

Quartz α SiO₂: Discrimination des améthystes et citrines naturelles et synthétiques.

Franck NOTARI D.U.G., N.J.A., Pierre-Yves BOILLAT Ing. Dipl. Phys E.P.F.L., Candice GROBON
Laboratoire GEMTECHLAB, Genève

Abstract

L'améthyste et la citrine synthétique sont très présentes sur le marché des gemmes. La spectroscopie infrarouge permet de reconnaître les synthèses issues de germes plats, mais pas celles obtenues à l'aide de germes d'habitats naturels (fig. 12, 12 bis, 23). Elle n'est, de plus, pas une technique accessible à tous. L'observation microscopique des échantillons placés en immersion, entre deux polariseurs croisés reste la technique la plus efficace. Cette méthode nécessite toutefois une bonne compréhension de la structure cristalline du quartz (fig. 1 – 7) afin d'interpréter correctement les figures d'interférence mises en évidence (fig. 21, 22). En effet, certaines figures (rhomboédre mineur des quartz naturels, macles du dauphiné ou figures de stress des quartz naturels et synthétiques) peuvent prêter à confusion. L'observation fine, alliant l'appréhension tridimensionnelle de la structure interne, mise en évidence par ces figures, permet la discrimination des améthystes et citrines naturelles / synthétiques dans la quasi totalité des cas. ± 1 à 3 % des individus nécessiteront l'usage de la spectrométrie infrarouge.

Avant-propos

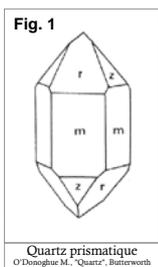
L'améthyste et la citrine synthétiques sont très "présentes" sur le marché des gemmes, et le faible coût de ces matières n'incite pas toujours à les faire vérifier par les laboratoires. Leur reconnaissance ne nécessite pas obligatoirement de faire appel à des techniques d'analyse sophistiquées. L'observation microscopique des figures optiques, tenant compte du contexte cristallographique, permet dans la majorité des cas de les identifier. Quelques cas justifieront le recours à la spectroscopie infrarouge.

Structure du quartz

Le quartz α, dioxyde de silicium (SiO₂), présente une structure dans laquelle chaque atome de silicium est entouré de 4 atomes d'oxygène, avec un angle de 144° entre deux liaisons adjacentes O-Si-O. Ces cinq atomes forment un tétraèdre et la maille élémentaire du cristal est composée de l'association de trois tétraèdres en prisme losangique. Ces tétraèdres SiO₄, reliés par leurs sommets, s'empilent en hélice droite ou gauche selon un axe de symétrie d'ordre 3.

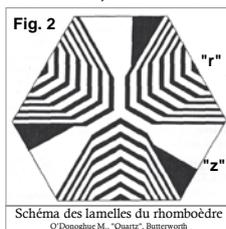
Environnement cristallographique

Le quartz α cristallise dans le système trigonal (ou rhomboédrique), en hémédrisme holoaxe (32). Il présente donc quatre axes de symétrie (un d'ordre 3 et trois d'ordre 2 qui lui sont perpendiculaires et forment entre eux des angles de 120°). Dans ce système, l'axe optique est parallèle à l'axe de symétrie d'ordre 3. Sa forme la plus commune combine le prisme (allongé



parallèlement à l'axe "c"), et le rhomboédre. Ainsi, le cristal présente souvent une (ou deux) terminaison pyramidale (fig. 1) formée par l'association de deux rhomboédres de même inclinaison et tournés de 60° l'un par rapport à l'autre, appelés rhomboédre majeur ou positif (faces "r" (10 $\bar{1}$ 1)) et rhomboédre mineur ou négatif (faces "z" (01 $\bar{1}$ 1)). Le rhomboédre majeur apparaît soit seul, soit avec des faces plus développées que celles du mineur. Fréquemment, de fines stries perpendiculaires à l'allongement du cristal peuvent apparaître sur les faces "m" du prisme (10 $\bar{1}$ 0).

La structure optique des améthystes fut décrite dès 1821 par Sir David Brewster et fut interprétée (Frondel, 1962) comme la résultante de la présence de lamelles alternées de quartz droits "R" (right) et gauches "L" (left). Elles sont arrangées parallèlement aux faces terminales "r" ou "z" (Fig. 2). Elles engendrent une activité optique due au pouvoir rotatoire du cristal, gauche lorsque les hélices de tétraèdres s'enroulent à droite et inversement. Pour voir ces figures d'interférences, il faut que la pierre soit observée avec des polariseurs croisés, parallèlement à son axe optique. Ces macles font que ces lamelles apparaissent en lumière polarisée comme de fines stries, et forment des structures polygonales. Elles donnent une apparence zébrée aux fractures qui les traversent. C'est dans le rhomboédre majeur ("r") que sont présentes ces macles polysynthétiques dites "du Brésil" ou macles optiques, auxquelles peuvent s'ajouter les macles du Dauphiné, alors qu'une seule limite de

