

Les Grenats Gemmes

Henry A. Hänni, SSEF Institut Suisse de Gemmologie, Bâle

Introduction

Le groupe des grenats est constitué d'une grande variété de minéraux répondants tous au nom générique de grenat. Pyrope, almandin, spessartite, grossulaire, andradite, etc. sont les pôles purs de ce groupe. Certains

Structure cristallographique des grenats

Chaque minéral est caractérisé par sa structure cristalline (structure atomique) et sa composition chimique (composition atomique). Les éléments constitutifs sont les ions occupant les différents sites dans le réseau cristal-



Figure 1 : Différents grenats gemmes taillés. Parmi ces grenats, on retrouvera: trois démantoides, deux tsavolites, trois grossulaires (jaune, incolore et vert clair), deux spessartites, quatre pyrope almandin, deux grossularites (rouge et vert), un almandin astérisé. Le grenat andradite brun irisé à gauche mesure environ 2 cm. (Photo © H.A. Hänni)

membres du groupe peuvent se mélanger entre eux d'autres non. En gemmologie, on retiendra surtout deux séries miscibles. Les pôles purs et les séries continues forment un ensemble très divers. La diversité de leur couleur sera appréciée des gemmologues. De plus, les grenats sont tenaces et aucun traitement n'est connu pour en modifier la pureté ou la couleur, voici des atouts qui font des grenats un groupe de minéraux extrêmement intéressant.

lin. Durant la cristallisation, les ions s'ordonnent de manière à former la structure de grenat qui présente ainsi la symétrie cubique du minéral. Bien que tous les grenats présentent la même structure cristalline, celle-ci peut être constituée de différents atomes pourtant similaires. Ceci explique la grande diversité du groupe des grenats (*figure 1*).

Si l'on cherche à établir les points communs entre les différents types de grenats, on remarque en plus d'une structure cristalline

uniforme une « parenté » chimique des ions constitutifs, pour construire la maille cristalline et par conséquent le réseau cristallin. En effet, la structure unitaire des grenats est constituée de :

- 3 ions métalliques divalents (Mg^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , etc.)
- 2 ions métalliques trivalents (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , etc.)
- et 3 groupes constitutifs: SiO_4 (ou Si_3O_{12}) pour les grenats gemmes.

L'ensemble est schématisé sur *la figure 2*.

A cause de l'encombrement ionique du calcium (Ca) qui forme des minéraux dont la maille est à peu près 12.00 Angström (Å), la série des grenats calciques n'est pas miscible avec la série alumineuse dont la maille n'est que de 11.55 Å en moyenne. (*Voir tableau 1*)

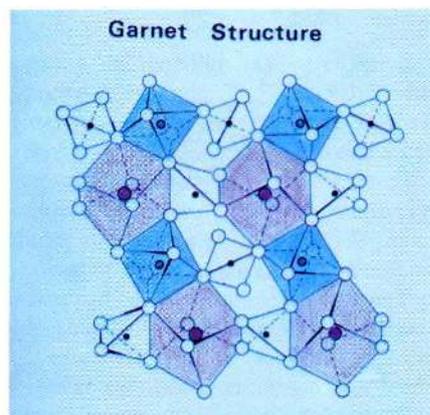


Figure 2 : Structure schématique du grenat. Le site cubique (en rose) est occupé par les ions métalliques divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , etc.) entourés de huit oxygènes, le site octaédrique (en bleu) peut être occupé par les ions métalliques trivalents (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , etc.) entourés de six oxygènes et le centre des tétraèdres est occupé - dans le cas des grenats gemmes - par des ions Si^{4+} entourés de quatre oxygènes. (Photo © H.A. Hänni)

