est importante en gemmologie. N'est-ce pas par la couleur qu'on attribue une valeur à une gemme ? Une gemme très colorée, par exemple un rubis caractérisé par un rouge profond sera plus estimé qu'un rubis pâle ou un saphir rose. Il faut remonter à la composition atomique de la matière pour comprendre le phénomène de la coloration.

Rappelons qu'en langage d'ondes, la lumière blanche est produite par une addition de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel, c'est-à-dire une addition d'ondes de longueur de 4000 Å à 7000 Å environ qui constituent le spectre du visible. Dans ce spectre, chacune des couleurs correspond à des ondes électromagnétiques, polarisées ou non, de longueurs précises. On peut dire que chacune des couleurs est caractérisée par une énergie qui se mesure en "électronvolts"

L'oeil humain ne perçoit pas le caractère ondulatoire ou vibratoire de la lumière, et il ne discerne pas non plus les différentes composantes de chaque couleur. En s'aidant d'un prisme qui a la propriété de partager le rayon lumineux, il perçoit que la couleur est une addition de couleurs parfois surprenantes. Un vert (couleur complémentaire au rouge) peut par exemple contenir une fraction de rouge, soit des ondes de longueurs entre 6300 et 7000 Å, en plus d'ondes caractéristiques des autres couleurs réfléchées par l'objet. Toutes les autres couleurs (non réfléchies) ont été absorbées par la matière.

Sur un plan physique, l'absorption de la lumière est une conséquence de l'interaction des ondes lumineuses avec des électrons. Il faut savoir qu'à chaque flux d'ondes correspond une énergie. Les électrons de ces atomes passent d'un niveau énergétique (état de base) à un niveau plus énergétique (état excité) en absorbant la quantité d'énergie adéquate. Lorsqu'une myriade d'électrons a cette prédisposition, c'est alors la composante ou longueur d'onde correspondant à une couleur précise qui disparaît du spectre. Au travers d'un prisme, on observe cette lacune par une bande noire ou bande d'absorption.

La couleur des gemmes



A l'examen d'un rubis au travers d'un prisme qui sépare la lumière blanche dans les couleurs de l'arc-en-ciel, on perçoit des bandes claires et des raies sombres qui sont les témoins de l'absorption de la lumière par la gemme colorée. L'aspect général du spectre révèle l'élément chimique chromatophore qui cause la coloration de la gemme.

Ici, c'est le chrome, qui est à l'origine de la coloration rouge du rubis. La position des raies et des bandes d'absorption sur le spectre est, à quelques

nuances près, la même pour la même variété gemme. Le phénomène de l'absorption est le principe de base de la construction du **spectroscope**.

Les éléments chimiques **chromatophores** qui, dans les gemmes, possèdent la propriété d'absorber des parties du spectre lumineux sont tous des éléments dont les couches électroniques extérieures sont "fragiles"; pour les chimistes, ce sont des "éléments de transition".

Lorsqu'ils sont inclus dans la formule chimique de la gemme, on parle d'un élément **idiochromatique** (exemple : le péridot $(Mg,Fe)_2(SiO_4)$ comprend du fer dans la formule chimique ou fer idiochromatique). Lorsqu'une infime fraction d'un élément chromatophore est incluse comme impureté dans la structure cristalline de la gemme, on parle d'élément **allochromatique**.

C'est le cas de la plupart des gemmes dont la plus célèbre, le rubis, est un corindon (Al_2O_3) comprend une infime quantité de chrome dans sa structure cristalline ou chrome allochromatique.

<i>Éléments chimiques chromatophores</i>			
<i>élément chimique</i>	<i>symbole</i>	<i>charge</i>	<i>numéro atomique</i>
<i>titane</i>	<i>Ti</i>	<i>4+</i>	<i>22</i>
<i>vanadium</i>	<i>V</i>	<i>3+</i>	<i>23</i>
<i>chrome</i>	<i>Cr</i>	<i>3+</i>	<i>24</i>
<i>manganèse</i>	<i>Mn</i>	<i>2+</i>	<i>25</i>
		<i>3+</i>	
<i>fer</i>	<i>Fe</i>	<i>2+</i>	<i>26</i>
		<i>3+</i>	
<i>cobalt</i>	<i>Co</i>		<i>27</i>
<i>nickel</i>	<i>Ni</i>		<i>28</i>
<i>cuivre</i>	<i>Cu</i>	<i>2+</i>	<i>29</i>

Parmi les autres causes de coloration des minéraux, les désordres électroniques au niveau de la structure cristalline jouent un rôle important. Ainsi certains désordres créés par radioactivité naturelle dans le quartz, lui donne un aspect brunâtre (quartz fumé). Le mécanisme d'absorption est là aussi réglé par des électrons qui "libérés" dans la structure cristalline, absorbent une partie de l'énergie lumineuse.

Une troisième raison de la coloration des gemmes ou minéraux est due à des inclusions plus ou moins denses d'un autre minéral dans la gemme. Les quartz vert sont souvent colorés par un minéral étranger, la chlorite par exemple.



coloration du spinelle par du chrome allochromatique.



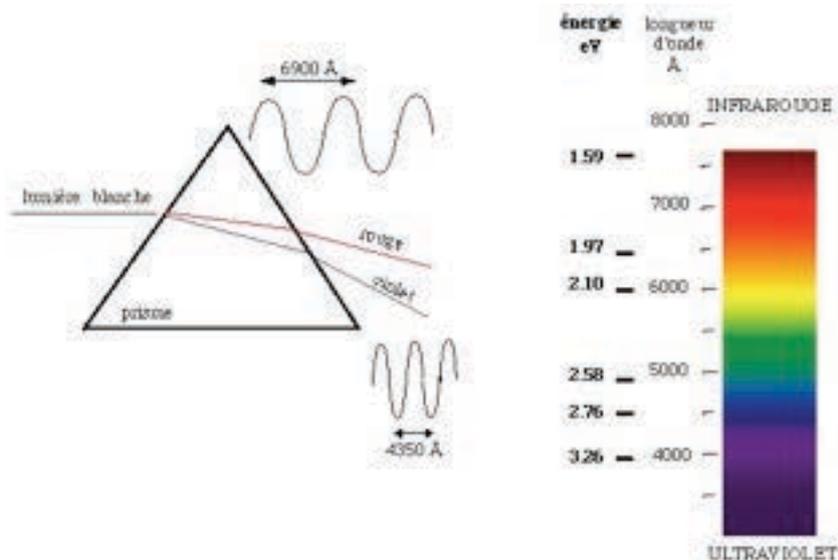
quartz fumé, provoqué par radioactivité naturelle.



quartz avec inclusions de chlorite qui lui donne sa couleur verte.

La dispersion de la lumière ou le feu

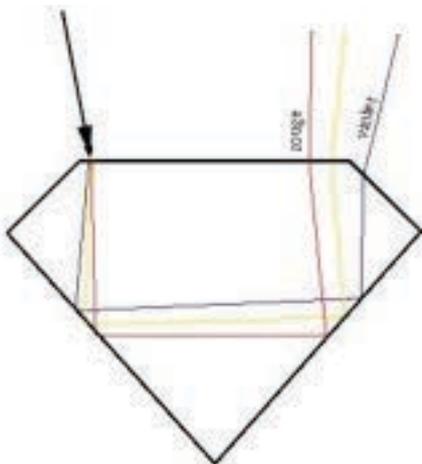
Chaque onde de couleur particulière, ou onde "monochromatique" se déplace avec une vitesse définie dans un milieu donné. Comme le montre la réfraction d'une onde rouge ou violette sur ce dessin, elles possèdent des indices de réfraction différents. Donc, en mesurant l'indice de réfraction d'un minéral au moyen d'un rayonnement monochromatique rouge, on trouvera une valeur inférieure à celle de l'indice de réfraction mesurée par lumière monochromatique violette.



C'est la nature de la matière qui constitue le prisme (représenté ici) qui occasionne cette différence d'indices. Lorsque cette dernière est élevée, on observe un effet "arc-en-ciel" qui est le feu ... En minéralogie, on appelle ce phénomène la **dispersion**¹⁴. Certains minéraux sont très dispersifs (diamant, zircon etc.), d'autres ne le sont pas ou peu comme le quartz.

Le **feu** est le terme des gemmologues pour nommer ce phénomène très prisé de la dispersion de la lumière par la gemme.

On estime à l'oeil le feu d'une pierre précieuse en tenant compte de la transparence, de la coloration ou de l'absence de couleur, et de la profondeur de la pierre taillée. Pour l'apprécier, on parle de feu "prononcé", "moyen" ou "insignifiant".



Les dimensions de la taille de la gemme accentuent encore les qualités de feu grâce aux jeux des réflexion et réfraction de la lumière dans la pierre précieuse.

Notons également qu'on perçoit naturellement un feu plus intense dans une pierre de haut indice de réfraction.

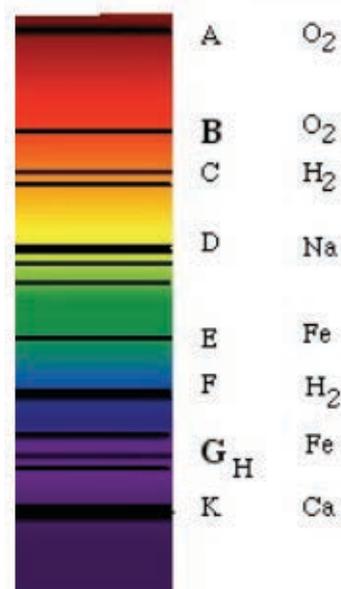
N.B. Dans des pierres pas ou mal taillées, on peut tout a fait mésestimer cette qualité.

On mesure le feu par la différence des indices de réfraction de 2 rayons monochromatiques : en se référant aux longueurs d'onde correspondant aux lignes d'absorption B (6867 Å) et G (4308 Å) de Fraunhofer. Cette différence, pour le diamant, est de 0.044 (feu prononcé) et de 0.013 pour le quartz (feu insignifiant).

Les raies d'absorption ou "raies de Fraunhofer"

élément absorbant

Observant la lumière du soleil au travers d'un prisme, le physicien Joseph Fraunhofer (1787 - 1826), le premier, a décrit un spectre d'absorption. Plus tard, les scientifiques ont mis en relation les bandes et raies d'absorption avec la composition chimique de notre atmosphère et de l'étoile Soleil. Les raies d'absorption présentent des longueurs d'ondes définies qui sont devenues de références physiques. On les nomme par des lettres A, B, C etc.

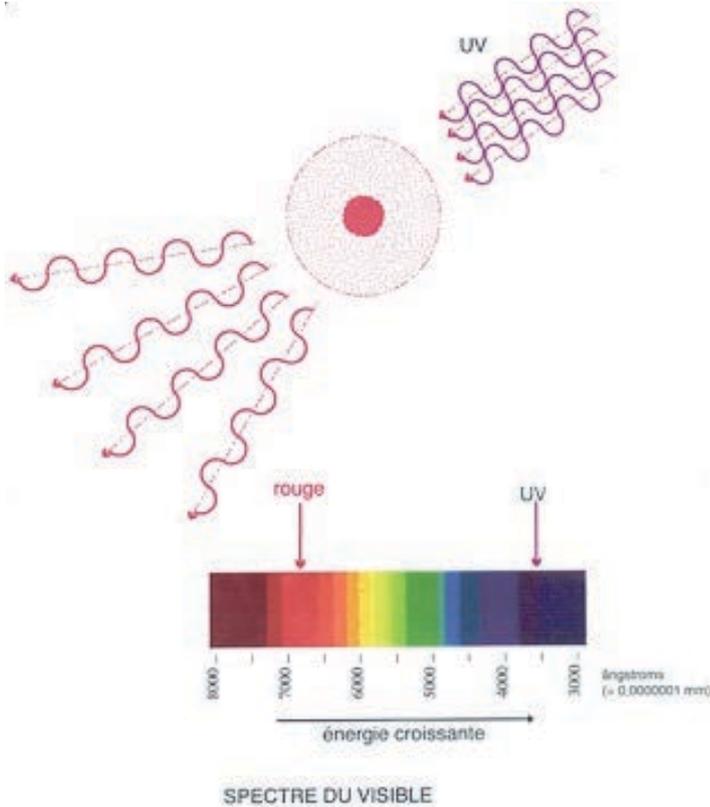


Le pléochroïsme

La coloration des gemmes est, en plus de l'élément chimique chromatophore, dépendante de la structure cristalline. Certaines espèces minérales colorées, de caractère anisotrope, présentent des nuances de coloration différentes selon l'orientation du cristal. En effet, chacun des rayons polarisés dans le cristal "transporte" une couleur différente. On observera donc ces différences de coloration au travers d'un filtre polaroïd qui sépare alternativement les 2 rayons polarisés et permet l'observation de 2 couleurs. On appelle ce phénomène le **pléochroïsme**. Le pléochroïsme est un caractère optique propre à chaque espèce minérale anisotrope. Les gemmologues utilisent un petit instrument, le **dichroscope**, constitué d'un cristal de calcite qui a la propriété de séparer les 2 rayons polarisés et permet d'observer et de comparer la différence des colorations. Certaines gemmes sont fortement pléochroïques (corindon), d'autres ne le sont que faiblement (quartz). Lorsque ce phénomène est visible à l'oeil nu, on parle de "polychroïsme" : le minéral cordiérite présente un polychroïsme marqué (jadis, on l'appelait d'ailleurs "dichroïte").

La luminescence

On peut dire que la luminescence est l'inverse de l'absorption. Ainsi, au lieu d'une "disparition" de plages de coloration, il y a "production" de couleurs. On appelle **diffusion** une émission diffuse (non-directionnelle) de lumière. Lorsque des électrons sont soumis à une énergie supérieure au spectre du visible, par exemple à la lumière noire (rayons ultraviolets) ou à des rayons X, ces électrons relativement libres vont absorber une énergie puis la "relâcher" en la libérant sous forme d'ondes de longueur supérieure (et moins énergétique). Il y a alors une émission de photons. Cela va produire un flux d'ondes, qui, si elles sont d'une longueur correspondant au spectre du visible, vont se traduire par une couleur. On parle alors plus spécifiquement de **fluorescence**.

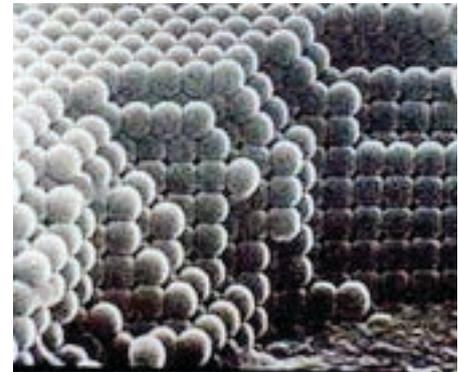


La couleur produite ou couleur fluorescente est de ce fait relativement "pure". La **phosphorescence** est le même phénomène, mais qui se produit avec un retard dans le temps : la couleur émise apparaît encore dans le noir, alors que la source énergétique (la lampe UV) a été éteinte.

Certains filtres de couleur utilisés pour l'identification des gemmes génèrent également des propriétés d'absorption et de diffusion. Des filtres, comme le filtre dit "Chelsea" offrent un indice supplémentaire à l'analyse des gemmes ; toutefois ces observations ne donnent pas une indication déterminante à l'identification de la gemme.

Quelques mots sur la diffraction

La diffraction se produit lorsqu'il y a une interférence d'ondes. L'interférence, qui se calcule par des fonctions mathématiques complexes, intervient pour des ondes d'une même longueur provenant de sources équidistantes. Il en résulte des additions et des soustractions d'ondes. Observée dans une direction donnée, une couleur (soit une onde de longueur précise) se trouve conservée et accentuée, alors que toutes les autres sont annulées. L'arc-en-ciel est produit par diffraction de la lumière dans de fines gouttelettes d'eau. De la même manière, de fines sphérules de silice produisent la diffraction de l'opale, appelée en gemmologie **iridescence**.



Empilement de sphérules de silice constituant l'opale

L'iridescence qui est le pointillisme bariolé bien connu de l'opale est une illustration du phénomène de la diffraction. Elle se traduit par une production de couleurs pures causées par la réflexion et l'interférence de la lumière blanche sur des petites sphères de silice d'un diamètre de 30 à 60 μ disposées dans un alignement parfait. Lorsque notre regard fixe une tache de l'opale sous différents angles, nous remarquons que toutes les couleurs de l'arc-en-ciel apparaissent alternativement ! Eclairer une opale en lumière monochromatique annule l'iridescence !