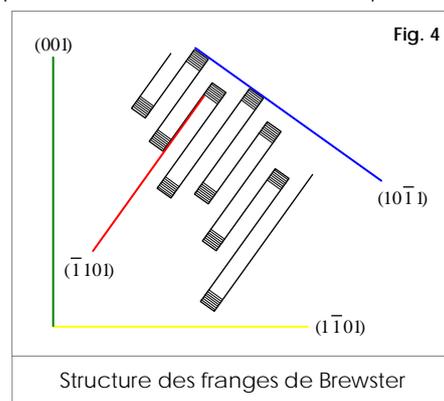


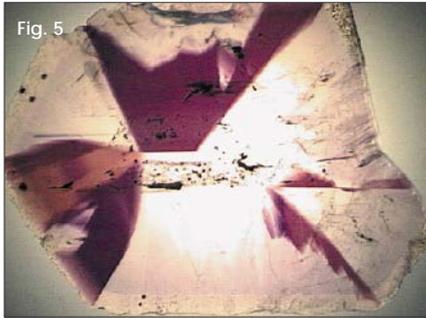
macle (macles "z") est observable dans chaque région "z". Quelques rares cristaux naturels ne présentent pas ces caractéristiques.

Ces lamelles "R" et "L" sont séparées par des bandes d'extinction ou franges de Brewster (Fig. 3), d'environ un tiers de la longueur d'une bande gauche ou droite. A l'observation, dans un liquide d'indice proche ou équivalent, lorsque le polariseur et l'analyseur sont croisés, celles-ci apparaissent comme des franges noires car la lumière qui se déplace selon l'axe optique traverse alors autant de quartz "R" que de "L", et matérialisent ainsi les surfaces continues de jonction des macles polysynthétiques (interpénétration, McLaren & Pitkethly, 1982) (Fig. 4). Ces franges sont donc confinées au rhomboédre majeur. Les citrines naturelles obtenues par chauffage des améthystes, présentent ces mêmes caractéristiques.



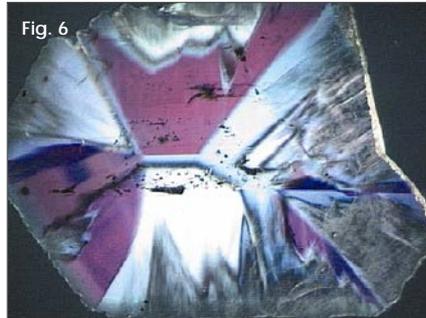
Franges de Brewster





immersion, pol. ⊙, ↻ +- Il c

Tranche d'améthyste, coupée ⊥ à "c", Altiplano bolivien.



immersion, pol. ⊙, ↻ +- Il c

A propos de la couleur

Dans l'améthyste, la couleur violette est due à la présence de Fe^{4+} (par transfert de charge $O^{2-} \rightarrow Fe^{4+}$, Fritsch et Rossman, 1988), en substitution du silicium, et interstitiel (ou dispersé). Ce sont les radiations ionisantes naturelles qui produisent des centres colorés en transformant le Fe^{3+} en Fe^{4+} . On observe que la couleur est souvent concentrée dans les secteurs de croissance "r" et disposée en séries de fines bandes sombres parallèles à "r" et occasionnellement aux faces "z". Cela est confirmé par Schlössin & Lang (1965) qui ont trouvé que c'est dans les franges de Brewster que le fer serait présent de préférence. Pour McLaren & Pitkhetly, (1982), les impuretés de fer sont concentrées, dans les macles du Brésil, le long de l'axe "c". Les clichés ci dessus (fig. 5 et 6) confirment ce fait.

McLaren et Pitkhetly (1982) ainsi que Koivula et Fritsch (1989) proposent que la présence de fer soit la cause de la formation des plans de macles polysynthétiques. Plus précisément, nous pensons que cette formation est directement liée à la quantité de fer présent. Par exemple, les améthystes de couleur pâle comme celles de Vera Cruz, Mexique, sont très souvent dépourvues de macles dans la zone du rhomboèdre majeur ou "r", or leur teneur en fer est proche de celle des rhomboèdres mineurs des améthystes de l'Altiplano, pour une intensité de couleur voisine.

Dans les améthystes synthétiques, la couleur est obtenue en laboratoire par irradiation pour transformer le Fe^{3+} en Fe^{4+} . On observe que les zonations de couleur sont généralement moins marquées, ou n'apparaissent que comme des nuances de violet clair et sombre.

La couleur des citrines peut avoir des causes multiples. Généralement elle est reliée à l'absorption du Fe^{3+} , sous diverses formes. Dans quelques cas, les citrines sont colorées par des défauts cristallins probablement reliés à Al^{3+} avec en général une couleur moins saturée. Pour les citrines issues d'améthystes chauffées, on trouve du Fe^{2+} interstitiel, ou sous forme d'amas, dans lesquels a lieu un transfert de charge $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$. Elles ne sont quasiment plus dichroïques (comm. pers. B. Lasnier, 1996). Dans les citrines synthétiques, on rencontre des particules d'oxydes de fer, du Fe^{3+} interstitiel dans le site $[FeO_4]^-$ et du Fe^{2+} interstitiel.

