

9. GEMMES ET MAGNETISME

9.1 Test visuel sur l'attraction magnétique des matières gemmes

D'après Thierry Pradat, FGA - Jean-Pierre Gauthier, (article paru en Mars 2011 dans la Revue de Gemmologie AFG, No. 175, pp. 14-18)

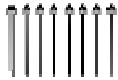
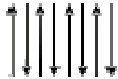
9.1.1. Introduction

Les propriétés magnétiques de certains minéraux sont connues depuis des millénaires. Dans l'antiquité, Pline l'ancien parlait déjà des "pouvoirs magiques" de la magnétite alors qu'un ouvrage chinois publié entre 70 et 80 après J.-C. mentionnait l'attraction d'une aiguille par un "aimant", ce que l'on connaît aujourd'hui sous le nom de boussole (Li Shu-hua, 1954). En 1839, J.J. Berzelius évoquait l'état de polarité du minerai de fer magnétique et en 1943, P.W. Selwood décrivit les différentes méthodes de mesure de la susceptibilité magnétique des molécules dans leur ensemble. C'est en 1958 que le gemmologue B.W. Anderson a cherché à mesurer les différences d'attraction des matières gemmes sous l'action d'une même excitation magnétique. Les moyens et les tests furent améliorés à partir des années '90, avec l'apparition d'une nouvelle génération d'aimants plus stables et plus puissants.

L'origine du magnétisme dans un matériau se situe à un niveau ultramicroscopique : il provient de la rotation de l'électron autour de lui-même, créant un dipôle magnétique, un minuscule aimant, caractérisé par son "spin". En l'absence de champ magnétique extérieur, les spins des électrons attachés aux atomes présents dans la structure d'un matériau peuvent s'orienter de manière totalement désordonnée, conduisant à une aimantation globale nulle ou très faible. Ils peuvent dans d'autres cas s'organiser de façon plus ou moins structurée, conférant au matériau une aimantation permanente.

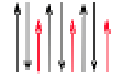
Un champ magnétique appliqué pourra modifier la répartition des spins et tendre à leur donner une direction privilégiée, c'est à dire conférer une aimantation à des matériaux qui n'en possédaient pas (Néel, 1948). Ce champ magnétique sera, dans le contexte expérimental décrit ici, créé par un aimant permanent. On caractérise alors l'aimantation du matériau par un coefficient reliant le champ magnétique (la cause excitatrice) à l'induction magnétique (l'effet induit). Ce coefficient, appelé *susceptibilité magnétique*, est caractéristique du matériau.

Ceci dit, il est possible de classer les matières gemmes en cinq catégories :

- **Diamagnétique** : le matériau ne possède pas d'aimantation spontanée mais, en présence d'un champ magnétique extérieur, il peut acquérir une aimantation très faible dirigée en sens contraire du champ d'excitation. Le matériau est théoriquement repoussé par un aimant (susceptibilité magnétique négative), ce qui est impossible à constater dans le cadre du test proposé dans le présent article. Toutes les matières gemmes ont une composante diamagnétique. Les plus représentatifs sont les feldspaths, les quartz, le diamant ou la calcite.
- **Paramagnétique** : le matériau ne possède pas d'aimantation spontanée mais, en présence d'un champ magnétique extérieur, il acquiert une aimantation dirigée dans le même sens que ce champ d'excitation. La susceptibilité magnétique est positive et en général assez faible. Le matériau peut être attiré par un aimant de manière très faible à sensible. La plupart des gaz, certains métaux, dont les matériaux alcalins, et quelques sels sont paramagnétiques, ainsi que les grenats, amphiboles, pyroxènes, olivines ou tourmalines.
- **Ferromagnétique** : Les spins s'alignent dans des régions appelées domaines magnétiques et confèrent au matériau une aimantation, même en l'absence de champ externe. Si les domaines sont trop petits, avec des orientations aléatoires d'un domaine à l'autre, l'aimantation résultante est faible. L'aimantation augmente par application d'un champ externe qui tend à aligner tous les domaines, mais l'aimantation chute brusquement à une certaine température dite de Curie, en raison de la forte agitation thermique qui détruit cet alignement. 
- **Antiferromagnétique** : Les spins sont alternativement opposés, ce qui conduit à une aimantation résultante nulle ou presque. Ex: oxydes de chrome, de manganèse, de nickel, certains oxydes de fer dont l'hématite ou sulfures de fer dont la pyrite, etc. Mais 

au-dessus d'une certaine température dite de Néel, l'agitation partielle détruit cette alternance et le matériau retrouve une aimantation, qui va de nouveau s'atténuer si la température monte encore en raison de l'augmentation de l'agitation thermique. Notons que ces minéraux peuvent devenir faiblement paramagnétiques par modification de leur structure moléculaire ou en raison de l'existence d'impuretés.