La **labradorescence** et **l'adularescence** des feldspaths sont également produites par diffraction. La lumière est réfléchiée sur la tranche de très fines lamelles

Chapitre 5 : Les instruments du gemmologue

Ce chapitre résume des informations pratiques que l'on peut tirer de l'usage d'appareils "classiques" de la gemmologie tels les loupe, microscope, polariscope, réfractomètre, dichroscope et spectroscopie. Les principes physiques qui sont à la base de la construction de ces appareils ont été expliqués en détail au chapitre précédent.

Les instruments que le gemmologue utilise permettent l'identification de nombreuses gemmes. Ils permettent dans certains cas de dire si la gemme est synthétique ou naturelle, ou encore de donner une appréciation de sa qualité, et parfois de sa valeur. Lorsque le résultat de son analyse laisse un doute, le gemmologue s'adresse à un laboratoire où des spécialistes, à l'aide d'appareils scientifiques, effectueront une analyse détaillée de la gemme, de sa composition chimique, minéralogique et cristallographique. Le but de ce chapitre n'est pas de donner à l'étudiant des informations sur ces derniers moyens qui demandent, pour leur compréhension, des notions approfondies de chimie et de physique. Nous nous limiterons aux instruments mentionnés

ci-dessus, dont nous allons décrire le fonctionnement et l'usage. Pour une bonne compréhension, l'étudiant devrait pouvoir "toucher" ces instruments.

1. L'observation "à l'oeil nu"

C'est le premier réflexe que nous avons tous lorsque nous recevons une gemme à analyser ! On peut, à première vue, se faire une idée d'une gemme, de son aspect, de sa qualité, mais attention aux idées préconçues ! Dans bien des cas, il faudra passer par toutes les étapes de la détermination avant de donner un nom à la gemme.

Comment observer une gemme ...

- pour bien percevoir la couleur, les observer à la lumière du jour, mais pas au soleil,
- pour percevoir l'éclat, le feu ou d'autres reflets particuliers (astérisme, chatoyance etc.), les observer avec une source lumineuse ponctuelle, lampe halogène, par exemple,
- pour percevoir un éventuel pléochroïsme, les observer à travers un filtre polarisant (les lunettes Polaroid par exemple) en faisant tourner la pierre sur elle même.

Les degrés de coloration :

- pour les gemmes colorées : la couleur est-elle franche, varie-t-elle selon la source lumineuse (lumière du jour ou électrique) ou l'orientation de la gemme (pléochroïsme présent) ?
- pour les gemmes incolores, on évalue l'absence totale de couleur. Les diamantaires, pour estimer la valeur des diamants, se réfèrent à une échelle comprenant les lettres allant de D (diamant parfaitement incolore) à L ; à partir de M le diamant est dit "teinté".

L'observation des couleurs de la gemme peut s'effectuer sous différents éclairages plus ou moins prononcés, en lumière naturelle ou artificielle. La lumière électrique peut fausser la couleur. Des gemmes, comme l'alexandrite (chrysobéryl), présentent des couleurs différentes sous différents éclairages (lumière du jour, lampe incandescente etc.).

L'éclat : Il s'agit pour une gemme transparente ou opaque, de déterminer la propension de la réflexion de la lumière dans la gemme. L'éclat est proportionnel à l'indice de réfraction¹⁵. Il dépend également de la qualité du poli de la pierre. Toutefois, pour déterminer l'indice de

réfraction... seul le réfractomètre donne une mesure précise, et cette mesure est indispensable à l'identification de la gemme !

Le feu : ou effet "arc-en-ciel" produit par une gemme transparente. Le feu peut être affecté par la couleur de la gemme (si elle est colorée), sa pureté et la qualité de sa taille (le facettage ou le volume de la pierre taillée).

Des reflets sur pierres translucides à opaque : il s'agit de déterminer la qualité de l'astérisme, la chatoyance, l'opalescence, l'iridescence, la labradorescence et l'adularescence etc. L'intensité de ces reflets est souvent faussée lorsqu'ils sont exposés à la lumière artificielle ! Les apprécier en lumière naturelle !

2. Examen à la loupe

C'est l'instrument le plus simple, le plus utilisé et le plus facilement transportable. Formée d'une lentille d'un grossissement faible (8 x, 10 x ou 12 x)⁸, la loupe permet une observation rapide de :

l'aspect extérieur de la pierre taillée :

- l'éclat (en particulier pour des pierres translucides à opaques) ou des différences dans l'éclat (pour des pierres composées de différentes matières),
- la qualité de la taille de la gemme et l'origine de la taille (s'agit-il de moulage ? - observable pour des verres ou des plastiques),
- la nature de la rondiste dans le but de détecter un doublet éventuel,
- la nature de la couleur, en particulier si la pierre a été artificiellement teinte.

l'intérieur de la gemme :

- la biréfringence : on détecte une forte biréfringence dans la gemme, lorsque, en observant la gemme par la table, on perçoit une image double p. ex. le dédoublement des arêtes de la culasse,
- les clivages et leur aspect irisé, d'éventuelles cassures,
- des inclusions caractéristiques. (Les proportions d'inclusions ou d'impuretés déterminent la qualité et la valeur d'un diamant !)
- les plans de collage dans des doublets,
- toutes traces visibles de contrefaçon⁹ (p. ex. des traces de teinture pour des cabochons).

3. Observations au microscope

Formé de lentilles plus performantes qu'une loupe, le microscope permet évidemment un meilleur grossissement de l'objet. Mais l'observation ne se fait qu'en lumière électrique, ce qui peut donner une fausse idée de la couleur de la gemme.

Nous parlons ici de l'utilisation d'un binoculaire adapté à l'étude des gemmes et pourvu d'un éclairage idoine.

Par comparaison, le microscope polarisant¹⁰ des minéralogistes permet une détermination précise des caractères optiques des minéraux. Le microscope polarisant est utile pour la détermination d'objets d'art ou de perles façonnés dans des matières qui sont difficiles à analyser avec les instruments du gemmologue. Dans ce but, on peut alors prélever discrètement une infinitésimale partie du minéral ou de la roche et l'analyser, ce que nous laissons au spécialiste.

⁸ Les diamantaires utilisent une loupe de grossissement 10 x pour évaluer la pureté d'une pierre

⁹ pour les contrefaçons, voir le chapitre 6.

¹⁰ voir "La Théorie et l'emploi du microscope polarisant" par J. Deferne, www.kasuku.ch

Le microscope binoculaire qu'on peut nommer plus précisément "loupe binoculaire", permet de dépasser les limites d'une loupe simple :

- une appréciation de la qualité de la taille et de son poli ; certains binoculaires équipés d'une échelle appropriée permettent de vérifier les proportions de la taille de la gemme et de mesurer ses dimensions,
- pour les bruts : la qualité de la pierre et son aspect extérieur,
- les inclusions ! En gemmologie, on appelle inclusion tout ce qu'on observe à l'intérieur de la gemme : des cassures, des plans de clivage, des minéraux... Observer la nature des inclusions, si ce sont des minéraux ; estimer la forme des vides : on appelle "bulles" des vides de forme sphérique (elles permettent de déterminer les pierres de synthèse ou des verres); les stries de croissance (des stries incurvées dénoncent les gemmes synthétisées par la méthode de Verneuil) ; les plans de collage des doublets etc.
- la détection de fraudes,
- si le microscope est équipé de filtres polaroïds, on peut déterminer le **pléochroïsme** de la pierre (un seul filtre) ou l'utiliser comme un polariscope (2 filtres "croisés").



4. Le polariscope

Se basant sur le principe de la polarisation de la lumière, cet appareil permet de déterminer le caractère **anisotrope** ou **isotrope** d'une gemme transparente à translucide. On obtient ainsi une première analyse optique de la gemme. Le polariscope est constitué de 2 filtres polaroïds "croisés" entre lesquels on place la gemme qui est éclairée artificiellement. Tourner la gemme sur elle-même nous permet d'observer des différences d'illumination¹⁹.

La règle générale dit que si une pierre s'illumine tous les 90° de sa rotation, la pierre est anisotrope, si, au contraire, elle reste toujours "éteinte", elle est isotrope.

Il existe de nombreuses exceptions à cette règle :

- Lorsqu'une pierre anisotrope reste éteinte lors d'une rotation de la gemme... c'est qu'on l'observe dans la direction de l'axe optique (AO \perp) aussi appelée direction d'isotropie. Placée dans une autre position, la gemme présentera une situation "allumé-éteint". Des saphirs ou des rubis, des tourmalines sont souvent taillés avec l'AO perpendiculaire à la table.
- Une pierre isotrope apparaît légèrement "allumée et éteinte". Il s'agit d'anisotropie anormale, soit une anomalie produite par des tensions internes à la pierre (spinelles de synthèse, verres, certains grenats ...).
- Lorsqu'une pierre translucide reste "allumée" dans toutes les directions d'observation, il s'agira d'une substance microcristalline anisotrope (calcédoine, jade ...) ou d'un cristal anisotrope finement maclé (pierre de lune ...) ou encore d'un matériel polycristallin (une roche).

Observations au polariscope

Avant toute observation, s'assurer que les filtres sont croisés. Pour obtenir un champ de vision le plus sombre possible, ajuster le filtre supérieur.

Placer la gemme dans un support, la table contre la source lumineuse et la tourner sur elle-même.



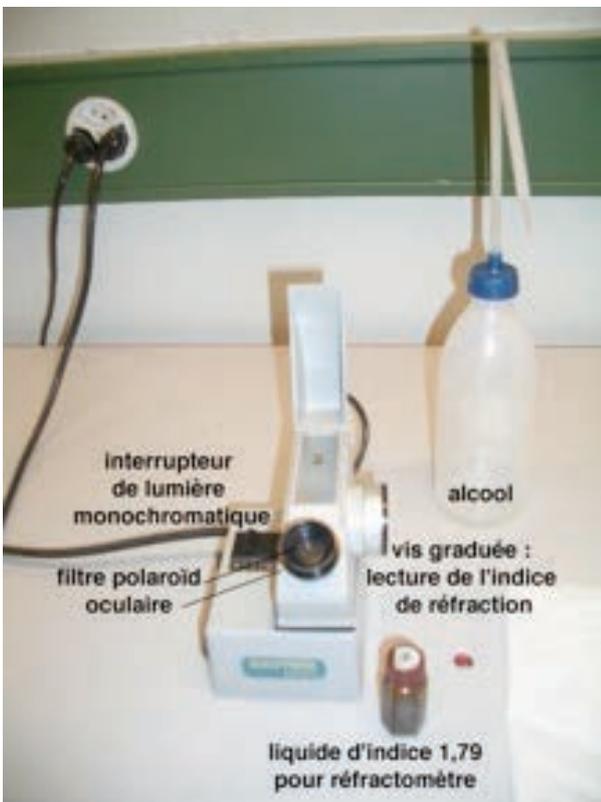
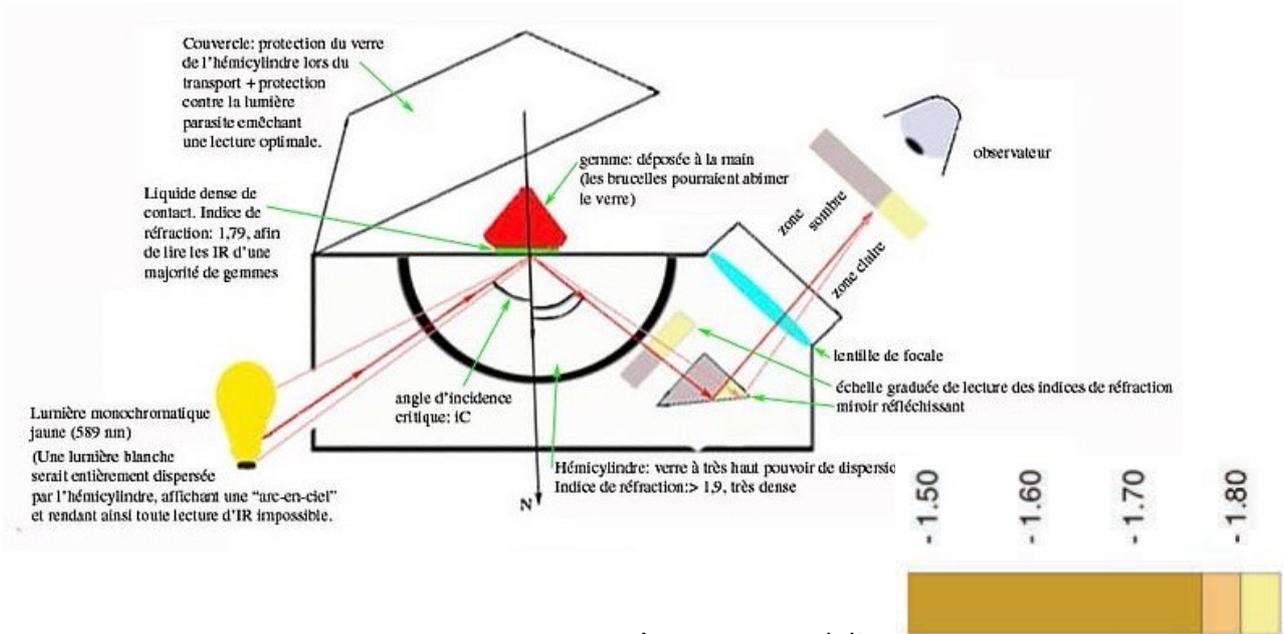
Observations :

1. d'une situation "éteint" : repositionner la gemme à 90° (p. ex. sur la tranche) et observer :
 - une nouvelle situation "éteint" signifie que la gemme est isotrope
 - une situation "allumé-éteint" signifie que la gemme est anisotrope et que la première observation a révélé une direction d'isotropie ce qui permet de situer l'axe optique (AO) dans la gemme : dans ce cas, l'axe optique est perpendiculaire à la table ($AO \perp$) ;
2. d'une situation "légèrement allumé-éteint" : des ombres apparaissent mais il n'y a pas de différence notable entre une situation "allumé" et une situation "éteint". La gemme est isotrope et présente une anisotropie anormale. On refait une observation à 90° et en général, le résultat est le même ;
3. d'une situation franchement "allumé-éteint" : elle s'éclaire tous les quarts de tour et la gemme est anisotrope.

5. Le réfractomètre



Conçu sur le principe de la réflexion totale et partielle, le réfractomètre permet une mesure précise de **l'indice** ou **des indices de réfraction**. En plus, pour les gemmes anisotropes, il est possible de mesurer ou de calculer la biréfringence et de déterminer le signe optique. On mesure l'indice de réfraction au millième en estimant la 3^e décimale entre deux graduations qui, elles, n'indiquent que le centième. L'indice de réfraction ainsi que tous les autres caractères optiques sont indispensables à l'identification d'une espèce minérale ou d'une gemme.



La mesure doit s'effectuer à partir d'une surface plane bien polie et propre ! Pour chaque observation, la pierre est placée sur un film de liqueur d'indice 1.79-1.80 environ qui correspond à l'indice du verre du réfractomètre. Il ne sera pas possible de mesurer l'indice d'une gemme supérieur à 1.80 !

Attention ! Les verres des réfractomètres sont de faible dureté et en conséquence, fragiles. Il est obligatoire de tourner la pierre avec précaution en la soulevant légèrement. Tout faux mouvement peut rayer le verre et endommager définitivement le réfractomètre. Nettoyer soigneusement le verre après usage avec kleenex et alcool.

Exemples de mesures au réfractomètre

Au préalable ... mettre une goutte de liquide pour réfractomètre sur le verre et placer la gemme lavée et séchée de manière qu'un film de liquide se répande entre la gemme et le verre du réfractomètre.

Méthode à suivre

1. poser délicatement la gemme et mémoriser sa position (position 0°) ;
2. lire l'indice ou les indices de réfraction ; on les distingue à l'aide du filtre polaroid posé sur l'oculaire qu'on fait tourner ;
3. tourner délicatement la gemme d'un quart de tour (position 90 °) et faire à nouveau la lecture.

Deux lectures sont possibles :

Si on ne lit qu'un seul et même indice dans les 2 positions, la **gemme est isotrope**. On note l'indice et la mesure est terminée.