Chez les améthystes, on observe la couleur améthyste dans le rhomboèdre majeur et la couleur citrine dans le rhomboèdre mineur (plus grande concentration de fer dans les zones jaunes orangées que dans les violettes, Vasconcelos *et al.*, 1994). Il y a vraisemblablement une relation encore inexpliquée entre la présence d'eau et la couleur des améthystes et des citrines. Par exemple elle est présente, de préférence sous forme d'eau moléculaire H_2O , dans les zones citrines et sous forme d'ion OH^- dans les zones améthystes (Aines et Rossman, 1986).

Méthode de reconnaissance

L'observation des figures d'interférences permet de reconnaître efficacement la majorité des améthystes et des citrines naturelles. Ces gemmes sont généralement taillées dans les terminaisons rhomboédriques des cristaux, qui sont les zones les plus colorées. Ces zones présentent les franges de Brewster du rhomboèdre majeur, ou les interférences des zones du "Dauphiné" (macle de 180° par rapport à l'axe "c" de deux quartz gauches ou de deux quartz droits), et celles que l'on rencontre en bordure des

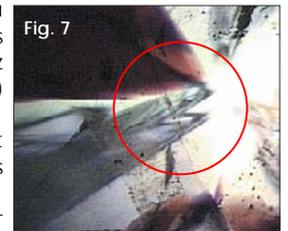
rhomboèdres mineurs. Ces interférences sont dues à un stress mécanique ou à une nucléation indépendante pendant la croissance (ces deux types d'interférences peuvent également être dues à un traitement thermique). Les améthystes et citrines synthétiques produites sur germes plats (croissance en translation avec absence d'alternance rotatoire) ne présentent pas les figures d'interférences du rhomboèdre majeur et très rarement celles de la macle du Dauphiné ou des stress du

Seules les franges de Brewster caractérisent l'origine naturelle des améthystes et des citrines.

rhomboèdre mineur.

Quand ces macles sont présentes dans un quartz synthétique, elles apparaissent alors sous une forme irrégulière, en "pointe de flèche" ou en "flamme", en général unique, simple ou multiple.

Pour Crowningshield *et al.* (1986), c'est l'angle aigu de ces macles qui permet de les distinguer de celles des pierres naturelles qui forment des angles caractéristiques de 60° ou 120° . Cette interprétation est discutable, car certaines figures d'interférences (du rhomboèdre mineur ou des zones du Dauphiné) dans des quartz naturels (Fig. 7) peuvent prendre l'aspect des figures des synthèses, montrées par Crowningshield.



Améthyste, Altiplano bolivien, Interférences du rhomboèdre mineur

Koivula et Fritsch (1989) ont démontré que ces figures de stress sont communes aux améthystes naturelles et synthétiques. Ces figures se distinguent de celles du rhomboèdre majeur par leurs couleurs du premier ordre, mais présentent parfois des couleurs plus vives (ordre supérieur).

Les cas de figure d'améthystes et de citrines naturelles dont le volume s'inscrit uniquement dans les régions du rhomboèdre mineur, non énantiomorphe, sont plus délicats et nécessitent parfois le recours à la spectroscopie infra-rouge "FTIR" ou "DRIFT". Toutefois, on y observe des "franges de formes" (figures d'interférence dépendantes de la taille de la pierre) qui sont bien moins cohérentes et ne montrent pas une déclinaison spectrale aussi

régulière que celles des synthèses (Fig. 8-9) qui présentent un rythme d'étalement des couleurs depuis le centre de la pierre jusqu'à son bord, en épousant assez précisément les contours de ce dernier.

Les clichés ci-contre montrent une améthyste chauffée, dite citrine, taillée dans le rhomboèdre mineur (Fig. 8). Seule une petite figure

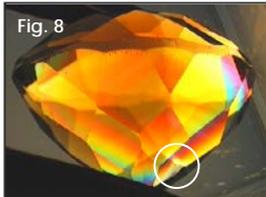


Fig. 8 immersion, pol. λ , ω +- II c Améthyste chauffée, Brésil

d'interférence de stress apparaît. Les "franges de forme" ne sont pas précisément en corrélation avec la taille de la gemme comme le sont celles du quartz synthétique de CEI (Fig. 9).



Fig. 9 immersion, pol. λ , ω +- II c Quartz synthétique, CEI

Synthèse prismatique

En 1994, l'un d'entre nous a obtenu à Moscou des synthèses de quartz, d'un type nouveau à l'époque. Il s'agit de cristaux prismatiques hexagonaux à terminaisons rhomboédriques, formés sur des échantillons naturels en guise de germes. Cela permet la formation de cristaux d'aspect "naturel". Les cristaux d'améthyste, de citrine et d'amétrine mesurent jusqu'à 4 [cm] et sont en général purs sur le dernier tiers (Fig. 10- 10 bis).



Fig. 10 Amétrine synthétique



Fig. 10 bis Citrine synthétique

Les groupes possèdent les suspentes habituelles (Fig. 11- 12).