1 - ENCOMBREMENT IONIQUE RELATIF À LA STRUCTURE DES GRENATS

Nom	Formule	Rayon ionique du métal divalent	Rayon ionique du métal trivalent	Dimension de la maille cristalline (a ₀)
Pyrope	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	Mg^{2+} : 0.66 Å	Al^{3+} : 0.51 Å	11.46 Å
Almandin	$Fe_3Al_2(SiO_4)_3$	Fe^{2+} : 0.74 Å	Al^{3+} : 0.51 Å	11.53 Å
spessartite	$Mn_3Al_2(SiO_4)_3$	Mn^{2+} : 0.80 Å	Al^{3+} : 0.51 Å	11.62 Å
Knorringite	$Mg_3Cr_2(SiO_4)_3$	Mg^{2+} : 0.66 Å	Al^{3+} : 0.51 Å	11.62 Å
Grossulaire	$Ca_3Al_2(SiO_4)_3$	Ca^{2+} : 0.99 Å	Al^{3+} : 0.51 Å	11.85 Å
Hydrogrossulaire	$Ca_3Al_2(SiO_4)_2(OH)_4$	Ca^{2+} : 0.99 Å	Al^{3+} : 0.51 Å	12.00 Å
Andradite	$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3$	Ca^{2+} : 0.99 Å	Fe^{3+} : 0.63 Å	12.05 Å
Uvarovite	$Ca_3Cr_2(SiO_4)_3$	Ca^{2+} : 0.99 Å	Cr^{3+} : 0.63 Å	12.00 Å
Goldmanite	$Ca_3V_2(SiO_4)_3$	Ca^{2+} : 0.99 Å	V^{3+} : 0.74 Å	12.07 Å

Les principaux pôles purs des grenats gemmes

Les pôles purs sont des minéraux dont la formule chimique correspond exactement à une formule chimique théorique. Il est très rare de trouver dans la nature de tels échantillons minéralogiques. Chaque pôle pur possède une couleur typique (minéral idiochromatique) ou est incolore.

2 - COMPOSITION CHIMIQUE ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE QUELQUES GRENATS GEMMES

Pôle pur	Composition	Couleur	Indice de réfraction	Densité	Dureté
Pyrope	Mg ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	incolore	1.714	3.582	7 1/4
Almandin	Fe ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	rouge très foncé	1.830	4.318	7 1/2
Spessartite	Mn ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	jaune-orange	1.800	4.190	7 1/4
Grossulaire	Ca ₃ Al ₂ Si ₃ O ₁₂	incolore	1.734	3.594	7 1/4
Hydrogrossulaire	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₂ (OH) ₄	incolore	1.675	3.130	7
Andradite	Ca ₃ Fe ₂ Si ₃ O ₁₂	jaune-vert	1.887	3.859	6 1/2
Uvarovite	Ca ₃ Cr ₂ Si ₃ O ₁₂	vert-noir	1.860	3.900	7 1/2
Goldmanite	Ca ₃ V ₂ (SiO ₄) ₃	vert	1.834	3.765	nc
Knorringite	Mg ₃ Cr ₂ (SiO ₄) ₃	vert/(rouge)	1.875	3.835	nc

Le pôle pur du knorringite est vert, mais devient rouge en solution solide avec le pyrope

Lors de la cristallisation si divers ions aux dimensions compatibles sont disponibles le minéral formé s'écarte du pôle pur pour donner un grenat de type intermédiaire. Sa couleur finale sera alors intermédiaire entre les couleurs des pôles purs constitutifs. L'ensemble créé par la variance des différentes proportions de chaque pôle pur forme une série continue.

Les pôles purs les plus communs en gemmologie sont le pyrope, l'almandin, le spessartite, le grossulaire, l'hydrogrossulaire, l'andradite, l'uvarovite, le goldmanite et la knorringite. Certaines de leurs propriétés physiques sont résumées dans le tableau 2.

En plus des pôles purs cités précédemment, d'autres types de grenats existent. En effet, d'autres éléments chimiques peuvent s'incorporer dans la formule chimique générale des grenats. Ainsi, les grenats dont la charpente n'est pas silicatée sont préparés synthétiquement et utilisés en tant que substitut du diamant. Par exemple: YAG (Y₃Al₂Al₃O₁₂) et GGG (Gd₃Ga₂Ga₃O₁₂).

La formation des solutions solides

Les cristaux naturels sont donc le plus souvent des membres intermédiaires entre les principaux pôles purs cités plus haut. En gemmologie, on peut diviser le groupe des grenats en deux sous-groupes distincts; ceux-ci sont désignés par les premières lettres de chaque minéral affilié. Ainsi le groupe pyralpsite (série riche en aluminium) est constituée des grenats pyrope, almandin et spessartite. Le

correspondants. Pyrope et almandin sont (pour chaque rapport) miscibles entre eux. Ils constituent une série isomorphique. Ici, le membre de la série n'est constitué que de deux composants, c'est-à-dire des molécules de pyrope et d'almandin.