Lorsqu'on lit 2 indices différents, **la gemme est anisotrope** et on poursuit la mesure :

Pour une gemme anisotrope uniaxe

Après avoir repositionné la gemme à 0°, on mesure les indices dans 5 positions sur au cours d'une demi-rotation, par exemple pour un quartz :

Position	Petit indice (n_p)	Grand indice (n_g)
0°	1.544	1.548
45°	1.543	1.550
90°	1.544	1.553
135°	1.545	1.551
180°	1.544	1.550

Analyse des résultats :

On cherche l'indice constant et on estime une valeur moyenne : ici, le petit indice est l'indice constant ($n_p = n_C$) et $n_C = 1.544$.

On lit ensuite la valeur "extrême" de l'autre indice (= la plus éloignée de la valeur de l'indice constant, $n_V = 1.553$)

La biréfringence se calcule par la différence des deux indices, $bir = n_V - n_C = 0.009$

Le signe optique du cristal est défini comme suit :

Lorsque le petit indice est constant, on dit que le cristal est positif ("uniaxe +"), dans le cas contraire, le cristal est négatif ("uniaxe -"),

Dans l'exemple choisi, le cristal est positif.

Pour un cristal négatif (corindon, béryl, tourmaline), on procède de la même manière, sauf que l'indice variable sera le petit indice et l'indice constant, le grand indice.

Exemples de quartz dont la table est orientée en tenant compte de l'axe optique (AO) :

Orientation // à l'axe optique : on trouve deux indices présentant la même valeur au moins sur la mesure d'une des positions de la rotation de la gemme. Chercher les grand et petit indices comme précédemment et déterminer le signe optique (c'est le cas théorique que nous avons étudié pour la calcite).

Position	Petit indice (n_p)	Grand indice (n_g)
0°	1.544	1.544
45°	1.543	1.549
90°	1.544	1.553
135°	1.545	1.550
180°	1.544	1.544

Orientation \perp à l'axe optique : on trouve deux indices constants correspondant aux valeurs respectives des grand et petit indices

Position	Petit indice (n_p)	Grand indice (n_g)
0°	1.544	1.553
45°	1.543	1.552
90°	1.544	1.553
135°	1.545	1.553
180°	1.544	1.553

Lorsque la table est perpendiculaire à l'AO, il est impossible de dire si le cristal est positif ou négatif. Lire les indices et calculer la biréfringence.

Pour une gemme anisotrope biaxe

Dans le cas général, on mesure 2 indices variables sur une demi-rotation ou une rotation complète de la gemme. On relève les 2 indices correspondant aux extrêmes de la mesure qui permettent le calcul de la biréfringence. Avec le résultat de ses mesures, le spécialiste déterminera en plus un indice moyen et attribuera un signe optique au cristal. Si l'indice moyen est proche du petit indice, le cristal est dit positif ("biaxe +") et dans le cas contraire, il est négatif ("biaxe -").

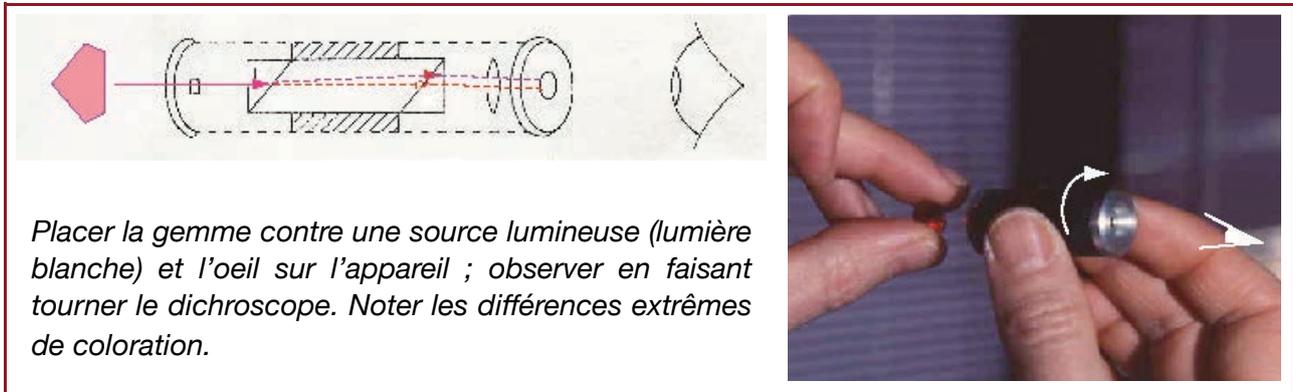
La source lumineuse utilisée pour les réfractomètres classiques est monochromatique de longueur d'onde de 5'800 Å environ (lumière jaune). Il existe des réfractomètres ("gemmeter") dont le principe est un peu différent, et qui utilisent une lumière monochromatique dans le rouge. Les indices de réfraction ainsi obtenus ont d'autres valeurs ! Se référer alors à une table d'identification adéquate !

<i>Tabelle d'identification (pour 12 espèces minérales)</i>					
<i>indice de réfraction</i>	<i>erreur</i>	<i>Espèce minérale</i>	<i>biréfringence</i>	<i>caractère optique système cristallin</i>	<i>densité</i>
2.417		DIAMANT		isotrope, cubique	3.9
1.925 - 1.984	+0.04 -.145	ZIRCON	0.00-0.059	uniaxe +, quadratique	
		GRENATS :			
1.89	+0.01 -.03	andradite var. démantôide		isotrope, cubique	3.83
1.81	+0.004 -.020	spessartite		isotrope, cubique	4.15
1.79	± .03	almandin		isotrope, cubique	4.05
1.76	+0.010 -.020	rhodolite		isotrope, cubique	3.84
1.746	+0.010 -.026	pyrope		isotrope, cubique	3.78
1.74	+0.020 -.010	grossulaire		isotrope, cubique	3.61
1.762 - 1.770	+0.009 -.005	CORINDON	0.008 - 0.010	uniaxe, rhomboédrique	4.0
1.762 - 1.770	+0.005 -.002	CORINDON synthétique	0.008	uniaxe, rhomboédrique	4.0
1.746 - 1.755	+0.004 -.006	CHRYSOBERYL	0.008 - 0.010	biaxe +, orthorhombique	3.73
1.718	+0.01 -.03	SPINELLE		isotrope, cubique	2.6
1.728	+0.017 -.008	SPINELLE, synthétique		isotrope, cubique	3.64
1.660 – 1.676	± .005	SPODUMENE	0.014 - 0.016	biaxe +, monoclinique	3.18
1.654 - 1.690	± .020	PERIDOT	0.035 - 0.038	biaxe+/-, orthorhombique	3.34
1.624 - 1.644	+0.011 -.009	TOURMALINE	0.018 - 0.040	uniaxe -, rhomboédrique	3.06
1.577 - 1.583	± .017	BERYL	0.005 - 0.009	uniaxe -, hexagonal	2.72
1.561 - 1.564	± .01	Emeraude synthétique	0.003 - 0.008	uniaxe -, hexagonal	2.68
1.544 - 1.553	± .005	QUARTZ	0.009	uniaxe +, rhomboédrique	2.65
1.535 - 1.539		QUARTZ calcédoine	0.000 - 0.004		2.6
1.45	+0.020 -.080	OPALE		isotrope, amorphe	2.15

6. Le dichroscope

Le dichroscope est constitué d'un rhomboèdre de calcite. Grâce à la forte biréfringence de ce minéral, on observe séparément la couleur de chacun des 2 rayons polarisés d'une pierre anisotrope . A l'aide de cet appareil, on décrit le **pléochroïsme** en comparant instantanément les

couleurs transmises par chacun des rayons polarisés d'une gemme transparente. Tout comme l'indice de réfraction, le pléochroïsme est un caractère optique inhérent à l'espèce minérale. Il peut être fort (la différence de couleurs est forte), moyen ou faible (faible ou extrêmement faible variation de couleurs). Les spécialistes notent les couleurs observées.



Placer la gemme contre une source lumineuse (lumière blanche) et l'œil sur l'appareil ; observer en faisant tourner le dichroscope. Noter les différences extrêmes de coloration.

Il est inutile de procéder à une observation au dichroscope :

- lorsque la pierre est isotrope (une seule couleur est observable) ;
- lorsque la pierre est incolore.

Attention ! Observée dans la direction d'un axe optique, une gemme anisotrope ne présentera qu'une seule couleur ! Il est donc indispensable de reprendre cette observation sous différentes orientations de la gemme.

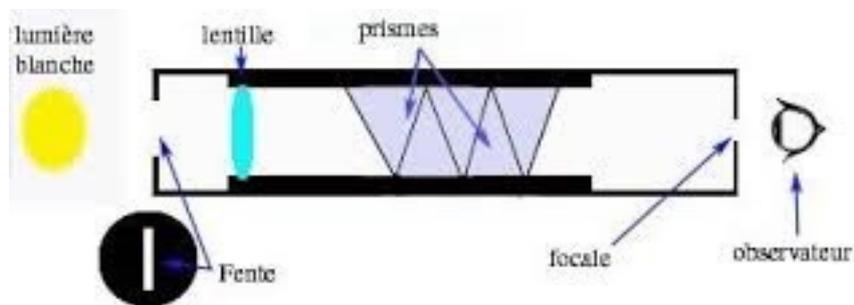
Pour un observateur attentif, une observation au dichroscope permet de savoir si une pierre est isotrope (aucune différence de coloration) ou anisotrope et même, si elle est uniaxe (dichroïsme ou 2 couleurs différentes observables dans une direction perpendiculaire à l'axe optique) ou biaxe (trichroïsme ou 3 couleurs différentes observables 2 par 2 dans des directions perpendiculaires choisies en fonction des propriétés optiques et cristallographiques de la gemme).

Quelques pierres fortement pléochroïques et leurs couleurs

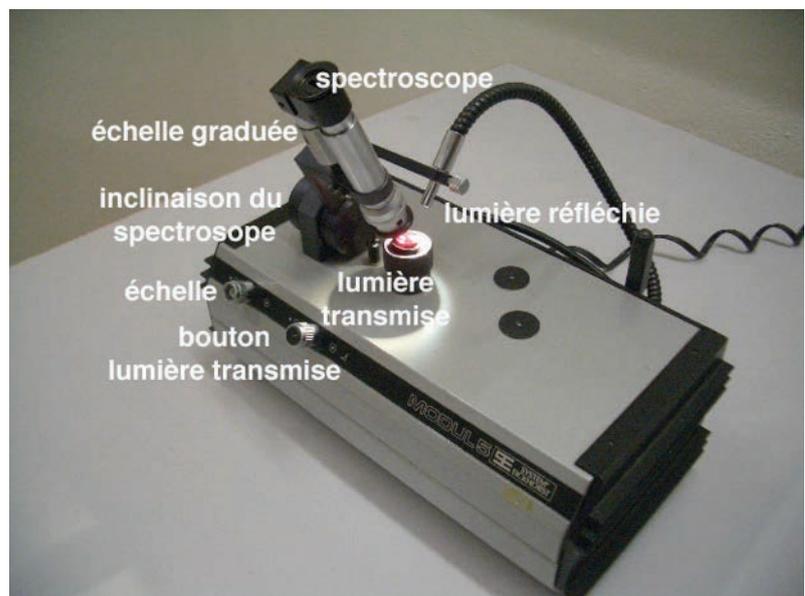
Gemme	couleurs	signe optique
chrysobéryl var. alexandrite en lumière naturelle avec une source incandescente	vert émeraude, jaune, rouge vert émeraude, rouge orangé, rouge	biaxe
corindon rubis saphir bleu	orange-rouge, rouge-rose bleu-vert pâle, bleu foncé	uniaxe
corindon synthétique (comme les corindon naturels) saphir-mauve, imitation de l'alexandrite :		
lumière naturelle avec une source incandescente	vert-brun pâle, mauve jaune-brun, mauve	
tourmaline	toutes les teintes possibles	uniaxe
andalousite	jaune, vert, rouge	biaxe
cordiérite (ou iolite)	bleu pâle, jaune, pâle, bleu-violet	biaxe
tanzanite	bleu, violet, mauve	biaxe

7. Le spectroscope par absorption

Lorsque la couleur d'une gemme est causée par des éléments chimiques dits chromatophores, le spectroscope permet d'observer la disparition de couleurs du spectre lumineux sous forme de champs, de bandes ou de raies d'absorption. La gemme est exposée à une source de lumière blanche, et ce rayonnement est partagé par 2 prismes successifs. On voit au travers d'un oculaire toutes les couleurs de l'arc-en-ciel dont certaines longueurs d'ondes sont absentes. La disposition et l'intensité de ces raies et bandes d'absorption sont caractéristiques de la nature de la gemme, de sa structure cristalline d'une part et de l'élément chromatophore d'autre part. Pour la détermination de la gemme, on se réfère alors à des spectres de références. Dans la description des gemmes, les spectres sont décrits avec les longueurs d'onde. Par exemple pour le rubis, il est indiqué 6'942, 6'928, 6'680, 6'590 (raies dans le rouge), 6'100-5'000 (bande jaune-vert), 4'765, 4'750, 4'685 (3 raies dans le bleu). Ces valeurs sont données en ångström, pour les lire en nanomètres, les diviser par 10 !



Placer la gemme sur le support en choisissant le type d'éclairage (lumière transmise ou réfléchie), régler l'inclinaison du spectroscope jusqu'à obtention d'une intensité maximale, ajuster l'oculaire pour la netteté. Noter ou dessiner les raies et les bandes d'absorption. Comparer à des spectres de référence que l'on trouve dans des tables.



Quelques observations :

- saphir bleu et rubis montreront différents spectres d'absorption, le premier étant coloré par les éléments chimiques fer et titane et le second par le chrome.
- l'émeraude colorée par le chrome a un spectre différent de celui du rubis.
- rubis synthétique et rubis naturel présenteront les mêmes raies d'absorption ou le même spectre !
- pour des gemmes incolores, il n'y a pas de spectre d'absorption, sauf exception :
- des diamants naturels présentent parfois une raie à 4150 Å (415 nm, dans le bleu).

8. Les lampes ultraviolet et les filtres

De la même manière qu'en regardant une gemme, on observe des différences de couleurs selon le type d'éclairage, de la même manière, une exposition de la gemme à des lampes UV peut produire des couleurs bien particulières et souvent inattendues produites par **luminescence**. Les tests qui sont proposés dans ce paragraphe ne sont pas univoques. Lorsqu'ils sont positifs, ils apportent un indice supplémentaire à l'identification. Lorsqu'aucune réaction n'est observable ... le doute persiste.

On expose la gemme placée dans l'obscurité alternativement à des rayons ultra-violetts longs (longueur d'onde = $3'650 \text{ \AA}$) et courts ($2'537 \text{ \AA}$) et en observe la réaction :

- apparition de couleurs pendant l'illumination ou **fluorescence** ;
- la réaction colorée perdue après avoir éteint la lampe, c'est la **phosphorescence**



N.B. Les réactions des pierres aux UV sont cataloguées dans des tables. Sur un certificat, les couleurs générées par luminescence font partie de la description des gemmes.

Les filtres de couleur sont des verres teintés et parfois de l'eau teintée par des sels. Les substances chimiques additionnées ne laissent passer que certaines couleurs. Le plus connu est le filtre CHELSEA qui ne laisse passer que le rouge profond et le vert-jaune.

Le filtre CHELSEA est toujours utilisé par des gemmologues bien que sa réputation soit passée. C'était autrefois un moyen sûr et rapide de détermination des émeraudes. Vues à travers ce filtre, elles apparaissaient rouges, laissant passer la composante rouge du chrome. On a dès lors découvert des émeraudes dont la coloration provient du vanadium et non du chrome. Et ces émeraudes restent vertes au filtre Chelsea !

Chaque appareil et chaque méthode d'identification a des limites. Avant de les utiliser, il vous faut être conscient de l'information que pourra vous fournir telle mesure ou telle observation : p. ex. l'identification de l'espèce minérale, une étude des inclusions, une estimation de la qualité de la pierre etc.

Le tableau ci-après propose une vue d'ensemble des appareils, des méthodes ainsi qu'un commentaire sur la validité des tests. On qualifie de fiable un test qui permet à coup sûr d'obtenir un résultat. Un résultat est univoque lorsque l'observation ou la mesure permet une solution unique : elle élimine toutes les autres solutions. Un résultat est équivoque lorsqu'il donne plusieurs solutions ; en conséquence, ce résultat doit être confirmé ou infirmé par un autre test.

Après avoir acquis de l'expérience avec ces appareils, vous n'aurez plus à réfléchir longtemps sur les tests importants à effectuer !