Fig. 11

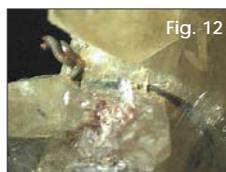


Fig. 12

Suspentes des groupes d'améthyste et de citrine

Le problème du prisme

Contrairement à l'opinion la plus répandue (K. Schmetzer, 1989), l'absence de figures

d'interférences n'indique pas forcément une origine synthétique. Indépendamment des considérations sur le rhomboèdre mineur, les rares améthystes

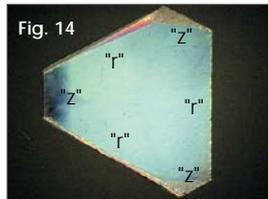
de couleur pâle, taillées dans des cristaux d'habitats prismatiques ne montrent souvent pas de figures d'interférences, et se révèlent alors indistinguables, en observation polarisée, des synthèses à germes plats comme on peut le voir sur ce cliché d'une section d'un cristal d'améthyste de Vera Cruz, Mexique.

Fig. 13



Améthyste, Vera Cruz

Fig. 14



immersion, pol. λ , ω +- II c d'améthyste de Vera Cruz, Mexique.

Figures d'interférences des synthèses prismatiques

En lumière polarisée, leur aspect général est confus, tant au niveau du prisme que du rhomboèdre, contrairement aux quartz naturels et autres synthèses. On n'observe pas de macles polysynthétiques bien définies, mais des macles du Dauphiné et des macles du rhomboèdre mineur (Fig. 15 à 20). Ces deux derniers types de figures peuvent parfois pénétrer considérablement dans la gemme (Fig. 17). Lorsque l'axe d'observation est parfaitement parallèle à "c", on peut observer des zones de couleurs d'interférences en disposition aléatoire. Mais dès que l'on incline l'échantillon de quelques degrés, les interférences présentent alors les couleurs du premier ordre. Ces figures ne correspondent pas à l'aspect de plans de macles polysynthétiques tout au moins dans leur forme linéaire, car l'aspect coloré et ponctuel des zones du rhomboèdre majeur de certains échantillons pourrait laisser supposer un ensemble de micro domaines disposés aléatoirement (effet mosaïque) (Fig. 18 - 20). Dans la zone du rhomboèdre majeur, ces synthèses sont similaires aux cristaux de Vera Cruz, les zones de macles optiques sont visibles en raison de leur coloration, mais sans franges de Brewster

(Fig. 17). On notera que les zones citrines des amétrines ont tendance à former des "patches" et à s'ordonner le long du prisme, selon les faces "r" du rhomboèdre.

Fig. 15 Interférences floconneuses sans micro domaines.



Fig. 16 Macle du Dauphiné en "r" (droite, haut).



Fig. 17 Macle de type Dauphiné dans le rhomboèdre majeur, lequel est dépourvu de franges de Brewster.



Fig. 18 Micro domaines.



Fig. 19 Importantes macles de type Dauphiné, modifiant l'aspect des rhomboèdres majeurs.

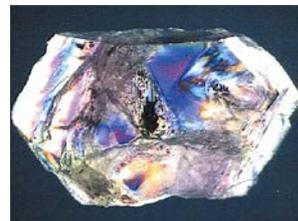


Fig. 19 Micro domaines et macles de type Dauphiné.