La plupart des grenats naturels sont les membres d'une série dite solution solide, constitués de deux ou plusieurs pôles purs (rapport variable). On a constaté que les grenats du groupe pyralpsite possédaient une miscibilité complète entre eux.

De même, les grenats du groupe ugrandite (série calcique) avec leur maille plus grande

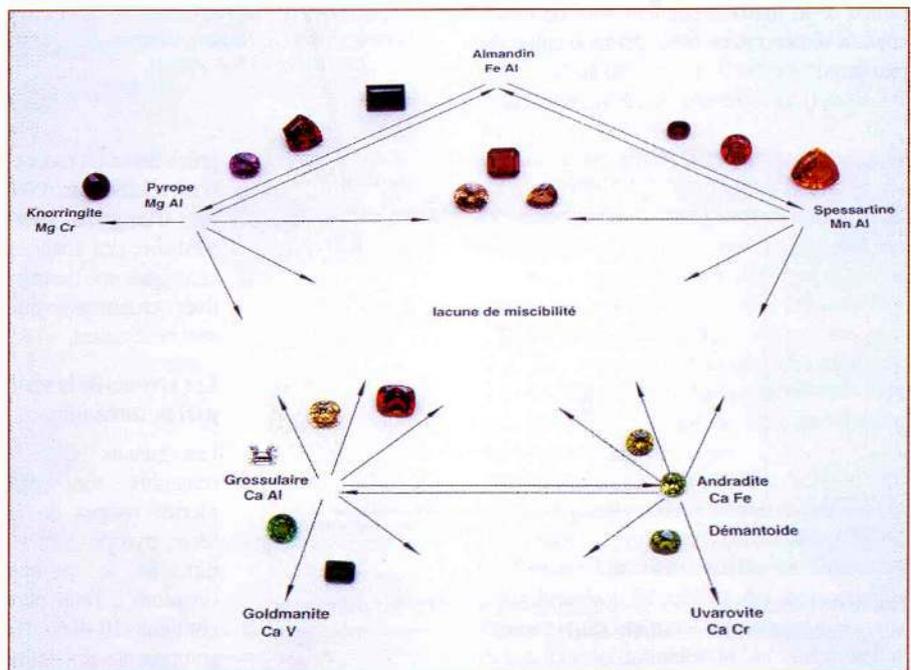


Figure 3 : Schématisation de la miscibilité des membres de la série pyralpsite (en haut), des membres de la série ugrandite (en bas) et de la lacune de miscibilité entre les deux séries. (Photo © H.A. Hänni)

groupe ugrandite est formé des grenats uvarovite, grossulaire et andradite (série calcique). Durant la cristallisation des grenats naturels, différents ions bivalents et trivalents sont à disposition. Par exemple, un grenat naturel incorporera Mg²⁺ et Fe²⁺ simultanément. Des molécules de pyrope et d'almandin sont créées parallèlement. Il se forme ce que l'on appelle un membre d'une série, dont la composition chimique se situe entre les deux pôles purs

sont facilement miscibles entre eux. Par contre, il n'existe aucune série isomorphique complète entre les deux groupes, les mailles de leur minéraux respectifs sont trop différentes. Les intervalles où manquent les membres intermédiaires sont appelés « lacunes de miscibilité ».

La figure 3 schématise les possibilités de miscibilité entre les plus importants types de grenats. La longueur de chaque flèche renseigne

sur le taux de miscibilité. Les mélanges de grenats composés de trois ou plusieurs pôles purs (comme on en trouve souvent dans la nature) ne peuvent pas être représentés de cette manière.

La figure 4 établit la relation entre l'indice de réfraction, la densité et les proportions relatives de pyrope et d'almandin dans la série pyrope almandin. Les valeurs obtenues pour les membres d'une série se situent entre les valeurs extrêmes des pôles purs. Les membres sont en général, du point de vue optique, homogènes ; on peut les comparer à des solutions solidifiées. La pierre située au milieu de la figure 4 contient 40% de molécules d'almandin et 60% de molécules de pyrope.