Il est recommandé d'effectuer systématiquement une mesure de la densité (expliquée en détails dans le paragraphe 2 du chapitre 4) et des indices de réfraction. Ce sont les seuls résultats numériques et fiables. Ces chiffres, répertoriés dans des tables, vous dévoileront l'espèce minérale. Ils sont indispensables à l'identification de l'espèce minérale et de la gemme.

<i>Les instruments, leur utilisation et leurs prix</i>				
<i>Instrument</i>	<i>détermination</i>	<i>fiabilité du test</i>	<i>prix approximatif</i>	<i>transportabl</i>
<i>loupe</i>	<i>qualité de la gemme, inclusions</i>	<i>bonne appréciation</i>	<i>40 à 60 €</i>	<i>aisément transportable</i>
<i>loupe binoculaire</i>	<i>qualité de la gemme, détection de fraudes, inclusions</i>		<i>1'000 à 5'000 €</i>	<i>difficilement transportable</i>
<i>balance hydrostatique</i>	<i>poids de la gemme, mesure de la densité</i>	<i>fiable</i>	<i>2'000 à 5'000 €</i>	<i>difficilement transportable</i>
<i>balance de poche</i>	<i>poids de la gemme</i>	<i>fiable</i>	<i>100 à 300 €</i>	<i>transportable</i>
<i>polariscope</i>	<i>isotropie-anisotropie</i>	<i>complète le réfractomètre</i>	<i>100 à 200 €</i>	<i>transportable</i>
<i>réfractomètre</i>	<i>caractères optiques, indices de réfraction</i>	<i>fiable</i>	<i>1'000 à 2'000 €</i>	<i>très délicat mais transportable</i>
<i>dichroscope</i>	<i>pléochroïsme</i>	<i>test complémentaire intéressant</i>	<i>€ 100</i>	<i>transportable</i>
<i>spectroscope</i>	<i>raies et bandes d'absorption</i>	<i>utile pour un oeil expérimenté</i>	<i>200 à 600 €</i>	<i>transportable, bon éclairage indispensable</i>
<i>lampes U.V.</i>	<i>fluorescence, phosphorescence</i>	<i>complémentaire aux autres tests</i>	<i>€ 400</i>	<i>transportable</i>
<i>filtre Chelsea</i>	<i>absorption</i>	<i>complémentaire aux autres tests</i>	<i>10 à 50 €</i>	<i>transportable</i>

Chapitre 6 : Les pierres de synthèse et les imitations

Il n'existe pas de domaine plus sensible à la problématique des contrefaçons que la gemmologie! Il est indispensable, pour des raisons commerciales, de savoir distinguer une gemme naturelle authentique d'une fraude. L'enjeu peut être considérable tant sur un plan financier que juridique et judiciaire. Dans bien des cas, la détection d'une pierre de synthèse ou d'une pierre traitée ne peut pas s'effectuer simplement. Elle demande beaucoup de soin et un temps de réflexion.

A l'heure actuel, l'ensemble des procédés de fabrication des pierres de synthèse sont connus et répertoriés. Il appartient au gemmologue de se tenir au courant de leurs derniers développements. Il doit également connaître les indices qui permettent la détection des gemmes synthétiques.

Les Institutions Internationales (GIA, GAGTL, CIBJO) sont les garants de l'éthique pour ce qui est des appellations commerciales des gemmes. Au travers de leurs publications, elles signalent les nouvelles fraudes qui, régulièrement, apparaissent sur le marché.

Ce n'est pas le but ici de décrire tout l'éventail des synthèses et fraudes ainsi que leurs procédés de fabrication. Actuellement un bon nombre de minéraux ont été synthétisés en laboratoire. Mais seuls les procédés commercialisables sont utilisés pour la fabrication en série de gemmes.

L'étudiant trouvera donc dans ce chapitre une description des quelques techniques de synthèse ainsi qu'une énumération des imitations et des traitements les plus courants. Pour ce qui est de la détection des fraudes, ne seront mentionnés que les indices d'identification obtenus par une observation minutieuse et attentive de la pierre précieuse et de ses inclusions en particulier. En cas de doute, il est recommandé de s'adresser à un laboratoire spécialisé, qui par des analyses chimique ou spectrométrique peuvent infirmer ou confirmer une première observation.

En fin de chapitre, le lecteur trouvera des références de publications qui décrivent de manière la plus complète possible ce qui est admis, toléré et interdit. Il est important de savoir que toute gemme fabriquée doit être mentionnée dans les catalogues de vente de bijoux et de pierres précieuses par les termes " synthétique ", " imitation ", " pierre traitée " ou une autre spécification.

Les procédés de fabrication décrits dans ce chapitre sont des résumés des indications détaillées tirées de publications du GAGTL ainsi que du Cours de Gemmologie de Jean DU BOIS (DIP, Genève, 1972). Dans le texte, l'étudiant trouvera des traductions anglaises de termes techniques ou de noms ; elles sont accompagnées de la mention "angl".

1. Quelques définitions

*On appelle synthèse un produit fabriqué artificiellement dans des laboratoires ou en usine : ce sont des verres fabriqués, des plastiques aussi bien que des gemmes : corindons, spinelles, émeraudes ou diamants ... **synthétiques**.*

***La pierre synthétique** ou **pierre de synthèse** est un produit créé entièrement ou partiellement par l'Homme. C'est une contrefaçon parfaite, parfois même plus parfaite que la pierre naturelle. En effet, en plus de la reproduction exacte des caractères cristallins du minéral, les pierres de synthèse sont généralement plus pures que les pierres naturelles. Les propriétés physiques et chimiques de la pierre naturelle sont parfaitement reproduites et, dans bien des cas, le gemmologue ne peut pas à l'aide de mesures d'indices de réfraction et d'une densité, distinguer une pierre naturelle de la synthétique. Il doit se référer aux inclusions, c'est-à-dire à ce qu'il observe dans la gemme : zones de croissance ou de coloration, macles, bulles ou encore à la présence d'éléments chimiques trop rares pour être d'origine naturelle, laissés en traces dans des inclusions lors de la fabrication.*

*Les **rubis** et **saphirs**, les **spinelles**, les **émeraudes**, les **quartz** sont couramment synthétisés. Les quartz, les rubis ou des saphirs incolores sont synthétisés à des fins industrielles et trouvent des applications dans le domaine de l'horlogerie (montres à quartz, rubis d'horlogerie, "verres" de*

montre) et de l'optique (laser). Ces mêmes pierres synthétiques sont recherchées pour leur qualité gemme.

Actuellement, on fabrique des **diamants** de manière industrielle pour des applications dans des domaines scientifiques et technologiques (diamants incolores pour des monochromateurs, diamants dopés au Bore conducteurs d'électricité). En parallèle, le diamant s'impose peu à peu sur le marché des gemmes.

Une imitation est un produit naturel ou synthétique utilisé comme contrevenant d'une gemme. Elle n'aura aucune des propriétés physiques de la pierre naturelle qu'elle prétend imiter. Notons qu'il existe des **gemmes artificielles** pour lesquelles il n'existe pas de correspondant naturel et dont le but est uniquement d'imiter une gemme de prix. L'oxyde de zirconium synthétique (angl : **cubic zirconia** ou CZ) est une bonne imitation du diamant. Un plastique ou un verre peut imiter n'importe quelle gemme.

N'importe quelle gemme naturelle peut imiter une gemme de prix. On préfère alors parler de confusion p. ex. la **tanzanite**, la **cordiélite** ou le **disthène** sont confondus avec le **saphir**.

Finalement, on peut améliorer la qualité d'une gemme par toutes sortes de procédés (chauffage, teinture, enrobage etc...) qui lui confèrent une meilleure pureté, une couleur plus franche, et la gemme en sera plus attrayante. Ces **traitements** (angl : enhancement qui signifie "améliorations") sont frauduleux dans la mesure où les procédés utilisés pour les obtenir n'existent pas dans la nature. Pourtant, certaines "améliorations" courantes et connues sont admises.

2. Un peu d'histoire

C'est par appât du gain que les Hommes, au cours de l'Histoire, auront tenté des recherches longues et coûteuses de fabrication et d'imitation de produits naturels. On raconte que l'empereur romain Dioclétien, au IIIe siècle de notre Ere aurait interdit la diffusion d'un premier "livre de chimie" parce qu'il livrait toutes sortes de recettes de contrefaçons de pièces d'or, de gemmes et autres, dont la diffusion aurait pu mettre en péril la vie économique de l'Empire.

Au Moyen-Âge, on utilisait couramment l'émail comme simulant de pierres précieuses. Cette technique particulière de verres fondus appliqués à un métal était déjà connue dans la Rome Antique ! Notons que dans l'Egypte Ancienne, on utilisait des cabochons de verres recomposés ou des pierres comme de la turquoise et de l'émeraude teintées.

Bien avant que les techniques d'analyse de laboratoire n'aient été développées, il était courant de confondre les pierres : ainsi les spinelles rouges pris pour des rubis. Ces derniers sont d'ailleurs appelés, de manière erronée, rubis balais ou rubis de Bala et certaines de ces pierres "historiques" se trouve actuellement dans les trésors des familles royales d'Europe !

Quant aux premières gemmes synthétiques, elles ont été fabriquées autour de 1900. Ces pierres, d'aspect clinquant, étaient à la mode dans les années 1920, ce qui fait qu'elles ornent encore souvent des bijoux anciens, des bijoux de famille, par exemple !

Les "**Rubis de Genève**". Entre 1885 et 1910 environ, apparaissent sur le marché des pierres synthétiques qui furent appelées "rubis genevois" ou "rubis fondus" ou encore "rubis reconstitués". On pensait qu'ils étaient fabriqués dans la région genevoise par un prêtre. On rencontre encore ces rubis sur des bijoux anciens. La synthèse des rubis prit de l'importance lors du développement de la méthode par fusion sèche, procédé mis au point par le chimiste L. Verneuil en 1902 (source : Jean Du Bois, 1972).

L'apparition de diamants synthétiques sur le marché des gemmes est certainement l'événement le plus marquant de ce millénaire. On fabrique des diamants depuis les années 1950 et, jusque dans les années 1980, ces diamants de synthèse, petits et de mauvaise qualité, servaient

d'abrasifs dans un but industriel. Il est vrai que pour obtenir un diamant utilisable en joaillerie, le procédé était long et coûteux : on tentait alors de reproduire des conditions de haute température et haute pression qui auraient régné lors de leur formation en milieu naturel dans des kimberlites. Dès les années 1990, la synthèse des diamants a fait l'objet de recherches importantes. Les procédés de fabrication ont été améliorés et la production est devenue courante. Actuellement, on en fabrique en grande quantité au moyen d'un flux (procédé BELT mentionné plus loin). Même s'ils restent de petite taille (moins de 1 ct.), ces derniers, parfaitement incolores, posent pour leur identification une difficulté nouvelle aux diamantaires et aux gemmologues.

Dans le siècle qui sépare ces deux productions, on est parvenu à fabriquer toutes les autres pierres précieuses. Les quartz sont synthétisés par la méthode hydrothermale. Des rubis de synthèse appelés **rubis Ramaura** abondent (méthode par le flux). On synthétise également les **alexandrites**. Autour de 1990, sont apparues des **opales synthétiques**, un contrevenant parfait d'opales naturelles produit par la maison GILSON.

Mais c'est certainement la fabrication d'**émeraude synthétique** qui a occasionné les recherches les plus longues et coûteuses. Les premières tentatives par la méthode hydrothermale sont effectuées en 1912 par R. Nacken. Les résultats n'étaient cependant pas commercialisables sauf pour un procédé développé par J. Lechleitner qui consiste à enrober des émeraudes naturelles taillées de teinte généralement trop pâle d'une pellicule d'émeraude colorée. Après un léger polissage, l'émeraude dite émeraude LECHLEITNER bien verte (!) est prête pour la vente. Les premiers essais de synthèse par le flux datent des années 1930. Elles ont été entreprises par la firme FARBEN INDUSTRIE AG puis par la fabrique CHATHAM aux Etats-Unis. Dès les années 60, deux nouveaux producteurs fournissent le marché en émeraudes : en France la maison GILSON et en Allemagne, à Idar-Oberstein, la maison ZERFASS. (source : Jean Du Bois, 1972).

Remarquons que seules les gemmes inorganiques ou "minérales" sont fabriquées, mais, comme nous le verrons plus loin, il existe de nombreuses imitations pour des gemmes d'origine organique: le plastique simule l'ivoire ou le corail et la résine durcie, l'ambre.

Finalement mentionnons qu'avec le développement des colles synthétiques, on a vu apparaître des pierres composées, doublets ou triplets. Certaines ornent aujourd'hui encore des bijoux fabriqués au siècle dernier.

3. Les pierres de synthèse

Pour créer une gemme synthétique, le fabricant doit pouvoir réunir les critères suivants :

- il doit arriver à fabriquer un seul cristal de dimension appréciable de manière à pouvoir le tailler par la suite ;
- le cristal doit correspondre aux critères de beauté (pureté parfaite) de la pierre naturelle ;
- le cristal doit être aussi homogène que possible (pas ou peu de variations de couleur).

On peut ajouter à cela que pour que la gemme synthétique soit attractive sur le marché, le coût de sa production doit permettre sa commercialisation : son prix / carat doit rester inférieur à celui de la gemme naturelle.

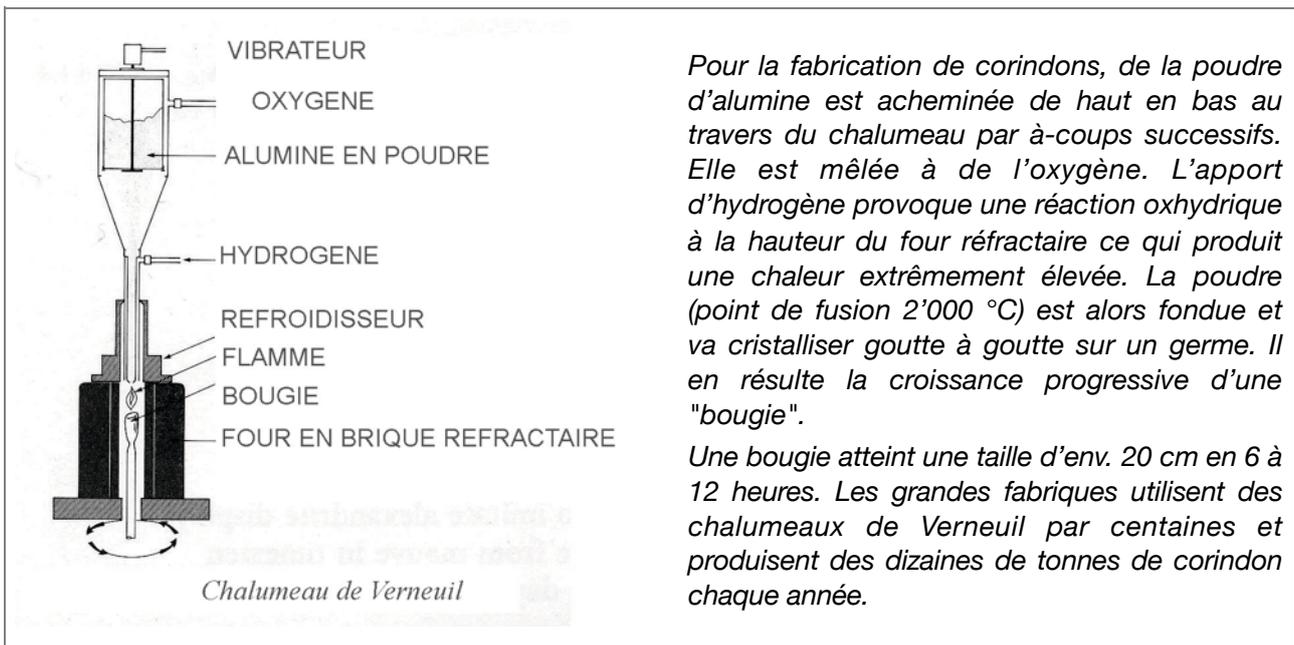
Les méthodes par fusion sèche

Le procédé dit " par fusion sèche" permet, à partir d'un bain d'oxydes en fusion, la cristallisation de la gemme. La matière en fusion contient en proportion les constituants chimiques du cristal. On y ajoute un élément chromatophore sous forme d'oxyde en infime proportion : Cr₂O₃ pour la coloration rouge du rubis, TiO₂ & Fe₂O₃ pour la teinte bleue du saphir, du nickel pour obtenir la couleur jaune ou encore du vanadium pour produire un corindon violet à mauve qui imite l'alexandrite etc. Deux procédés sont couramment utilisés : ce sont d'une part le **chalumeau de Verneuil** et d'autre part la **méthode de Czochralski**.