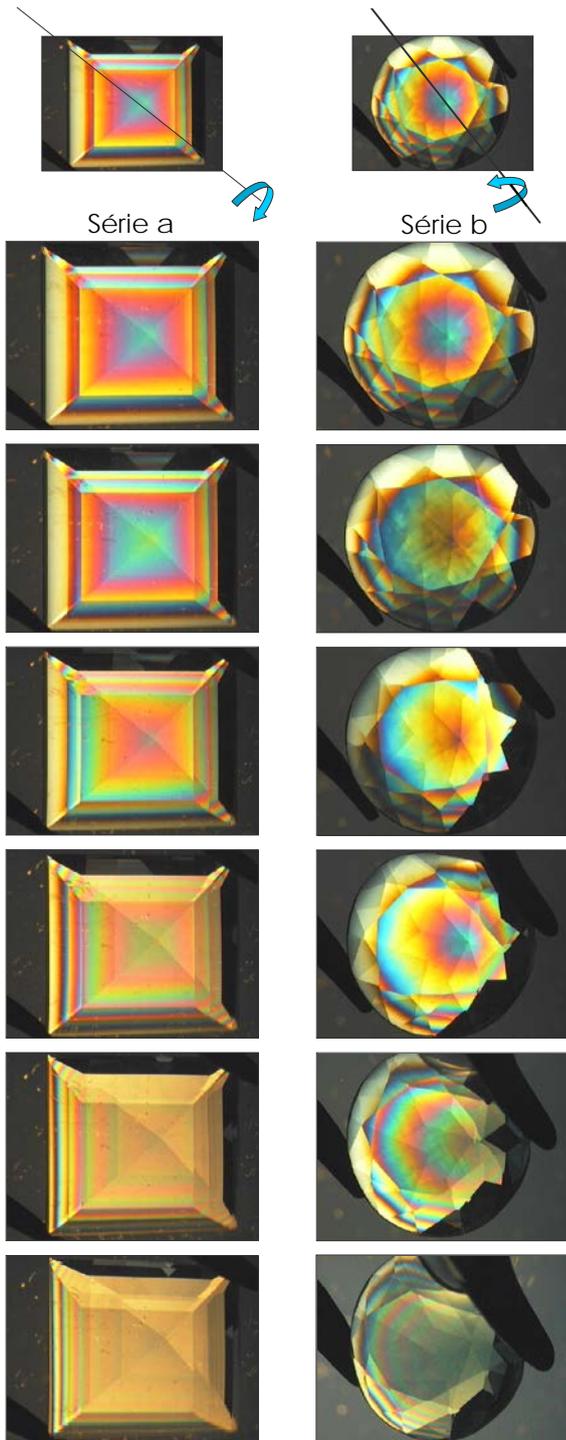


immersion, pol. λ , ω +- II c Synthèses prismatiques

Figures des améthystes et citrines synthétiques

Dans les synthèses à germes plats, on n'observe pas de franges de Brewster, mais uniquement des franges de forme, très colorées, larges et occupant uniformément toute la surface de la gemme. Ces figures épousent exactement les formes de la pierre. Lorsque l'on s'éloigne de l'axe optique, en "tiltant" la pierre, ces figures subsistent longtemps au cours de la rotation. De même, le déplacement des figures n'est pas simultané avec celui de la gemme, elles sont indépendantes, ce qui n'est pas le cas dans le quartz naturel.

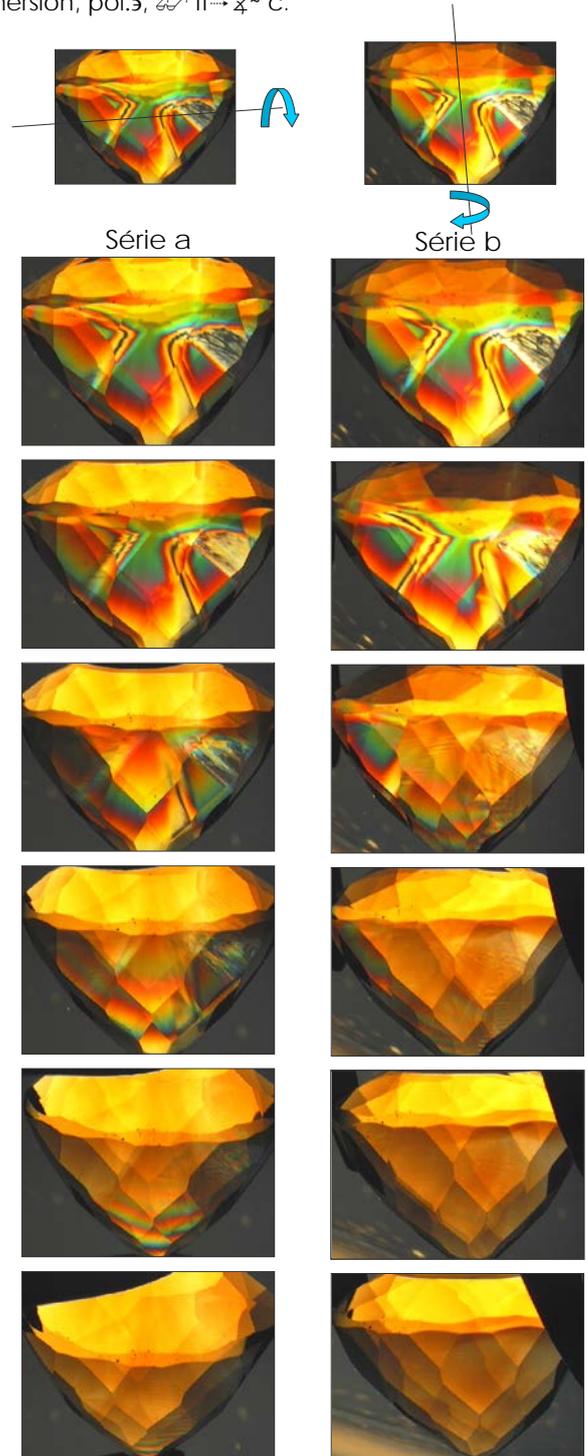
Fig. 21 - a: améthyste synthétique, CEI, b: citrine synthétique, CEI. Immersion, pol.ε, $\omega \parallel \rightarrow \chi \sim c$.



Figures observées dans les améthystes et citrines naturelles

L'évolution des figures d'interférences du quartz naturel se voit clairement, sur deux axes de rotation. Les macles polysynthétiques s'estompent progressivement, sans se déplacer, laissant place à des reliquats "fantômes". Les trois derniers clichés de la série "a" montrent, sur le bas de la pierre, des figures de frange qui peuvent rappeler celles du quartz synthétique. Lors de la rotation de l'échantillon, les "franges de forme" s'estompent plus rapidement que dans les quartz synthétiques.

Fig. 22 - a et b: Améthyste naturelle chauffée dite citrine, Brésil. Immersion, pol.ε, $\omega \parallel \rightarrow \chi \sim c$.