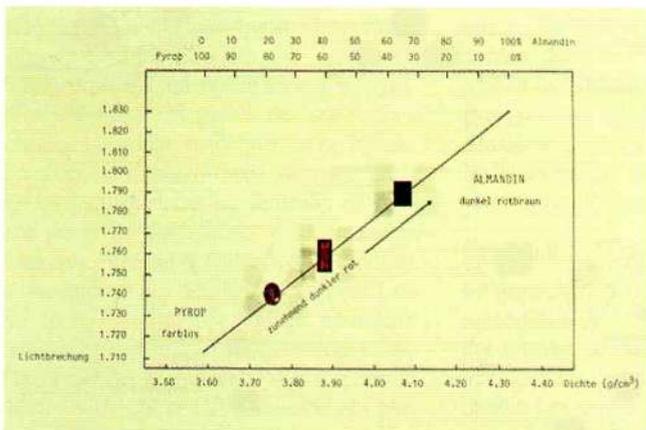


Figure 4 : Relation entre indice de réfraction, densité et composition chimique de la série pyrope almandin. (Photo © H.A. Hänni)

Description des grenats gemmes

Le principe de miscibilité entre deux compositions chimiques possédant la même structure cristalline a pour conséquence une grande multiplicité des membres appartenant à des séries continues. Leurs couleurs, leurs indices de réfraction et leurs densités sont également influencés par rapport aux propriétés des pôles purs (figure 4). Le type de grenat formé durant la cristallisation dépend du matériau qui était à disposition, de facteurs géologiques locaux et de facteurs physico-chimiques. Pour déterminer



Figure 5 : Grenats spessartites orangés et avec changement de couleur. Ces spessartites et grenats riches en spessartite sont photographiés en éclairage lampe tungstène. Les pierres tirant sur le rouge possèdent une petite teneur en pyrope et des traces de vanadium donc elles présenteraient une couleur tirant sur le bleu vert en lumière froide. Les bruts proviennent de Taita Hills (Kenya), les beaux cristaux bruts sont de la Namibie (Kunene), le grenat jaune clair, taille octogonale provient de Ramona, Californie (USA). La pierre facettée orange forme triangulaire (5 ct) provient de Kunene (Namibie). (Photo © H.A. Hänni)

précisément les proportions relatives de pôles purs d'un grenat intermédiaire, des analyses chimiques non destructives - en gemmologie - sont nécessaires.

Les grenats de la série pyrope almandin

Les grenats les plus répandus sont des pierres rouges de la série pyrope almandin. Si le pyrope (incoloré à l'état pur) contient 10-40% de composante almandin, il devient d'un rouge

très plaisant. Des taux d'almandin plus élevés rendent les grenats trop foncés. En effet, l'almandin pur est de couleur rouge très foncée. Cette composition montre parfois une variété intéressante: almandin étoilé, dont l'astérisme est dû à des inclusions bien ordonnées d'aiguilles de rutile.

Le rhodolite (violet rouge clair) est une variété de pyrope almandin contenant 10-25% d'almandin. Quelques pour-cent de molécules d'almandin suffisent déjà à créer des effets de coloration. C'est pourquoi les spectres d'ab-

sorption du rhodolite clair présente des bandes d'almandin à 575, 527 et 505 nm. Le pyrope, qui est incolore à l'état pur, peut être coloré par des grenats (idiochromatiques) autres que l'almandin. Les variétés idiochromatiques spessartite (jaune) et knorringite (rouge) sont aussi miscibles avec le pyrope. Le pyrope chromifère rouge sang contient une petite part de molécules de knorringite ($Mg_3Cr_2Si_3O_{12}$). Certains grenats, composés essentiellement de mélanges pyrope almandin, contiennent encore un petit pourcentage de grossulaire et de spessartite ou bien quelques molécules d'andradite, les deux derniers pôles pouvant influencer la couleur.