Le procédé de Verneuil

Cette technique permet la fabrication de :

- corindon ;
- spinelle, dont la composition chimique est légèrement différente de celle du spinelle naturel ;
- rutile : TiO_2 , dont l'indice de réfraction et la biréfringence sont très élevés ; sa dispersion est environ 6 fois supérieure à celle du diamant ce qui produit un feu très intense, sa dureté est de 6.
- fabulite ou titanate de strontium ($SrTiO_3$), minéral artificiel (qui n'a jamais été trouvé dans la nature), dont l'indice est proche de celui du diamant, et qui possède 4 fois plus de pouvoir dispersif et donc un feu très intense ; sa dureté n'est que de 5.5.



Par une observation au microscope, on reconnaît à coup sûr les rubis et saphirs de synthèse Verneuil lorsqu'ils présentent des courbes de croissance qui suivent la forme incurvée de la boule et éventuellement des bulles. Les lignes de croissance sont bien moins visibles dans les spinelles, mais on y observe parfois parfois des inclusions "en forme de virgules", témoins du processus de cristallisation.

La maison DJEVA SA à Monthey en Suisse est spécialisée dans la fabrication des pierres de synthèse par chalumeaux de Verneuil. Cette technique a été développée de manière industrielle par son fondateur, H. Djevahirdjan.

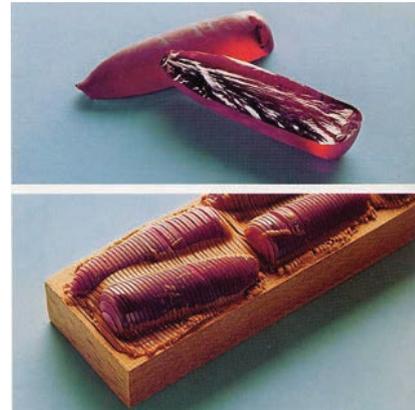


Les bougies de Verneuil

On les appelle aussi "boules" ou "poires". D'une longueur de 10 à 20 cm, les bougies sont fragiles et se fendent facilement en deux moitiés. On pratique ces fractures longitudinales volontairement avant la taille, de manière à pouvoir sans autres les travailler. Les bougies de corindon, de système rhomboédrique, sont de section arrondie alors que celles de spinelle, de système cubique, prennent la forme de prismes à base carrée. Une particularité des spinelles de synthèse, c'est leur "anisotropie anormale". Elle provient de la cristallisation désordonnée de l'alumine qui tend à prendre une forme rhomboédrique.



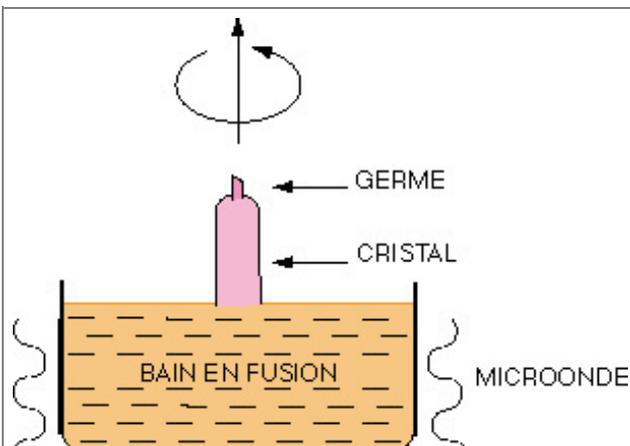
Bougies de corindon.
on fabrique des corindons étoilés
par adjonction de TiO_2 (rutile).
(photo Muséum de Genève)



Demi-bougies de rubis sciées en
lamelles destinées à la fabrication
de rubis d'horlogerie.
(photo ASFPH)

Le procédé de Czochralski

Cette méthode par fusion sèche permet un meilleur contrôle du bain en fusion et du processus de cristallisation que le chalumeau de Verneuil. Les rubis, spinelles et l'alexandrite ainsi que les deux isomorphes du grenat GGG et YAG¹¹ sont fabriqués par cette technique.



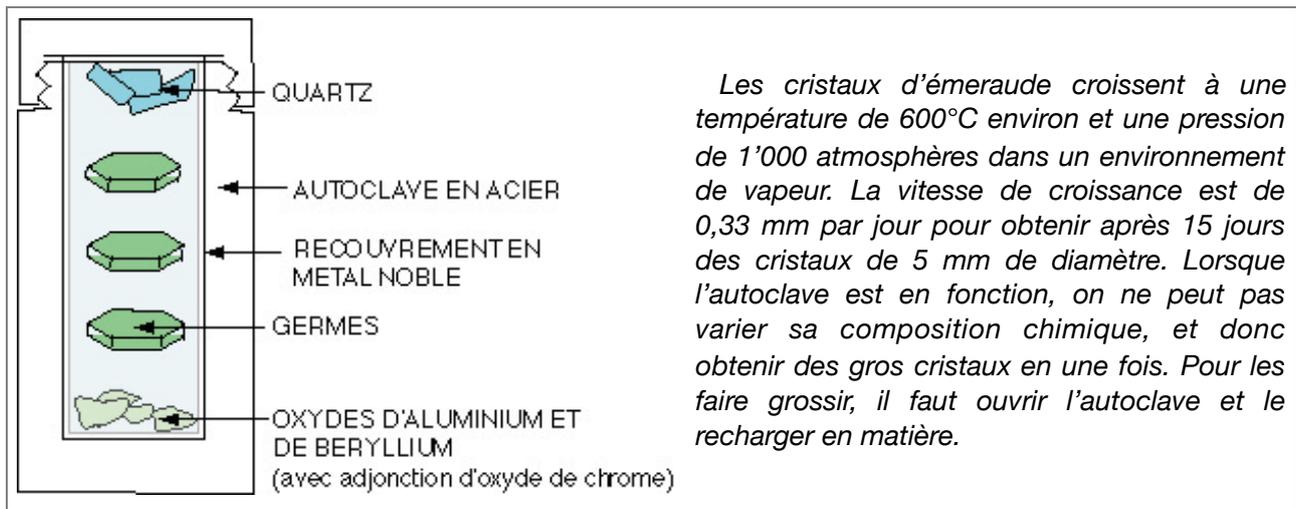
La croissance du cristal s'effectue à partir d'un germe en l'élevant progressivement de la surface d'un bain en fusion. Ce dernier est de même composition chimique que le cristal synthétisé. On obtient ainsi des cristaux de grande pureté qui sont utilisés surtout à des fins industrielles. Pour la fusion du rubis (point de fusion 2'000 °C), le creuset utilisé est en iridium, métal dont le point de fusion est de 2'400°C.

¹¹ minéraux artificiels, pour les propriétés physique, voir le tableau "Les imitations du diamant".

La méthode hydrothermale

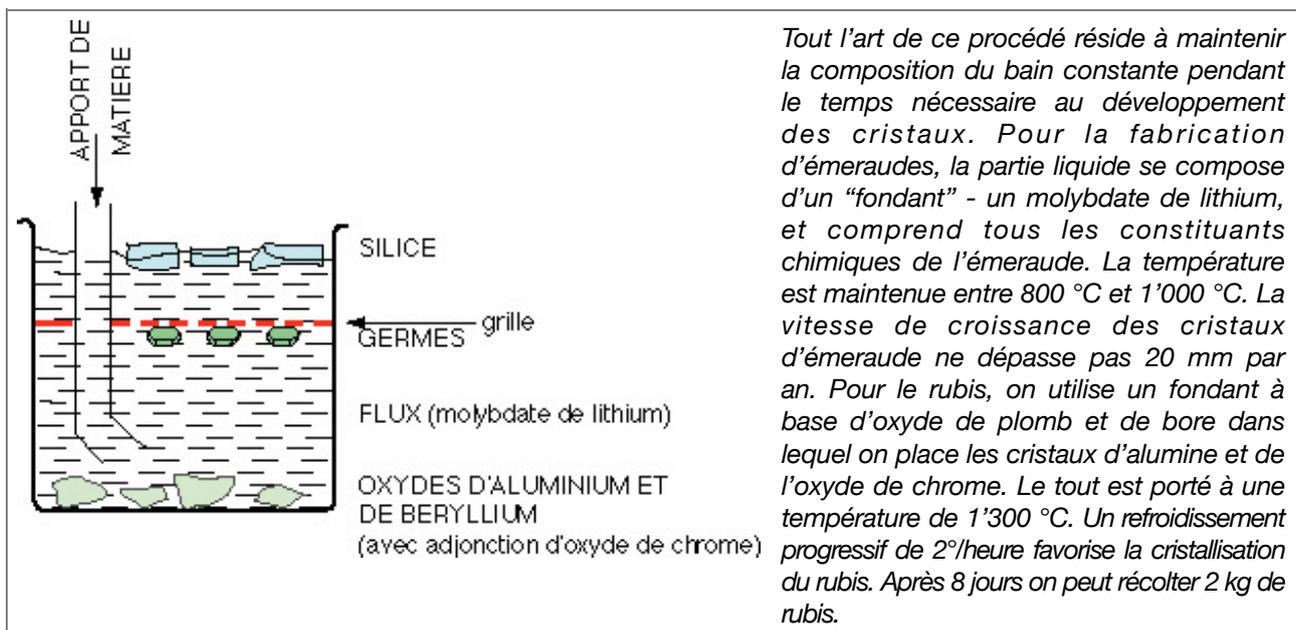
La cristallisation est provoquée en solution aqueuse, sursaturée et surchauffée dans un autoclave (récipient hermétiquement fermé) qui produit un environnement de vapeur. Cette situation rappelle celles qui sont à l'origine de minéralisations dans certains gisements filoniens. Les composants chimiques se déposent progressivement sur des germes au cours d'un refroidissement contrôlé. Toute la méthode est gardée sous secret : le conditionnement sous pression, les gradients thermiques, la composition chimique exacte ainsi que les dopants (additifs chimiques favorisant certaines formes de cristallisation).

On obtient des émeraudes qui cristallisent à partir de la réaction des différentes composantes ou des quartz cristal-de-roche, améthyste ou citrine cristallisés à partir d'un transport de silice dans l'autoclave.



La méthode par le flux

Un flux est un simulacre de magma. On appelle cette méthode également "procédé par bains en fusion". Ce procédé permet l'ajout de matière lors du fonctionnement du système. On produit ainsi des rubis et des saphirs dont certaines fabrications sont appelées RAMAURA ainsi que des émeraudes et des alexandrites.



Procédés spéciaux

Récemment, aux Etats-Unis, la société BELT a développé un procédé de synthèse des diamants qui en anglais s'appelle Chemical Vapor Deposit (CVD). Il permet, à l'aide d'un flux métallique dans un système fermé et contrôlé, la croissance de diamants incolores. Actuellement le poids de ces diamants n'excède pas 1 ct, et leur identification ne peut s'effectuer que par des techniques coûteuses dans des laboratoires spécialisés.

La croissance de beaux et grands cristaux nécessite une grande habileté. On peut également en fabriquer en utilisant successivement plusieurs procédés de synthèse. Pour les diamants en particulier, des fabricants utilisent les germes produits par fusion sèche dans des autoclaves sous de très hautes pression et haute température avant de les placer dans un système de type BELT.

La synthèse des émeraudes illustre également ce propos : on utilise des germes qui ont grossi dans un autoclave pour les placer ensuite dans un flux.

Identification de pierres de synthèse - les indices les plus courants

Pour distinguer les gemmes naturelles de leurs contrevenants synthétiques, il convient d'abord d'effectuer une observation attentive des inclusions. Les mesures habituelles des indices de réfraction et de la densité peuvent fournir une indication supplémentaire pour des cas bien précis, comme pour des spinelles Verneuil ou éventuellement des émeraudes hydrothermales. Il en va de même pour des observations au polariscope comme l'anisotropie anormale observée sur des spinelles Verneuil.

Des gemmes synthétiques peuvent présenter des inclusions de minéraux apparues accidentellement. Parfois, ces inclusions, trompeuses, donnent un aspect "naturel" à la gemme.

Quelques tests moins fiables fournissent également des indications :

- les tests de fluorescence : les synthétiques réagissent de manière plus intense à la lumière UV ;
- des spectres d'absorption qui présentent certaines raies d'absorption au spectroscope.

Attention ! Ces tests ne sont pas univoques : dans la mesure où ils sont positifs, ils peuvent confirmer l'origine naturelle ou bien synthétique de la gemme ; les tests nuls n'ont aucune validité. Il est donc important d'effectuer plusieurs tests avant de se prononcer.

De manière générale, notons que les synthèses sont en général plus pures que les pierres naturelles et que certaines ont des couleurs vives et particulières. Ces indications ne peuvent qu'éveiller des soupçons et n'ont aucune validité scientifique.

Lorsque qu'on pense avoir affaire à une gemme synthétique sans pouvoir en établir la certitude, s'adresser à un laboratoire spécialisé. En effet dans de nombreux cas et pour leur authentification, il ne reste comme recours qu'une analyse chimique ou spectrométrique sur des inclusions microscopiques laissées en traces lors du processus de synthèse. Une telle analyse ne peut s'effectuer qu'en laboratoire.

Il est actuellement difficile de distinguer des émeraudes naturelles des émeraudes synthétiques. En effet, le béryl est un minéral complexe dont la synthèse est longue et délicate ... Les indices de réfraction et les densités ont des valeurs très proches. Il vaut mieux se référer aux inclusions : des inclusions triphasées, des cristaux négatifs, ou différents minéraux naturels y compris les fameux jardins ou bien des givres sont inclus dans des émeraudes naturelles. Dans des émeraudes synthétiques, on peut observer des voiles constitués de très petites inclusions liquides (résidus du flux) et quelques petits cristaux ; elles sont en général plus pures que les émeraudes naturelles.

Identification des pierres de synthèse par observation

gemme	inclusions	autres observations et pierres naturelles	indice de réfraction et densité
diamant synthétique utilisés en joaillerie depuis les années 1980.	Eventuelle présence de métaux (provenant du flux.) Croissance particulière en cuboctaèdres Stries de croissance avec des angles caractéristiques parfois visibles sous certains éclairages.	La fluorescence (UV) des synthétiques est plus marquée. Certains diamants naturels présentent une faible fluorescence bleue. La plupart des naturels sont caractérisés par la raie 4'150 Å qu'on n'observe pas dans les diamants de synthèse	comme les naturels
rubis Verneuil fabriqué depuis les années 1900	bulles et surtout courbes de croissance 	A comparer avec les stries de croissance caractérisées par un angle de 120° des corindons naturels : 	comme les naturels
saphir Verneuil fabriqué depuis les années 1900			
spinelles Verneuil	Bulles peu fréquentes et rarement sphériques. Courbes de croissance rares	polariscope : anisotropie anormale Des spinelles de synthèse imitent la pierre de lune ou le lapis lazuli. spinelles naturels : inclusions minérales, polariscope : en général éteint	n = 1.727 (synthétique rouge: 1.718) densité: 3.63 à 3.65 spinelle naturel : 1.718 densité : 3.58 à 3.60
émeraude synthétique	Pierres souvent « propres ». Gouttelettes ; résidus liquides (flux). Présence possible de cristaux.	émeraudes naturelles : inclusions triphasées ou de minéraux ; jardins ; givres !	1.56 - 1.565 (jusqu'à 1.578) densité : env. 2.70 similaire aux naturelles.
quartz synthétique (hydrothermal) (incolore, bleu (!) violet ou jaune)	Pierres très propres et homogènes, souvent avec un léger feu.	quartz naturels, améthystes : figures de macles perpendiculaires à l'axe du cristal ; citrines ou améthystes : zones de coloration.	comme les naturels

4. Les imitations

On appelle *imitation* une matière qu'on a substituée à la pierre précieuse. Cette définition très large mérite quelques commentaires.

La plupart des imitations sont connues et répertoriées. On préfère parler de confusion dans le cas d'une gemme naturelle qui imite une autre gemme, p. ex. la tanzanite, la cordiérite ou le disthène sont confondus avec le saphir. De manière usuelle, on réserve le terme d'imitation aux

matières synthétiques utilisées ou vendues pour contrefaire une gemme naturelle. Dans la plupart des cas, il s'agit de verres ou de plastiques.