Considérations sur la spectrométrie infrarouge du quartz: formes naturelles - synthétiques

La spectrométrie infrarouge est une technique appropriée pour aider à la distinction entre quartz naturels et synthétiques issus de germes plats (Zecchini et Smaali, 1999). Mais avant de traiter des critères utilisés, il est bon de rappeler brièvement quelques généralités sur cette technique et sur l'origine physique des pics et bandes observés dans un spectre infrarouge de quartz.

La spectrométrie infrarouge est une spectroscopie vibrationnelle, qui met en jeu des transitions entre différents états moléculaires. Nous sommes en présence de l'interaction entre une onde électromagnétique (en l'occurrence le faisceau infrarouge) et les différentes molécules, qui vibrent, de l'échantillon étudié. L'absorption infrarouge peut être comprise à l'aide du modèle dipolaire dans lequel, de façon simplifiée, la molécule possède un moment dipolaire – créé par les "centres de gravité" différents pour les charges négatives (électrons) et positives (noyau) – ayant des fréquences propres de vibration. Si la fréquence de l'onde incidente (faisceau infrarouge) est égale à celle d'une vibration du matériau, l'onde incidente est absorbée. On obtient ainsi un spectre dit d'absorbance montrant des maxima correspondant aux énergies des vibrations des molécules présentes dans le matériau, en l'occurrence le quartz.

L'analyse des vibrations du réseau dans le quartz montre, globalement, que les bandes d'absorption les plus fortes, qui se situent approximativement entre 950 et 1200 $[\text{cm}^{-1}]$, peuvent être attribuées aux vibrations antisymétriques d'étirement ("stretching vibrations") des liaisons Si-O-Si et Si-O (Al ou Li). Quant à la deuxième région de plus forte absorption, qui s'étend habituellement de 400 à 550 $[\text{cm}^{-1}]$, elle s'explique par des "flexions" ("bending vibrations") de la molécule O-Si-O. Ces vibrations sont communes à tous les quartz, elles ne sont donc pas d'une grande utilité pour résoudre notre problème. Par contre, dans les quartz naturels et synthétiques, on retrouve une proportion variable de molécules SiOH, d'ions OH⁻ et d'eau associés avec des métaux alcalins, ainsi que des atomes d'aluminium se substituant parfois au

silicium. Ces diverses configurations vont donner lieu à des absorptions distinctes entre 3000 et 3700 $[\text{cm}^{-1}]$ (Bambauer *et al.* 1969), qui vont alors nous permettre de différencier les cas.

P. Zecchini et M. Smaali ont proposé les critères exposés plus loin permettant de déterminer l'origine naturelle ou synthétique des quartz. Il faut toutefois noter que les spectres d'une même variété, par exemple améthyste, peuvent différer d'un échantillon à l'autre. Ces différences s'expliquent par des effets d'orientations du faisceau par rapport à l'échantillon, et probablement par de légères variations dans la composition chimique des échantillons étudiés (teneurs en eau, en alcalins et en fer). Les critères suivants se rapportent donc à des spectres infrarouges typiques d'une variété (citrine naturelle, synthétique), sans que ceux-ci soient toujours parfaitement reproductibles.

P. Zecchini et M. Smaali ont publié les résultats principaux suivants:

- L'absorption à 3595 $[\text{cm}^{-1}]$ a été observée dans la majorité des quartz naturels de toutes couleurs.
- Dans le cas de l'améthyste, le triplet formé par les absorptions à 3585, 3595, 3612 $[\text{cm}^{-1}]$ est caractéristique des variétés naturelles.
- Dans le cas de l'améthyste, l'absorption à 3542 $[\text{cm}^{-1}]$ est observée dans les variétés synthétiques (→ solution fortement alcaline lors de la synthèse).
- Si l'absorption est totale dès 3600 $[\text{cm}^{-1}]$, une reprise très nette de la transmission vers 3000 $[\text{cm}^{-1}]$ indique une origine naturelle pour les améthystes et citrines (le contraire indiquant une origine synthétique).

Cette étude a été réalisée sur des quartz naturels et des quartz synthétiques issus de germes plats. Remarquons que le pic à 3542 $[\text{cm}^{-1}]$ a été trouvé dans des améthystes naturelles (comm. pers. Prof. E. Fritsch, 2000).

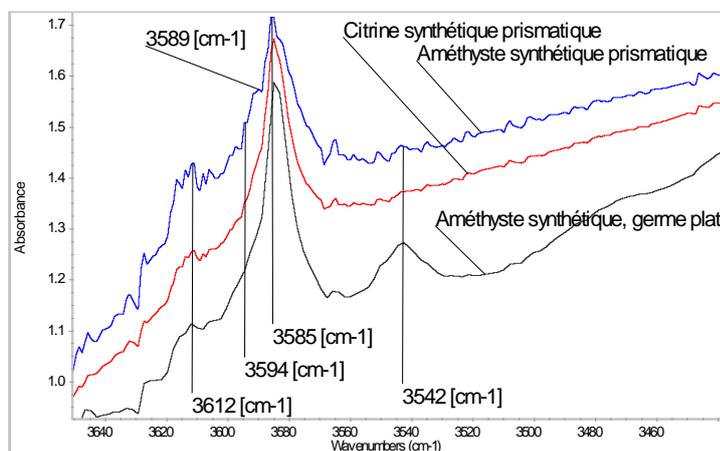
Spectres infrarouges des synthèses "prismatiques"