Le spessartite et les grenats riches en spessartite

Le spessartite jaune et pure, de grandeur intéressante pour le tailleur de pierres précieuses existe assez rarement dans la nature. Un gisement en Californie a longtemps fourni des pierres de couleur jaune orange avec une teneur en molécules spessartite de 90% (figure 5, octogonale, jaune). Madagascar fournit depuis longtemps des spessartites, de composition assez pure jusqu'à un mélange avec de l'almandin, donc de couleur brune orangée. En 1994, les gisements de spessartites en Namibie du nord, près de la rivière Kunene ont été découverts. Ces cristaux qui parfois ont la forme de rhombododécàèdres parfaits

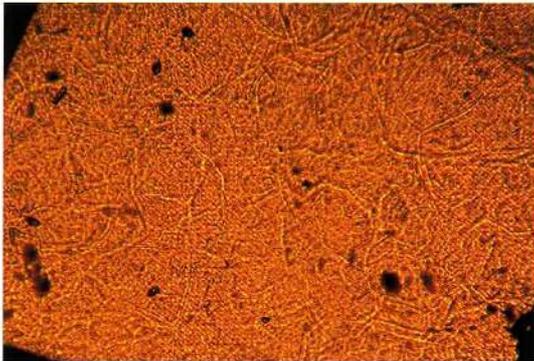


Figure 6 : Hessonite vu au microscope binoculaire en lumière transmise. L'hessonite présente une structure en tourbillon; celle-ci est due à la structure granuleuse et polycristalline de la pierre. (Photo © H.A. Hänni)

sont des spessartites assez purs et ont une couleur orange vive. Pour des raisons commerciales les dénominations grenat Mandarin et Hollandine ont été introduits.

Le spessartite est souvent en série avec pyrope et almandin. On trouve des spessartites riches en almandin, ce dernier a une coloration allant de l'orange foncé au rouge brun. Les spessartites riches en almandin ne peuvent pas être différenciés des almandins riches en pyrope par le seul moyen des indices de réfraction et des densités respectives. Une analyse au spectroscope s'avère nécessaire pour déterminer les taux de spessartite relativement élevés par les bandes d'absorption se situant à 432, 424 et 412 nm. Les lignes plus faibles situées à 573, 520, 504 et 480 nm deviennent aussi visibles dans les pierres avec un taux de spessartite très élevé.

Le grenat bleu vert avec changement de couleur

Un phénomène particulier peut être observé en de très rares occasions, quand les cristaux de la série spessartite pyrope contiennent du vanadium. Dans la lumière du jour (riche en bleu), ils apparaissent bleu vert ou vert olive; éclairés par une lampe à tungstène (riche en lumière rouge), ils sont de couleur violette ou brun rouge. Ils présentent ainsi un changement de couleur à la manière de l'alexandrite. Le spessartite pyrope vanadifère à effet changement de couleur a d'abord été découvert à Ceylan (Sri Lanka), puis d'une meilleure qua-

lité dans la vallée d'Umba (Tanzanie). Récemment, on les a trouvés à Békily (Madagascar) dans une variété d'un bleu encre foncée caractéristique.

Les membres des séries pyralspite

Des grenats de compositions complexe d'une variété gemmifère importante (groupe pyralspite avec une part minime de grossulaire - la non miscibilité n'est pas totale entre les deux séries) proviennent de la vallée d'Umba (Tanzanie). Les membres de cette solution solide de couleur orange à rouge brun sont principalement composés de pyrope (40-70%) et de spessartite jaune (15-40%).

Un taux mineur d'almandin (5-20%) produit une coloration rouge. Ces grenats du groupe pyralspite sont connus dans le commerce sous les noms Malaïa ou Umbalites. Bien que cette espèce pyralspite ait été découverte vers 1968, un deuxième gisement de ce genre a été trouvé à Madagascar, en 1997 (communication personnelle de W. Spaltenstein).