Les imitations du diamant

Pour imiter le diamant, on lui substitue des gemmes artificielles (qu'on ne trouve pas dans la nature). Actuellement, le cubic zirconia et la moissanite sont les plus utilisés.

Des gemmes artificielles qui imitent le diamant

Gemme	formule chimique	densité	indice	dispersion
isotropes :				
oxyde de zirconium, "djevallite" ou cubic zirconia ou CZ	ZrO ₂	5.6 - 5.9	2.13 - 2.20	0.065
YAG ou Yttrium Aluminium garnet	Y ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	4.6	1.83	0.028
GGG ou Gadolinium Gallium garnet	Gd ₃ Ga ₂ (GaO ₄) ₃	7.05	1.97	0.045
fabulite (titanate de strontium)	SrTiO ₃	5.1	2.41	0.19
anisotropes :				
rutile synthétique	TiO ₂	4.26	2.6 - 2.9	0.3
moissanite	Si C	3.22	2.65 - 2.69	0.0044
Pour comparaison :				
Diamant (syst. cubique)	C	3.53	2.42	0.044

Des gemmes naturelles "imitent" également le diamant comme le zircon (ZrSiO₄), le quartz, la topaze incolore et d'autres encore.

Identification

Pour identifier les contrevenants du diamant, on effectue une mesure de la densité et de l'indice de réfraction. Or l'indice de réfraction des gemmes artificielles est trop élevé pour être mesuré au moyen d'un réfractomètre classique. On emploie un "gemmeter"¹². On peut aussi évaluer le feu à l'œil, ce qui nécessite une certaine habitude, ou encore estimer les dimensions de la taille : la présence d'une "fenêtre" peut éveiller des soupçons sur l'origine artificielle du contrevenant.

On reconnaît rapidement les diamants par leur réaction au "stylo thermique". Un test favorable ne permet pas de distinguer un diamant naturel d'un diamant synthétique et des pierres artificielles, en particulier des carbures, peuvent être tout aussi réactives au stylo thermique !

Les verres

Les verres sont fabriqués à partir de silice et d'oxydes de sodium ou de potassium ; autrefois, on utilisait des sables riches en feldspath. A cette composition, on ajoute de la chaux (CaO) pour produire des verres au calcium (angl: Crown glasses), ou bien de l'oxyde de plomb pour des verres au plomb (angl: Flint glasses) ou encore de l'acide borique pour des verres au bore.

¹² le gemmeter est un réfractomètre qui utilise des propriétés particulières de réflexion et polarisation de la lumière ainsi qu'un éclairage monochromatique "Rouge" : se référer à des tables appropriées.

D'autres synthèses contiennent du Calcium et du Fer, du Béryllium ou bien du Barium ou d'autres éléments chimiques encore... selon les propriétés physiques et optiques que l'on cherche à obtenir comme, par exemple, des effets d'éclat et de feu particuliers. Rappelons que les verres sont amorphes ; en conséquence, ils sont toujours isotropes.

Notons qu'il existe des verres d'origine naturelle : ceux qu'on utilise en bijouterie sont extraits de basaltes, ou bien ce sont des obsidiennes et des tectites¹³. Il existe également des verres d'origine biochimique trouvés dans des déserts.

Identification des verres

A la loupe :

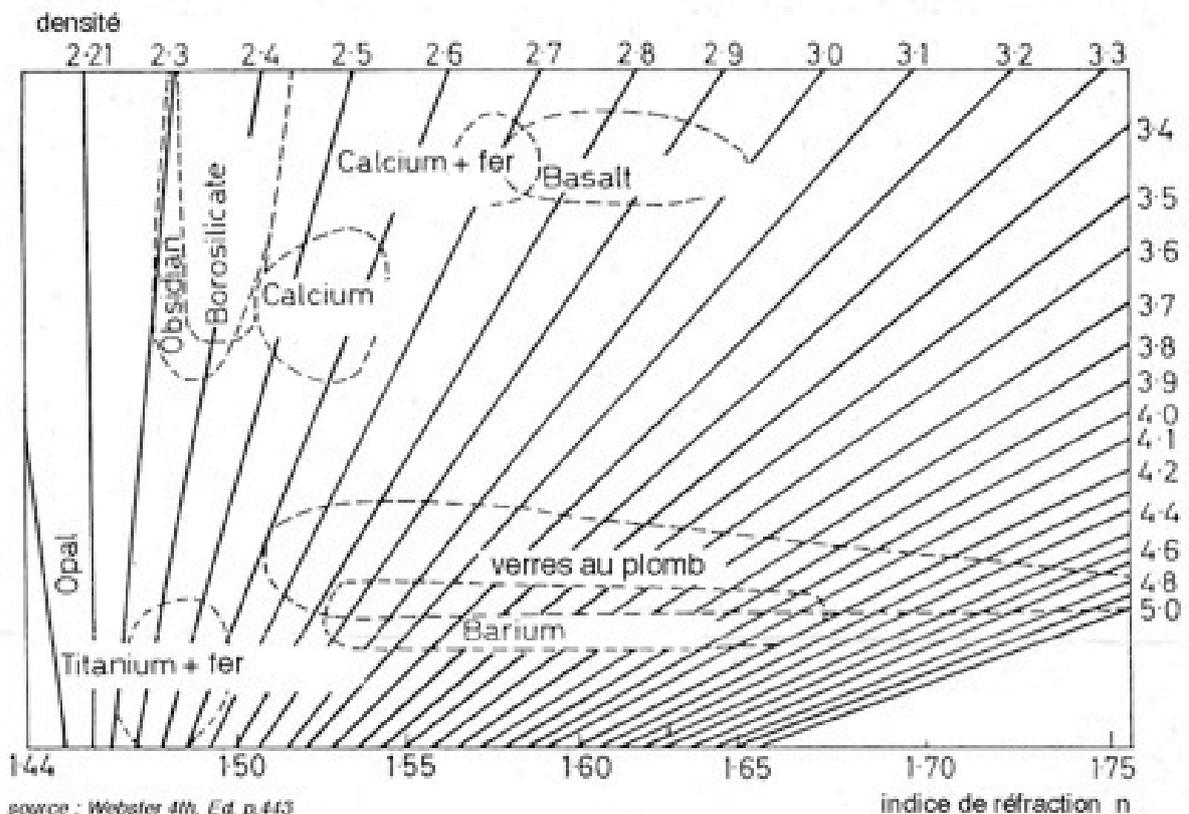
- les verres présentent toujours une cassure conchoïdale ;
- leur aspect : traces de moulure ou des stries d'écoulement visibles sur l'extérieur ;
- présence de bulles et de stries incurvées à l'intérieur du verre ;
- leur dureté étant inférieure à 7, ils sont souvent rayés ou même dépolis par l'usure.

Les verres sont de mauvais conducteurs de chaleur, ce qui fait qu'ils ont une tendance à chauffer facilement ; en maintenant le verre dans le creux de la paume un certain temps, il en prend rapidement la chaleur.

Au laboratoire :

- Malgré leur caractère isotrope, les verres présentent au polariscope une anisotropie anormale ;
- un indice de réfraction entre 1.45 et 1.70 : aucune gemme minérale isotrope ne possède un tel indice.

Table d'identification des verres



¹³ les tectites, d'origine météoritique, sont décrites en détail dans J. Deferne "Les météorites, messagères de l'espace" www.kasuku.ch, 2007.

Au laboratoire, on identifie les verres, substances amorphes toujours isotropes, par les indices de réfraction et les densités. Dans le diagramme ci-après, on lit les densités le long des traits obliques et les indices de réfraction notés en abscisse dans leur prolongement vertical. L'intersection de ces droites imaginaires aboutit à un point qui se situe dans chacun des champs correspondant à des compositions mentionnées ci-dessus.

Les plastiques

On appelle plastique un matériau généralement artificiel constitué de macromolécules ; les macromolécules sont omniprésentes dans la chimie du monde végétal et animal et plusieurs plastiques sont des dérivés de produits naturels (p. ex : le latex - base du caoutchouc, les résines - base des colles, etc.) ; d'autres sont artificiels. Les plastiques, matières plutôt "gluantes", deviennent solides par polymérisation. Au laboratoire, on identifie les verres, substances amorphes toujours isotropes, par les indices de réfraction et les densités. Dans le diagramme ci-après, on lit les densités le long des traits obliques et les indices de réfraction notés en abscisse dans leur prolongement vertical. L'intersection de ces droites imaginaires aboutit à un point qui se situe dans chacun des champs correspondant à des compositions mentionnées ci-dessus.

Les applications des plastiques sont actuellement des plus variées. Ils sont recherchés pour des propriétés spécifiques, et dans bien des domaines (optique, mécanique, usages ménagers etc...), ils ont supplanté les matières minérales. Les plastiques présentent certains inconvénients : ils peuvent se dégrader sous l'effet conjugué d'agents chimiques, de la chaleur et du rayonnement ultraviolet.

En bijouterie, la majeure partie des bijoux vendus dans les magasins " grande surface " sont en plastique. La bakélite, un plastique réputé à l'Epoque "Arts Déco", orne des bijoux ou des objets de ce style ; il a été commercialisé dès 1907. Finalement, en bijouterie contemporaine, on utilise couramment des plastiques comme le nylon, le PET et bien d'autres encore.

Les plastiques imitent toutes les gemmes et en particulier les gemmes d'origine organique : corail, ivoire, l'écaille ou encore le jais qu'ils simulent par leur apparente légèreté. De par sa composition, on peut assimiler aussi l'ambre à un plastique. Il s'agit en effet d'une résine fossilisée d'origine naturelle.

Identification de plastiques

- l'indice de réfraction se situent entre 1.50 et 1.66 (ambre : 1.54) ;
- composés d'un "amalgame" de microcristaux, au polariscope, ils présentent une situation "toujours allumé"
- les densités vont de 1.12 à 1.20 (ambre: 1.08),sauf le polystyrène qui a une densité similaire à l'ambre ;
- les plastiques sont sectiles, c'est-à-dire qu'une fois entamés par la lame d'un couteau, ils se débitent en copeaux ;
- on peut effectuer un test en brûlant un copeau, et on reconnaît le plastique par l'odeur.

L'ambre (une résine fossilisée) est imitée par le copal (une résine durcie seulement), ou par le baume de Canada durci ou encore par un plastique.

Ambre ou copal ? En frottant la surface de la pièce avec une goutte d'éther, le copal a tendance à fondre et à coller aux doigts ; l'ambre résiste à ce test ; à la flamme, les 2 matériaux présenteront le même genre d'odeur de résine.

En dernier lieu, signalons encore des imitations de pierres assez grossières : roches teintées, céramiques, goudrons etc. Elles sont souvent identifiables à vue. Ces bijoux de pacotille font le bonheur des artisans de nos marchés et de nos jeunes clients !

5. Les traitements des gemmes

(angl: enhancement)

Les pierres naturelles sont parfois traitées de manière à améliorer leur qualité et en tirer un meilleur profit. Il est généralement admis qu'il y a fraude lorsque les procédés utilisés produisent une gemme qui serait introuvable dans la nature, et donc il ne peut pas y avoir de doute qu'un traitement a été effectué. Il existe pourtant des exceptions à cette règle : les zircons bleus sont tous des zircons qui ont été chauffés artificiellement ; les **tanzanites** ont toutes été chauffées pour, à partir d'une pierre bleu-vert à brune, obtenir une teinte bleu violacé franc (les gisements n'ont jamais fourni ni de zircons bleus, ni de tanzanites bleues). Finalement, certains traitements sont tellement courants qu'ils sont généralement admis (voir plus bas "l'huilage" des émeraudes).

Quelques traitements fréquents sur des pierres taillées

- **les enrobages** à l'aide de peinture (angl: *dying*) ou de divers papiers : le strass est du verre dont la culasse enrobée de papier ou de peinture argent imite l'éclat du diamant ; la culasse de certains diamants de mauvaise qualité est recouverte d'une peinture bleuâtre de manière à faire disparaître leur nuance naturelle jaunâtre.
- **les traitements de surface** (angl: *coating*) : il s'agit d'une recristallisation artificielle du même minéral en poudre sur la surface de la pierre taillée pour en améliorer la couleur : les émeraudes *Lechleitner*¹⁴ ; des rubis ou saphirs traités sont produits par chauffage dans un four à très haute température de corindons enveloppés de poudre d'alumine (avec adjonction d'un élément chromatophore) et serrés dans un papier d'aluminium.
- **les procédés par chauffage** dans un four (angl: *heating*) : il s'agit de procédés frauduleux courants comme des améthystes chauffées pour obtenir une citrine brunâtre, des aiguemarines ou des topazes bleues chauffées pour renforcer la teinte bleue; on chauffe les saphirs australiens pour éclaircir leur teinte, et les saphirs sri lankais pour les foncer ; les couleurs ainsi obtenues ne supportent pas toujours les rayons UV ; en exposant ces gemmes à la lumière, certains effets de coloration disparaissent avec le temps.
- **les pierres irradiées** (par rayons X, faisceaux d'électrons, neutrons ou autres radiations) : des diamants, pour obtenir une couleur fade bleutée ; des topazes ou aiguemarines pour améliorer leur teinte.
- **huilage** (angl: *oiling*) : les émeraudes sont huilées de manière à cacher des fissures internes à la gemme ; ce procédé très courant est généralement accepté sauf pour ce qui est des émeraudes passées dans une huile de couleur verte dans le but d'accentuer leur couleur verte naturelle.
- **des remplissages divers** (angl: *filling*) ; il s'agit d'introduire à chaud dans les anfractuosités de la gemme, du verre ou une résine synthétique qui va masquer les vides et, si ces matières sont colorées, améliorer la couleur de la gemmes ; des rubis peuvent être infiltrés de verre teinté et des émeraudes de polymères.

- Identifications des traitements

La détection de ces fraudes est parfois difficile surtout si la pierre est sertie. Il s'agit, par une observation minutieuse au microscope souvent sous filtre polaroid et lumière tamisée, de mettre en évidence les différences entre l'intrus (peinture, verre, huile, résine etc.) et la pierre naturelle. D'autres techniques de détection par des rayonnement infrarouges ou UV ne sont possibles que dans un laboratoire spécialisé.

¹⁴ le procédé *Lechleitner* est décrit au paragraphe 2

Traitements de quelques cabochons et de perles

Parmi les contrefaçons courantes : les turquoises fabriquées d'une poudre de ce même minéral agglomérée et compressée dans un bain de colle ; des calcédoines peuvent être teintées, p. ex. en bleu pour imiter le lapis . De nombreux cabochons sont également cirés ou vernis dans le but d'améliorer leur qualité, mais aussi pour les protéger.

On décolore les perles en les trempant dans de l'eau oxygénée ; on noircit des pierres ternes pour obtenir des perles noires par un procédé de chauffage dans du nitrate d'argent.

Diverses améliorations (remplissage, peinture) sont fréquentes pour les jades (néphrite ou jadéite). On enduit les cabochons de résine ou de polystyrène pour masquer les vides. Cette dernière matière, réactive aux rayons infrarouges, est ainsi identifiable. Actuellement, tous les jades sont cirés ce qui leur confère un aspect brillant. Pour des raisons commerciales, il est interdit de colorer l'enduit.

6. Les pierres composées

Avant que les techniques de synthèse ne soient développées et utilisées, on a fréquemment doublé ou même triplé des pierres de manière à augmenter le volume de la pierre taillée.

Voici des exemples de fraudes anciennes :

Quelques doublets



Diamant doublé



Imitation de diamant



Doublet de grenat almandin



Doublet d'émeraude



Rubis doublé

On double en général des pierres dans un but frauduleux, mais aussi dans le but de :

- créer une pierre originale, d'aspect criant parfois, mais parfaitement visible ;
- protéger des matières fragiles, notamment l'opale; une lamelle iridescente est collée sur un support de calcédoine (en général de l' onyx) et recouverte par du cristal-de-roche. Ces triplets sont parfaitement admis et reconnaissables.

Identification

C'est à l'oeil ou à la loupe, par une observation sur la "tranche", qu'on remarque le mieux la fraude. Au microscope, le plan de collage est parfois visible, reconnaissable par des traces de colles ou des bulles ou encore par réflexion de l'éclairage sur le film de colle. Une pierre doublée dans un serti clos est quasi impossible à détecter. En effet, le serti empêche une observation attentive de la tranche de la pierre.