Nous avons effectué les analyses sur 15 échantillons de quartz synthétique "prismatiques", variétés: améthyste, citrine et amétrine. Les pierres ont été taillées en lames minces, perpendiculairement à l'axe "c", dans la partie synthétique; les spectres effectués en transmission sont représentatifs du rayon ω . Ceux-ci ont été réalisés à température ambiante sur un spectromètre Nicolet Magna 560, avec une résolution de 2 $[\text{cm}^{-1}]$, et 200 scans.

Ci-dessous, nous présentons un agrandissement des spectres infrarouges d'une améthyste et d'une citrine synthétiques "prismatiques", ainsi que d'une améthyste synthétique à germe plat. Ces trois spectres présentent des différences, relevées ici :

- Le pic d'absorption à 3542 $[\text{cm}^{-1}]$, présent généralement dans les synthèses violettes issues de germes plats, n'existe pas dans les synthèses "prismatiques".
- L'agrandissement du spectre montre que l'améthyste synthétique "prismatique" présente un pic (épaule) à 3589 $[\text{cm}^{-1}]$, inexistant dans les améthystes synthétiques issues de germes plats et dans les naturelles.
- Le triplet à 3585, 3595 et 3612 $[\text{cm}^{-1}]$, jusqu'à présent caractéristique des variétés naturelles d'améthyste (Zecchini et Smaali, 1999), se retrouve dans les améthystes synthétiques "prismatiques".

Ces différences soulignent le caractère nouveau de ces synthèses de type "prismatique", dont les caractéristiques analytiques diffèrent de celles des quartz synthétiques les plus courants sur le marché.



Exemples de figures d'interférences

Fig. 24 - Améthystes naturelles, Brésil
Différents aspects des figures
d'interférences des macles optiques
(rhomboédre majeur).
immersion, pol. λ , $\lambda/4 \pm$ II c.

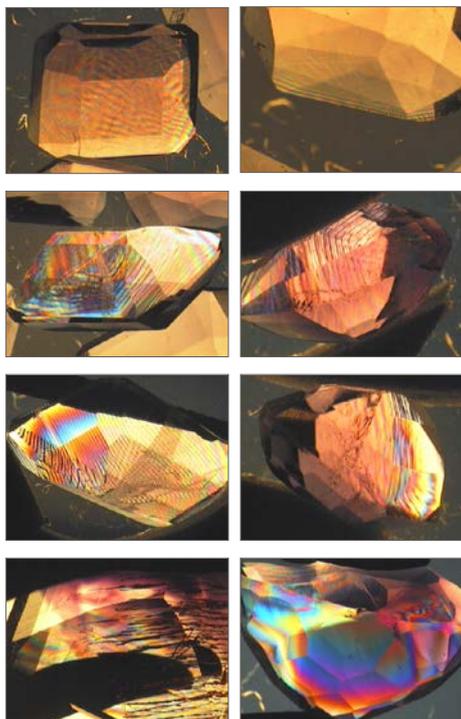


Fig. 25 - Citrine synthétique,
CEI, 1986
immersion,
pol. λ , $\lambda/4 \pm$ II c.

Interférences
caractéristiques.



Fig. 26 - Citrine
synthétique,
CEI, 1986
immersion,
pol. λ , $\lambda/4 \pm$ II c.

Idem.

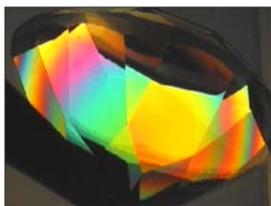


Fig. 27 - Citrine
synthétique,
CEI, 1986
immersion,
pol. λ , $\lambda/4 \pm$ II c.
Effet "flamé"
Peut se
confondre
avec des
figures de quartz naturel prismatique.

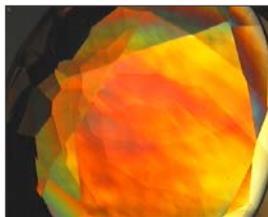
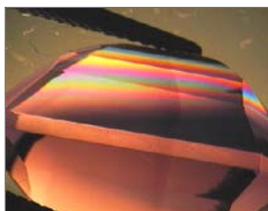


Fig. 28
Améthyste
synthétique,
Japon 1988.
immersion,
pol. λ , $\lambda/4 \pm$ II c.

Interférences
atypiques.



Conclusions

Les améthystes et citrines synthétiques sont courantes dans le commerce des pierres, aussi il est intéressant de proposer des critères permettant de les différencier rapidement et efficacement des naturelles.

Cette étude a présenté les deux méthodes principales, aboutissant à des critères de distinction valables:

- La méthode microscopique, en immersion, entre polariseurs croisés.