Grossulaire et grossularite

Le grossulaire est incolore à l'état pur, mais l'adjonction de grenats idiochromatiques créés des cristaux de couleur différente (allochromatique), les couleurs étant rouges, vertes et brunes. Les molécules d'almandin, d'andradite, uvarovite et de goldmanite sont surtout responsables des effets de coloration. Des parts minimales de grenats riches en fer (almandin et andradite) créent des colorations rouges, oranges et brunes, une fois encore la non miscibilité n'est pas totale entre les deux séries. Les hessonites sont des représentants de cette variété de grossulaire. Leur particularité optique est une structure granuleuse, qui ressemble sous le microscope binoculaire à des tourbillons (figure 6). Elle est due à la structure polycristalline de l'hessonite (figures 6 et 7). Par conséquent, les hessonites ne sont pas des monocristaux, mais des agrégats polycristallins comme on en trouve fréquemment parmi les grossulaires. Grossularite est la dénomination correcte pour les grossulaires polycristallins. Les grossulaires verts peuvent

également posséder une structure polycristalline; les grossularites vertes (Hydrogrossularites) ont été appelés "jade du Transvaal". De nombreuses grossularites ne sont pas composées qu'avec des grains de grossulaire, mais aussi avec d'autres minéraux tels que la vésuvianite ou la chromite. Etant donné l'association de ces divers minéraux, les grossularites sont qualifiées de roches. Ainsi peut-on observer des variations allant du grossulaire monocristallin à la roche riche en grossulaire; les densités correspondantes peuvent fortement différer de celle du grossulaire pur. Actuellement, les grossulaires les plus marquants sont les tsavolites (vert), qu'on trouve principalement dans le parc national de Tsavo (Kenya), en Tanzanie et depuis peu à Madagascar. Leur couleur est attribuée aux éléments vanadium et/ou chrome. Ces éléments sont logés dans les molécules de goldmanite ($\text{Ca}_3\text{V}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$) ou uvarovite ($\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$). Tous deux produisent une coloration vert émeraude. Toutefois, ce sont les molécules riches en vanadium qui prédominent la plupart du temps. L'apparition sur le marché de très grands cristaux de grenats bruns provenant du Mali (1997) correspond à du grossulaire monocristallin. Les noyaux de ces grands bruts opaques sont transparents montrant des couleurs de jaune à brun et vert olive.

Andradite et démantioïde

L'andradite pur est idiochromatique jaune vert et présente une dispersion forte, lui conférant le nom de démantioïde (même vivacité que le diamant). Des démantioïdes de qua-



Figure 7 : Prise de vue au microscope à balayage (MEB) de la surface d'une cassure d'hessonite. La structure granuleuse et polycristalline est facilement reconnaissable. Cette pierre brute jaune provient d'Afrique de l'Est. Longueur du trait noir 0,1 mm. (Photo © REM Labor, Université de Bâle.)

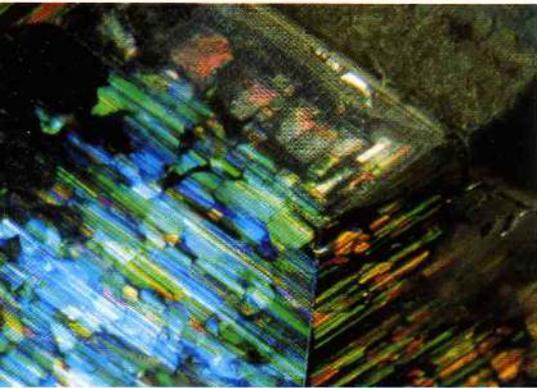


Figure 8 : Détail d'un grenat andradite irisé. Grenat andradite de Hermozitlo, Mexique (19,26 ct). (Photo © H.A. Hänni)

lité gemme ont été exploités en Oural au début de ce siècle. Cette mine est épuisée depuis longtemps et les dématoïdes russes sont devenus très prisés des collectionneurs. Depuis peu, ces gisements sont de nouveau exploités et l'on voit de nouveau dématoïdes russes sur le marché. La dispersion est, dans quelques-unes de ces gemmes, superposée à une coloration vert émeraude. Cette coloration allochromatique provient d'une teneur minime de chrome due à la composante uvarovite. Les andradites d'autres localités sont plutôt jaunes et ont été appelées topazolites.

Conclusion

Les grenats forment un groupe de minéraux fascinant, qui nous offre des gemmes d'apparences très variées. Des cristaux individuels transparents de toutes les couleurs (à l'exception d'un bleu pur) sont trouvés et facettés. La plupart de ces couleurs proviennent de mélanges naturels en forme de solution solide entre différents membres. Les nombreuses possibilités de combinaison des différentes variétés colorées ou incolores forment une large palette de couleurs. Des agrégats polycristallins (forme massive) et des pierres avec un astérisme potentiel peuvent être utilisés comme matériel cabochon. Un cristal de la série andradite grossulaire du Mexique présente même un magnifique jeu de couleurs comparable aux reflets d'opale (figure 8).