Chapitre 7 : Le marché des gemmes

“Il n’y a pas plus arbitraire que le prix d’une gemme !” Ce sont des mots souvent entendus de clients non connaisseurs. Or, dans sa globalité, le marché des gemmes n’a rien à envier à un autre marché d’une part, et, d’autre part, ses acteurs se conforment à une éthique rigoureuse.

Il est vrai que la valeur d’une pierre précieuse est fluctuante : elle dépend de ses qualités intrinsèques à savoir de sa beauté et de sa rareté. A cela s’ajoute son attrait ainsi que la mode qui sont des critères de l’ordre des sentiments humains. On trouve les critères de “beauté” et de “rareté” dans toutes les étapes de la commercialisation des gemmes, depuis leur vente à la mine jusqu’à l’étal des marchands.

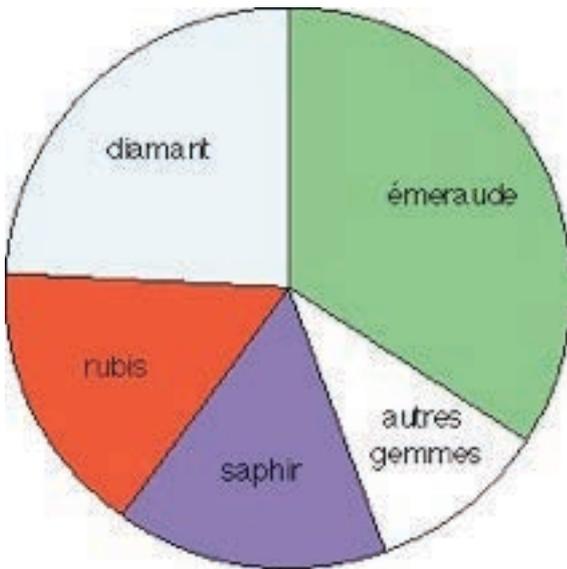
Dans ce chapitre, nous décrivons les grandes lignes des mécanismes qui régulent le commerce des pierres précieuses. Nous ne proposons ici aucune analyse économique sur le sujet bien particulier des produits de luxe dont font partie les gemmes. Nous laissons ce thème à qui se sentirait la vocation de le faire. Les quelques généralités présentées ici sont en revanche tirées de l’expérience. Elles ont pour but de montrer un fait bien connu, que, selon l’époque ou le moment, certaines gemmes peuvent prendre une grande valeur alors que d’autres ne présentent aucun intérêt commercial.

Aucune indication de prix ne sera donnée. Le lecteur trouvera toutefois quelques chiffres qui, présentés dans des tabelles et à titre d’illustration, ne sont que des prix relatifs. Pour plus d’informations, il pourra se référer sur la toile à des catalogues de gemmes proposés par des marchands. Les montants impressionnants des pierres exceptionnelles proviennent des ventes aux Enchères. Ils sont tirés de la Presse.

Pour cette partie commerciale de la gemmologie, on distingue entre le commerce de diamants qui s’effectue par un diamantaire, et le commerce des autres pierres appelées aussi “pierres de couleur”, qui, elles, sont vendues par des lapidaires ou des marchands de minéraux et de gemmes. Pour une bonne part, le marché des diamants est contrôlé par la Diamond Trade Company (DTC) au travers de la Central Selling Organisation (CSO). Ces deux sociétés sont affiliées à la Compagnie De Beers, célèbre producteur de diamants. Le marché des " pierres de couleur " est un marché libre qui fluctue en fonction de l’offre et de la demande du moment.

Quelques aspects du commerce des gemmes ont déjà été évoqués dans le chapitre précédent, lors de la discussion des fraudes. Dans cette suite, nous proposons une vue d’ensemble de ce sujet en mettant l’accent dans le dernier paragraphe sur des directives légales et éthiques diffusées au travers d’Associations professionnelles.

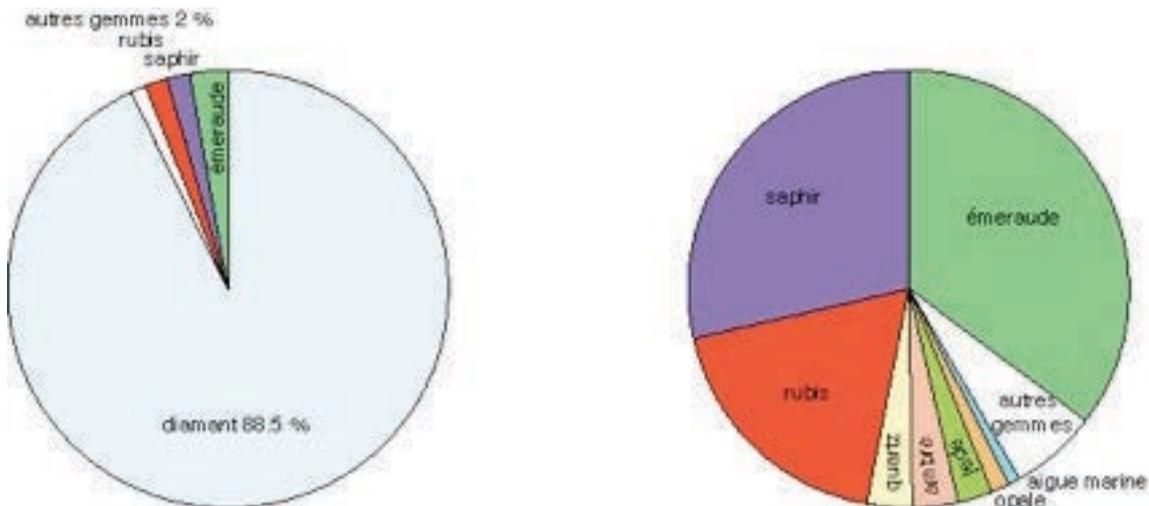
Aperçu historique : l'apparition des gemmes sur nos marchés



On estime que jusqu'en 1700, la production cumulée des diamants ne constituait qu'un quart du volume de la production totale des gemmes. En Europe, la préférence allait aux pierres de couleur, et avant tout à l'émeraude ! En effet et jusqu'en 1900, les marchands écoulaient essentiellement des pierres de couleur pour la bijouterie. Les diamants étaient le plus souvent réservés aux trésors des souverains.

Les améliorations dans l'Art de la Taille ainsi que l'avènement d'une gemmologie scientifique ont accru la confiance des acquéreurs et aussi déprécié les pierres de couleur et remis en valeur le diamant.

Exprimée en volume monétaire, la production totale des diamants jusqu'en 1970 représente plus de 5 sixième de la production totale. Le dernier sixième concerne les pierres de couleur : elles sont détaillées dans le diagramme de droite.



Productions cumulées de gemmes exprimées en proportions d'un "volume monétaire". Selon cette unité, entre 1700 (diagramme du haut) et 1970 (diagrammes du bas), la production totale aurait augmenté 18 fois.

(source : H.-J. Schubnel: Pierres précieuses dans le Monde. ed. Horizons de France. Paris. 1972)

1. L'offre et la demande

L'offre représente la quantité d'une gemme disponible sur le marché : elle dépend principalement des ressources minières et de la vente ou revente de gemmes anciennes. Cette quantité va influencer la "rareté", critère bien connu en gemmologie. **La demande** correspond à ce que les acheteurs désirent acquérir et à quel prix : ce volume fluctue fortement en fonction des modes et des époques. Pour reprendre le propos de l'encadré, autour de 1700 un saphir bleu, très

rare, était plus demandé qu'un diamant fantaisie bleu ou même un diamant incolore ; son prix était supérieur au prix des diamants ; aujourd'hui, sur le marché des pierres de joaillerie, on constate le contraire.

En pratique, lorsqu'on parle d'offre, on comprend l'offre d'un produit, de sa quantité et de son prix disponibles sur le marché à un moment donné : pour les bijoutiers, il s'agit des gemmes mises sur le marché par les marchands et de leurs prix. La **demande** correspond à ce que les clients demandent, i.e. les attentes des bijoutiers et en amont de leurs clients.

L'offre et la demande sont indissociables. Pour les gemmes, en plus, les prix fluctuent en fonction de critères de "beauté"¹⁵ difficilement appréciables : ils sont subjectifs et dépendent des modes. Il y a toutefois des qualités sur lesquelles tous s'accordent, marchands et acquéreurs : le feu et l'éclat des diamants, le rouge à nuance "sang-de-pigeon" des rubis ou le vert inégalable de l'émeraude... De même la magie de la pierre naturelle supplante toutes les fabrications.

Le maintien des prix

Pour les matières premières, denrées alimentaires, minerais et aussi pour les gemmes, les marchands tentent de prévenir les fluctuations de prix sur le marché causées par une grande affluence ou une raréfaction du produit. A cette fin, ils organisent des stocks de manière à pouvoir écouler la marchandise de manière constante à un prix donné. Pour les diamants, dans les années 1992-1993, la CSO (Central Selling Organisation) a imposé une réduction de la production qui, en pratique et pour diverses raisons, n'a pas été réalisable ; en conséquence, la CSO a augmenté son stock de diamants bruts jusqu'à une valeur de plus d'un milliards de US \$ pour parer à une trop grande affluence de diamants sur le marché ce qui aurait occasionné une baisse des prix¹⁶ 28.

Sur un marché libre régi par l'offre et la demande, une situation de concurrence entre marchands permet de maintenir les prix. L'exemple ci-après montre comment au gré de l'offre et de la demande une même pierre précieuse (ou espèce minérale) de la meilleure qualité peut être surestimée ou au contraire dépréciée.

"Dumping" et monopole

Dans un marché libre, il y a une situation de "dumping", lorsque des producteurs tentent de casser les prix en proposant leur marchandise à un prix inférieur au prix courant. Ils ruinent de cette manière leurs concurrents moins prévoyants qu'eux (et moins chanceux) en obtenant "une main mise" sur le marché. Dans les années 1990, des aiguemarines provenant d'Afghanistan affluent en Europe et aux Etats-Unis. Les marchands afghans ont provoqué malgré eux une situation de dumping en offrant la marchandise à moindre prix. Par leur offre, ils ont déstabilisé le marché et imposé une baisse générale du prix de l'aiguemarine à ceux qui pouvaient leur faire concurrence.

Une situation de **monopole** est créée lorsqu'un vendeur possède le droit exclusif de la vente d'un produit, ce qui lui permet d'imposer ses prix. Cette situation est à l'opposé d'un marché libre parce qu'elle supprime toute situation de concurrence. La compagnie De Beers a exercé un monopole sur le diamant jusqu'à l'ouverture des marchés russes dans les années 1990.

¹⁵ la qualité de la beauté d'une gemme taillée transparente dépend de l'éclat, du feu, de sa pureté et de la couleur, de sa profondeur ou son absence de coloration (voir l'Introduction).

¹⁶En effet, en 1992, une production de diamants venant de Russie et d'Afrique occidentale menaçait le monopole de la De Beers (voir plus loin).

Evolution de la valeur d'une gemme sur un marché libre

Prenons l'exemple théorique d'une gemme inconnue que l'on souhaite commercialiser.

Dans un premier temps elle ne suscite aucun intérêt et son prix reste bas, ou alors elle est demandée et son prix est élevé. Nous admettons un prix suffisamment intéressant pour permettre l'exploitation et la commercialisation de la nouvelle gemme:

*Le marché est envahi par cette gemme :
son prix est moyen à élevé*

En conséquence :

*de nombreux marchands
s'y intéressent et
il y a CONCURRENCE.*

*En situation de "marché libre",
le prix tend à diminuer.*

Après quelques années, l'intérêt pour cette gemme diminue, la gemme disparaît du marché, l'exploitation ayant cessé :

*La gemme est oubliée :
le prix est dérisoire*

*la gemme est recherchée :
le prix est exorbitant*

La thésaurisation

Cette action est semblable à "garder un trésor chez soi". Il en résulte un fond caché qui n'est pas évaluable. On thésaurise :

- dans un but d'investissement : l'acheteur attend que les gemmes ou les bijoux prennent de la valeur avant de les revendre ;
- dans un but de valeur refuge : ceci se produit en particulier pour le diamant et l'or en période de crise.

Au cours de l'Histoire, les gemmes ont fait partie des trésors nationaux, et encore aujourd'hui : la Russie possède dans les trésors du Kremlin, entre autres gemmes et bijoux, une importante collection de diamants provenant de Sibérie.

Une part non négligeable des trésors comprend également les bijoux de famille parfois "oubliés" dans des coffres.

2. Le marché des diamants

Les diamants taillés

Les diamants taillés sont évalués en fonction de quatre qualités nommées « 4C ». Seul un professionnel agréé peut estimer un diamant. Dans le métier on parle de diamond grading.

« 4C » signifie :

- "clarity" ou la pureté
 - "color" ou la couleur voire l'absence de couleur pour des diamant incolores
 - "cut" ou la taille
 - "carat" ou le poids de la gemme.
- **la pureté** : pour des diamants de plus de 0.20 ct le diamantaire estime leur degré de pureté en se référant à une échelle. En voici la nomenclature :

Degrés de pureté d'un diamant et nomenclature		
Label	Signification française et anglaise	Description
if	internally flawless aucun défaut	aucun défaut interne à la loupe 10x
vvs	very very small inclusions très, très petites inclusions	minuscules inclusions à peine perceptibles à la loupe 10x
vs	very small inclusions très petites inclusions	très petites inclusions décelables à la loupe 10x
si	Small inclusions petites inclusions	petites inclusions décelables à la loupe 10x
P1	1st piqué premier piqué	inclusions immédiatement décelables à la loupe 10x
P2	2nd piqué deuxième piqué	grandes ou nombreuses inclusions décelables à l'oeil nu et affectant légèrement la brillance.
P3	3rd piqué troisième piqué	inclusions importantes visibles à l'oeil nu, affectant considérablement la brillance.

- **La couleur :** les diamants incolores de plus de 0.20 ct sont classés selon leur couleur ou absence de couleur ; il s'agit d'une échelle extrêmement subtile et seuls des professionnels sont à même de juger de la coloration d'un diamant.

Degrés de coloration d'un diamant et nomenclature		
Label	Signification	Description
D	Blanc exceptionnel (+)	
E	Blanc exceptionnel	
F	Blanc extra (+)	Les diamants appartenant cette catégorie apparaissent blancs à l'oeil nu selon le jugement d'un expert
G	Blanc extra	
H	Blanc	
I	Blanc nuancé	Les diamants de petite taille appartenant à ces catégories apparaissent blancs à l'oeil nu d'un professionnel d'expérience moyenne. La teinte devient visible pour des pierres de poids élevé.
J		
K	Légèrement teinté	
L		
M	Teinté	La couleur croît en intensité
N à Z	Diamants de couleur spéciale	Les diamants d'une belle couleur prononcée sont très rares et très prisés.

Il existe une nomenclature ancienne qui est encore utilisée en bijouterie: un diamant River est de qualité D ou E, Top Wesselton = F ou G, Wesselton = H, Top Crystal = I ou J, Crystal = K. Cette échelle dite "scandinave" est utile pour estimer la coloration des petits diamants de moins de 0.20 ct.

- **La taille :** il s'agit de la forme de la taille, de la régularité des facettes, de la qualité du polissage et de la proportion de la gemme. La forme la plus courante est le brillant, une taille ronde à 57 facettes (32 sur la couronne , 24 sur la culasse en plus de la table)



Mentionnons d'autres tailles : ronde 8/8 ou royale à 144 facettes, navette, poire, ovale ou encore des tailles à gradins rectangulaires ou carrées.

- **Le poids:** la valeur du diamant ou prix au carat augmente en fonction de son poids. Le prix d'un diamant de 5 ct est plus élevé que celui de cinq diamants d'un carat de la même qualité.

On peut estimer le poids d'un brillant. En effet la densité et le rapport des angles du diamant taillé sont les mêmes quelque soit le volume de la pierre et donc le poids peut se calculer par la relation :

$$\text{poids} = (\text{diamètre})^3 \times 0.0036$$

Un acheteur qui désire acquérir un diamant peut se référer à ces échelles, par exemple, en demandant une qualité Dif ou Hif ou Ksi2 etc. En principe, les prix sont fixés selon des tables qui se réfèrent à ces 4 critères de qualité. Ces prix de référence sont toutefois encore modulés en fonction de l'offre et la demande.