Cette technique nécessite la prise en compte de critères cristallographiques, cela est parfois délicat à mettre en œuvre, et implique une méthodologie précise. Par contre, elle ne requiert pas d'appareils onéreux. C'est certainement la méthode la plus efficace et la plus rapide.

- La méthode spectroscopique, en infrarouge (FTIR).

Cette méthode est utile, mais les critères méritent d'être développés, et les résultats sont à interpréter avec précaution. Preuve en sont les spectres infrarouges réalisés sur les synthèses de quartz "prismatique", qui remettent partiellement en question les critères de distinction jusqu'ici connus pour les formes naturelles et synthétiques. Il serait bon de réaliser une étude systématique sur des populations d'échantillons d'origine connue, avec spectres infrarouges orientés, de résolution élevée.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier vivement pour leur aide attentive:

Monsieur Emmanuel **Fritsch**,
Professeur à l'Université de Nantes,
Monsieur Bernard **Lasnier**,
Professeur à l'Université de Nantes,
Monsieur Bernard **Clavel**, géologue,
Université Claude Bernard, Lyon,
Monsieur Jean-Marie **Boccard**,
gémologue F.G.A., Genève.

Laboratoire GEMTECHLAB
2, rue de Chantepoulet
CH - 1201 GENEVE, SUISSE
Tél.: +4122 731 58 80
Fax: +4122 732 56 61
e-mail: gemtechlab@bluewin.ch

Crédit photographique: GEMTECHLAB, 1999
22 mai 2000

Bibliographie

- **Balitsky V.S., Lu T., Rossman G.R., Makhina I.B., Mar'in A.A., Shigley J.E., Elen S., Dorogovin B.A.** (1999), *Russian Synthetic Ametrine*, *Gems & Gemology*, Summer 1999, pp 122-134.
- **Bambauer H.U., Brunner G.O., Laves F.** (1969), *Light scattering of heat-treated quartz in relation to hydrogen-containing defects*, *Am. Miner.*, 54, 718-724.
- **Bariand P., Cesbron F., Geoffroy J.** (1977), *Les minéraux, leurs gisements, leurs associations*, Ed. BRGM.
- **Bétektine A.** (1968), *Manuel de Minéralogie Descriptive*, 3ème édition, Ed. Mir, Moscou, URSS, pp 352 - 355.
- **Crowingshield R., Hurlbut C., Fryer C.W.** (1986), *A simple procedure to separate natural from synthetic amethyst on the basis of twinning*, *Gems & Gemology*, Fall 1986, pp 130-9.
- **Fritsch E., Rossman G.R.** (1988), *An update on color in gems. Part 2: colors involving multiple atoms and color centers*, *Gems and Gemology*, Spring 1988, pp 3-15.
- **Frondele C.** (1962), *Dana's System of Mineralogy*, Vol. 3, *Silica minerals*, J. Wiley, New York, USA.
- **Heaney P.J., Prewitt C.T., Gibbs G.V.** (1994), *Silica: physical behavior, geochemistry and materials applications*, *Reviews in Mineralogy*, Vol. 29, Washington D.C., USA.
- **Kiefert L., Schmetzer K.** (1991), *The microscopic determination of structural properties for the characterization of optical uniaxial natural and synthetic gemstones. Part 3: Examples for the applicability of structural features for the distinction of natural and synthetic sapphire, ruby, amethyst and citrine.*, *J. Gemm.*, 22, pp 471-482.
- **Koivula J.L., g E.** (1989), *The growth of brazil twinned synthetic quartz and the potential for synthetic amethyst twinned on the Brazil law*, *Gems & Gemology*, Fall 1989, pp 159-164.
- **McLaren A.C., Pitkethly D.R.** (1982), *The twinning microstructure and growth of amethyst quartz*, *Physics and Chemistry of Minerals*, 8, pp 128-135.
- **Meisser Nicolas, Meisser-Isernring Patricia, Ansermet Stefan.** (1997), *Cristal de roche*, Musée Cantonal de Géologie, Lausanne, Suisse, pp 18, 34.
- **Moenke H.H.W.** (1974), *The Infrared Spectra of Minerals*, Ed. Farmer V.C., London, 1974.
- **O'Donoghue M.** (1987), *Quartz*, Butterworth Gem Books, London, England, pp 09-13.
- **Schlossin H.H., Lang A.R.** (1965), *A study of repeated twinning, lattice imperfections and impurity distribution in amethyst*, *Phil. Mag.*, 12, pp 283-296.
- **Schmetzer K.** (1987), *Microscopic observation of twinning microstructure in natural amethyst*, *N. Jb. Miner. Mh.*, 1987, pp 8-15.
- **Schmetzer K.** (1989), *Methods for the distinction of natural and synthetic citrine and prasiolite*, *J. Gemm.*, 21, pp 368-391.
- **Vasconcelos P.M., Wenk H.-R., Rossman G.R.** (1994), *The Anahi Ametrine Mine, Bolivia*, *Gems & Gemology*, Spring 1994, pp 4-23.
- **Zecchini P., Smaali M.** (1999), *Identification de l'origine naturelle ou artificielle des quartz*, *Revue de Gemmologie A.F.G.*, n°138/139, décembre 1999, pp 74-83.