Vu le très grand nombre de variétés possibles, des problèmes de nomenclature peuvent se

produire. Etant donné que la couleur constitue une des principales caractéristiques des pierres précieuses, beaucoup d'appellations désignent des variétés à couleurs bien définies (rhodolite, tsavolite). Les éléments chimiques, qui provoquent les différentes couleurs, peuvent aussi colorer différents types de grenats de la même manière. Ainsi peut-on trouver des gemmes de même couleur, mais de composition minéralogique différente. Les grossulaires et les dématoïdes riches en chrome et les grossulaires riches en vanadium illustrent parfaitement cet état de choses. La dénomination correcte des grenats comme membres d'une série exige dans certains cas une analyse chimique non destructive assez

élaborée pour la détermination des composantes finales. La nomenclature des grenats basée sur ces méthodes est du point de vue minéralogique correcte et en accord avec les résultats obtenus au moyen des techniques gemmologiques de mesure de l'indice de réfraction et de la densité. Un flot de noms de localités et de désignations peut parfois prêter à confusion et l'amateur de pierres peut y perdre son latin. Une classification des grenats tenant compte des déterminations faites au moyen d'instruments gemmologiques a été proposée par Stockton, C.M. et Manson, D.V. (1985) et Hannemann (1983). Ces procédés permettent un système de désignation rationnel pour la classification des grenats.

Remerciements

Jean-Pierre Chalain pour sa relecture, Mr I. Eliezri et Werner Spaltenstein pour leurs informations et leurs contributions.

Lectures recommandées

- Akizuki, M., NaLai, H., Suzuki, T. (1984): *The origin of iridescence in grandite garnet. Am. Mineral.* 69, 896 – 901.
- Gübelin, E. (1981): *Einschlüsse im Granat aus dem Umba Tal. Z. Dt. Gemmol. Ges.* 30, 182 – 194.
- Gübelin, E.J., Koivula, J.I. (1986): *Bildatlas der Einschlüsse in Edelsteinen. – ABC-Verlag, Zürich.*
- Hänni, H.A. (1987): *Garnets – A colourful Gemstone Family. – Swiss Watch & Jewelry Journal*, 5, 691 – 694
- Hänni H. A. (1999): *Gem News: ...and other gems from Itakaka. Gems & Gemology* 35, 2, 150.
- Hannemann W. W. (1983): *A new classification for red to violet garnets. Gems & Gemology* 19, 1, 37-40.
- Jobbins, E.A., Saul, J.M., Statham, R.M., Joung, B.R. (1978): *Studies of a gem garnet suite from Umba River, Tanzania. J. Gemm.* 16, 161-171.
- Koivula, J. I. (1987): *Gem News: Iridescent andradite garnet. Gems & Gemology* 23, 3, 173-175.
- Lind, T., Henn, U. & Bank, H. (1994): *Leuchtend orange-rote Spessartite aus einem neuen Vorkommen in Namibia. – Z.Dt.Gemmol.Ges.* 1/2, 39-47.
- Lind, T. & Bank, H. (1995): *Schleifwürdige Granate (Grossulare) von einem neuen Vorkommen in Mali. – Z.Dt.Gemmol.Ges.* 44, 1, 17-24.
- Meagher, E.P. (1980): *Silicate Garnet. – In "Reviews in Mineralogy", Vol. 5, Orthosilicates. Min. Soc. Am.*
- Phillips, W.R. & Talantsev A.S. (1996): *Russian demantoid, Czar of the garnet family. – Gems & Gemology* 32, 2, 100-111.
- Schmetzer, K., Bank, H. (1981): *Garnets from Umba Valley, Tanzania. – Is there a necessity for a new variety name? J. Gemmol.* XVII, 522-527.
- Stockton, C.M., Manson, D.V. (1985): *A proposed new classification for gem quality garnets. – Gems & Gemology, Winter*, 205-218.

Numéros de la Revue de Gemmologie AFG disponibles sur les grenats : 5, 46, 52, 54, 96, 99, 116, 131