Le diamant brut: le monopole de la "De Beers"

Plus des trois quarts de la production mondiale du diamant est vendue au travers de la société De Beers, qui, au travers de la Central Selling Organisation (CSO) et la Diamond Trade Company (DTC) encore aujourd'hui en contrôle la vente. Des diamants provenant des mines d'Afrique, de Russie, d'Australie ... sont acheminés à Londres. Il est de la politique de la Compagnie de mélanger tous les lots de manière à équilibrer les prix malgré les différentes provenances.

L'achat des diamants bruts s'effectue au travers d'environ 150 acheteurs accrédités et assermentés qui sont en contact étroit avec la De Beers. Ainsi la compagnie connaît exactement la demande du marché et peut y suppléer.

Chaque année, la marchandise est présentée aux acheteurs accrédités dans des expositions et ceux-ci sont invités à exprimer leurs vœux d'achat. Ils ont été, auparavant, informés des quantités et qualités des diamants qui seront mis sur le marché.

Lors de ces expo-ventes, les diamants sont assortis en lots par qualité et poids. Des bruts de poids plus élevés que 10.80 cts. (angl: special stones) sont réservés aux gros acheteurs. A la différence des autres lots pour lesquels les prix sont fixés, on admet pour ces gemmes particulières une marge de négociation.

Ce n'est qu'après paiement que le lot est acheminé à l'acheteur accrédité, qui à son tour peut en céder le tout ou une partie à des diamantaires ou à des joailliers.

Parmi les places de vente de diamants bruts, notons les plus importantes : Anvers, New York, Tel Aviv, et Londres. (Source : GAGTL: Diploma Course, chapter 3.)

Le processus de Kimberley

Malgré une éthique et un contrôle importants autour du commerce du diamant brut, on a assisté ces dernières années à des trafics illégaux de diamants. Le film *Diamond Blood* en particulier a relevé les trafics d'armes et la corruption qui règnent autour d'un marché illicite de diamants en Afrique occidentale. Le gouvernement des USA, dans son action contre le terrorisme, a légiféré pour restreindre l'ensemble de ces trafics. Ainsi est entrée en vigueur en janvier 2003 la loi dite du «commerce propre des diamants», votée par le Congrès américain en application d'un accord international conclu en 2002 entre pays importateurs et exportateurs de diamants. Cette loi et ses applications sont connues sous le nom de «Processus de Kimberley». Plus de 50 pays participent au Processus qui permet de vérifier le circuit du diamant depuis son extraction jusqu'au consommateur. La Suisse, comme les autres pays européens, a ratifié cet accord.

3. Les pierres de joaillerie

Pour les «pierres de couleur», le haut de gamme comprend les pierres précieuses comme le rubis, l'émeraude et le saphir et quelques raretés telles l'alexandrite prisée pour ses changements de couleur du rouge au vert, la tourmaline «paraïba» pour sa couleur verte exceptionnelle, ou encore des minéraux extrêmement rares, dont la qualité gemme en fait des curiosités comme la tafféite...

Le marché des pierres de couleur est fortement influencé par l'offre et la demande et les prix fluctuent d'année en année. Rappelons que le prix des pierres de couleur dépend d'une part des critères de beauté et de rareté, d'autre part de la mode et de la demande du moment.

Prix au carat relatifs pour des pierres de la meilleure qualité

Espèce minérale	variété	1 à 2 cts	≤ 5 cts	≤ 10 cts
corindon	rubis	480	800	2'000
	saphir	240	800	800
	saphir jaune	2	644	100
	saphir vert		8	12
	saphir incolore		4	
béryl	émeraude	560		
	aigue-marine			60
	morganite			23
	héliodore			10 à 25
chrysobéryl	alexandrite	380	1000	1'400
	oeil-de-chat	200		260

Dans le tableau ci-dessus sont indiqués des prix relatifs moyens pratiqués à Genève de 1995 à 2006. Dans les moments fastes des années 1970 à 1980, un rubis de la meilleure qualité de 5 à 10 cts valait le double d'un diamant incolore de la meilleure qualité et du même poids. On a ainsi attribué un prix / carat relatif de "2'000" à un rubis de 10 carats. On peut dire que ce rapport pour la période qui nous intéresse a diminué et que la valeur d'un diamant s'est rapprochée de la valeur d'un rubis. Remarquons dans ce tableau qu'une alexandrite vaut plus qu'un saphir et que le prix au carat des "grosses pierres" (plus de 5 ct) est souvent bien plus élevé que celui des "petites pierres".

4. Les pierres exceptionnelles

A Genève, dans les grands hôtels, des ventes aux enchères¹⁷ ont lieu annuellement où sont proposés des spécimens représentatifs du haut de gamme. Ces pierres de la meilleure qualité et souvent d'un poids excédent 10 ct sont authentifiées et certifiées. Certaines sont même pourvues d'un pedigree. Les prix que peuvent atteindre ces pierres exceptionnelles sont énormes ! Il n'est pas possible d'établir une échelle de prix, ceux-ci pouvant varier fortement selon la volonté des acheteurs.

Lors de ces transactions, des diamants de couleur ou **diamant fantaisie** (angl: *fancies*) atteignent des montants astronomiques. Voici des exemples tirés de la presse :

En 1995 une vente aux enchères exceptionnelle a eu lieu à Genève avec la mise à l'encan, entre autres, de la collection de la Begum Salimah Aga Khan. La presse a diffusé les prix suivants:

pour le diamant « Begum Blue » (13,78 ct) inclus dans un collier de diamants, la pièce est partie au prix de 8.8 millions de francs suisses (prix de mise 8.5 Mio CHF),

un diamant bleu de 26,34 ct homologué "Fancy Deep Blue" a été estimé 14 millions de CHF,

un diamant poire de teinte D (16,67 ct): prix 1.98 Mio CHF (soit trois fois la mise).

Quant à l'Ahmadabad, (78,86 ct) qui proviendrait des fameuses mines de Golconde en Inde et aurait appartenu au dernier empereur moghol, son estimation grimpe à 7 millions de francs suisses. Il ne s'est vendu que 4.84 millions CHF !

¹⁷ sources : Michel Bonel, Tribune de Genève 11/12 nov. 1995 & Ph. Meier, NZZ , 18/19 nov. 1995

Finalemant, un diamant rose de 26,34 ct a atteint la valeur de 6.8 Mio CHF, montant qui n'a jamais été atteint pour un diamant de cette couleur.

Les pierres de couleur sont actuellement très prisées. Leur origine géologique influencent leur prix en plus de leur certification et de leur pedigree. Récemment lors d'une vente aux enchères, un saphir certifié Cachemire de 42.25 ct a été vendu à 4.18 millions de francs suisses !

5. Commerce des gemmes : marchés illicites contre éthique

Les marchés illicites

Ce sont des marchés qui échappent aux marchés officiels. La corruption, la fraude fiscale, la contrebande, le blanchiment d'argent et tout trafic sont illégaux et punissables par la Loi.

Comme nous l'avons vu plus haut, le marché des gemmes n'échappe pas à ces intrusions. Le film *Diamond Blood* a en particulier relevé les trafics d'armes et la corruption qui règnent autour d'un trafic de diamants d'Afrique occidentale. La Presse mentionne les marchés illicites, lorsque des personnages importants associés à des réseaux mafieux se font prendre dans les filets de la Justice. Cependant depuis quelques années, dans un public de plus en plus averti, des personnes soucieuses d'intégrité cherchent à se renseigner sur la traçabilité des gemmes qu'elles désirent acquérir.

Conformité

Des Institutions tentent de contenir les marchés illicites. En Suisse, c'est le Département fédéral des Finances qui, au travers du Secrétariat d'Etat à l'Economie (SECO) réglemente le Commerce et dicte les règles relatives au commerce des gemmes. Il appartient à cette Institution de faire appliquer le Processus de Kimberley que la Suisse a ratifié. Les Associations professionnelles de Gemmologie, des Bijoutiers-Joalliers ou des métiers de la Pierre sont dans l'obligation d'informer leurs membres des directives du SECO ainsi que des dispositions générales prévues par la Loi et les juridictions¹⁸.

En plus, des Associations professionnelles Internationales relatives au commerce des gemmes sont les garants d'une éthique rigoureuse :

- le CIBJO ou Confédération internationale de la Bijouterie, Joaillerie, de l'Orfèvrerie, des diamants, pierres, et perles : en accréditant les responsables des commerces et leur imposant ses règles, le CIBJO veut maintenir la confiance sur le marché des gemmes dans l'intérêt de l'ensemble de l'industrie,
- le GIA ou Gemological Institute of America, dont les membres s'engagent à respecter une éthique rigoureuse dans le domaine du commerce et des affaires,
- le GAGTL ou Gemmological Association and Gem Testing Laboratory à Londres dont l'Association professionnelle FGA est garante pour ses membres d'une éthique dans les rapports scientifiques et commerciaux.

Finalemant, signalons que les organisations nationales et internationales de commerce et les instances judiciaires sont actives et collaborent entre elles pour combattre tous les marchés illégaux. De plus, en l'absence de juridiction, des tribunaux peuvent juger une affaire en se référant aux règles émises par des organismes ou des associations de réputation internationale.

¹⁸ La Fédération de l'Industrie horlogère suisse a récemment publié dans sa revue une série d'articles sur les Pierres précieuses : J.-P. Chalain : Les pierres précieuses de A à Z Revue FH 15, 16, 19 et 20, 2005.

Recommandation

Sur les sites Internet des CIBJO et GIA, on peut lire les réglementations qui concernent aussi bien la nomenclature des gemmes, de leurs contrefaçons, avec les appellations d'usage, que les règles éthiques imposées à leurs membres. Il est recommandé de s'y conformer !

Ce chapitre a présenté le commerce des gemmes de manière très synthétique. Je suis consciente de n'avoir qu'esquissé les grandes lignes de ce marché. Cet explicatif bien théorique appelle une mise en pratique. Les praticiens d'ailleurs ne sont pas en manque d'exemples et d'histoires ! Et ils pourront vous les faire partager !

Un gemmologue débutant doit parfois compter plusieurs années d'expérience avant de parvenir à attribuer un prix à une gemme ... dont souvent... un professionnel lui-même n'en a qu'une "idée". Ainsi, dans les certificats de gemmes, il est d'usage de ne pas indiquer de valeur ou de prix. Les prix des gemmes peuvent être mentionnés oralement ou dans une annexe.

Les pierres de couleur atteignent des sommets

Rubis, saphirs et émeraudes suivent les diamants dans leur ascension et bouleversent le marché.

L'escalade des prix a commencé le 15 février 2006 à Saint-Moritz. Un superbe rubis d'un poids de 8,62 carats enchâssé dans une bague Bulgari a été adjugé 4,7 millions de francs. Soit huit fois son estimation!

Malis c'est surtout son prix par carat qui a bouleversé tous les records précédents. A près de 422 000 dollars le carat, il est devenu le vainqueur incontesté de tous ces rubis qui ont subi le feu des enchères depuis deux siècles. Et il a même doublé le précédent record établi par Christie's New York quelques mois auparavant. « Cette escalade des prix en si peu de temps a confirmé que le marché est en pleine ébullition, en particulier pour une pierre précieuse devenue plus rare et donc plus chère que le diamant », affirme Eric Valdeu, chef du Département haute joaillerie et vice-président de Christie's France. En fait, ce sont la plupart des records de pierres précieuses qui ont été pulvérisés en l'espace de quelques mois, jusqu'en octobre 2007.

Le saphir triple en un jour

Au tour des saphirs à présent. En avril dernier, un splendide saphir du Cachemire de 22,86 carats est devenu, à 3 millions de dollars, le saphir le plus cher jamais vendu. Il a surpassé le saphir Rockefeller presque trois fois plus grand qui, avec ses 62,02 carats, était devenu un véritable mythe. Si bien qu'en une journée, le prix des saphirs du Cachemire a triplé, passant de 47 700 dollars à 135 000 dollars par carat.

« C'est un phénomène rassurant pour la profession et pour le marché », commente Eric Valdeu. « Ces pierres incomparables qui avaient été vendues à des marchands pour

Bague couronnée d'une alexandrite, cette pierre qui change de couleur selon qu'elle est exposée à la lumière naturelle ou artificielle. Vendue 999 400 dollars par Christie's New York le 10 octobre 2007. Record mondial.



des prix exceptionnels ont malgré tout rapidement rejoint un acquéreur privé. Conclusion: le marché est sain. « La folie des prix est en fait le reflet de notre époque, de l'argent plus que jamais et une économie internationale en pleine ébullition. »

Émeraude: carat record

Ce sont toutes les pierres de couleur qui flambent. En avril dernier, chez Sotheby's New York, une splendide émeraude de 18,54 carats s'est vendue pour 1 899 000 dollars. Ce qui met le prix par carat à 102 000 dollars environ. La pierre est ainsi devenue la troisième émeraude la plus chère jamais vendue aux enchères.

L'écœurante alexandrite

Une confirmation de cette escalade s'est produite chez Christie's New York le 16 octobre dernier. Une alexandrite de 10,05 carats est elle

aussi devenue à 950 400 dollars l'alexandrite la plus chère jamais vendue aux enchères, pulvérisant de 50% le précédent record datant de 1997. Ce qui met le carat d'alexandrite à 93 362 dollars. Pas mal pour une pierre qui change de couleur en fonction de la lumière!

« Les pierres précieuses ne font que suivre l'évolution du prix des diamants, le vrai leader du marché, dont les prix ont été multipliés par deux ou plus, depuis 2004 », conclut Eric Valdeu. Aussi, les ventes de Genève comprendront de nombreuses pierres de couleur. Chez Christie's mais également chez Sotheby's, confirme David Bennett, président du Département de haute joaillerie de Sotheby's pour l'Europe et le Moyen-Orient. « Le marché est extrêmement fort en ce moment. Et nous présentons aux ventes un beau choix de pierres, propre à satisfaire toutes les exigences. »

M. B.



Ce rubis de 8,62 carats enchâssé sur une bague Bulgari pierre de diamants baguette, a été vendu 4,7 millions de francs le 15 février 2006 par Christie's à Saint-Moritz. Record mondial.

Cette émeraude de 18,54 carats montée sur bague fut vendue 1 899 000 dollars par Sotheby's New York le 24 avril 2007. Elle est la troisième émeraude la plus chère jamais vendue aux enchères.



Bibliographie

- Anderson, Basil W. 1975, *Identification des pierres précieuses*,
Ed. Hugo Buscher, Genève
- Deferne, Jacques et Engel, Nora, 2007 : *Le Monde fascinant des Roches*.
www.kasuku.ch, 2007
- Deferne, Jacques et Engel, Nora, 2007 : *Au coeur des minéraux*. www.kasuku.ch.
- Deferne, Jacques, 1994 : *Le Monde étrange des Atomes*, La Nacelle, Genève.
2^e édition : www.kasuku.ch, 2007
- Deferne, Jacques, 2007 : *La Classification des minéraux*, www.kasuku.ch
- Deferne, Jacques, 2007 : *Introduction à la cristallographie*, www.kasuku.ch
- Deferne, Jacques, 2007 : *La théorie et l'emploi du microscope polarisant*,
www.kasuku.ch
- Engel, Nora et Deferne, Jacques, 2007 : *Le monde merveilleux des pierres précieuses*,
www.kasuku.ch
- Gübelin, Eduard J. et John I. Koivula : *Photoatlas of Inclusions in Gemstones*. ABC Edition
Zürich, 1992.
- Matlin, Antoinette et Bonanno, Antonio C, 1989 : *Gem Identification made easy*.
Gemstone Press, Vermont
- Read, Peter G. : *Gemmological Instruments*, Ed. Newnes-Butterworth, London 1978.
- Schumann, Walter, 2015 : *Guide des pierres précieuses*, Delachaux et Niestlé, Neuchâtel

Philosophie et histoire des récents développements de la géologie :

- Feynmann, Richard, 1999 : *Lumière et matière, une étrange histoire*, Editions du Seuil
- Hallam, Anthony, 1976 : *Une révolution dans les Sciences de la Terre*, éd. le Point.
- Laporte, Léo F., 1976 : *Encounter with the Earth*. Canfield Press, San Francisco
- Maitte, Bernard, 2005 : *La lumière*, le Seuil, Paris.

Table d'identification :

- La "**chart**" du GIA est la plus complète : voir Gemmological Institute of America.
- Gemmes**, fascicule très complet publié, l'Association française de Gemmologie, Paris.