- **Ferrimagnétique** : C'est le cas typique de la magnétite Fe_3O_4 , comportant deux ions Fe^{3+} et un ion Fe^{2+} . Les deux types d'ions Fe^{3+} , l'un dans une lacune octaédrique et l'autre dans une lacune tétraédrique de la structure, ont leurs spins opposés, et donc leur effet s'annulent, tandis que les ions Fe^{2+} , situés dans des lacunes octaédriques, ont leurs spins parallèles et sont donc responsables de l'aimantation. La structure atomique spécifique de ce type de matériau (les ferrites) lui confère un très grand pouvoir magnétique. A titre de comparaison, la susceptibilité magnétique de la magnétite est un million de fois plus grande que celle des matières diamagnétiques. Au-dessus de leur température de Curie, ces matériaux redeviennent paramagnétiques.



Notons que le diamant, naturel ou synthétique, en principe diamagnétique, peut se comporter comme une matière paramagnétique ou ferromagnétique s'il contient suffisamment d'inclusions classées comme telles.

- Les ions paramagnétiques les plus magnétogènes sont, dans l'ordre (Hoover *et al.*, 2007 & 2008) Fe^{3+} , Mn^{2+} et Fe^{2+}
- Puis viennent, ce qui est déjà impossible à constater dans le cadre de ce test : Mn^{3+} et Cr^{2+}
- Ensuite dans une moindre mesure : Co^{2+} , Cr^{3+} , V^{2+} , Ni^{2+} , V^{3+} , Cu^{2+} , Ti^{3+} , V^{4+}
- Certains ions des terres rares (ETR), tous trivalents, sont magnétogènes, parfois dans de fortes proportions. Dans l'ordre : Dy^{3+} , Ho^{3+} , Er^{3+} , Tb^{3+} , Gd^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{3+} , Ce^{3+} , Sm^{3+}

9.1.2. Type d'aimant

Pour ce test, un simple aimant suffit. Il en existe quatre types distincts :

- **Aimant-Fe** : désigne ici un aimant standard ou ferrite, de composition Fe_2O_3 , à base d'oxyde de fer. Ce type d'aimant est délaissé car son énergie magnétique est trop faible à comparer à celle des aimants de dernière génération.
- **Aimant-Al** : désigne ici un aimant puissant, de composition AlNiCo à base d'aluminium, de nickel et de cobalt. Il est instable et donc non fiable car il a tendance à se démagnétiser trop rapidement.
- **Aimant-Sm** : désigne ici un aimant SmCo à base de samarium et de cobalt. Son coût élevé et son pouvoir magnétique trop faible n'en font pas un bon instrument pour les besoins de ce test.
- **Aimant-Nd** : désigne ici un aimant puissant et permanent, de composition NdFeB à base de néodyme, de fer et de bore. Sa puissance d'attraction est 3,25 à 6,5 fois plus élevée que celle de l'aimant-Fe. De ce fait, il permet de mieux constater visuellement le pouvoir d'attraction magnétique, même sur les matières gemmes d'une teneur relativement faible en ions magnétogènes. C'est exclusivement ce type d'aimant qui sera retenu pour ce test.



Il est facile de se procurer des aimants-Nd pour quelques euros sur le web en tapant "aimant néodyme" dans un moteur de recherche. Par souci de commodité et d'efficacité, l'aimant-Nd choisi pour ce test (photo) est cylindrique, de diamètre 6 mm, de hauteur 13 mm et de produit énergétique $\approx \text{N}45$ (correspondant à l'énergie potentielle de l'aimant dans des conditions expérimentales bien définies).

9.1.3. Nature du test

Il ne fait appel à aucune formule mathématique ni aucun calcul. Il repose entièrement sur l'observation visuelle. Il n'est pas d'une grande précision scientifique mais son efficacité est suffisamment significative pour permettre de séparer un bon nombre de gemmes d'après leur teneur ou non en ions magnétogènes. La matière gemme à tester peut être brute ou taillée, en cabochon ou à facettes, d'un poids compris entre 0,10 et 30 carats. Le test peut être effectué selon trois méthodes différentes correspondant à trois sensibilités distinctes, comme l'a montré Gumpesberger en 2006. Le choix de la méthode se fera en fonction du poids de la matière gemme ou de sa teneur présumée en éléments magnétogènes.

1. **Méthode directe** (Anderson, 1990 ; Gumpesberger, 2006) : Placer la gemme sur une surface plane, lisse et propre, comme une plaque de verre ou une surface mélaminée, à l'écart de tout objet métallique. S'il s'agit d'un cabochon, le placer dôme en bas afin de réduire au maximum la surface de frottement. L'aimant est tenu par une extrémité et lentement approché horizontalement de la gemme à plusieurs endroits jusqu'à constater si elle est ou non attirée et avec quelle facilité.
2. **Méthode du pendule** (Hanneman, 1996 ; Gumpesberger, 2006) : Suspendre la matière gemme à l'extrémité d'un fil à coudre non métallique à l'aide d'un bout de ruban adhésif. L'autre extrémité est attachée à un point fixe en hauteur. Approcher doucement l'aimant horizontalement à plusieurs endroits de la gemme jusqu'à constater si elle est ou non attirée et avec quelle facilité.
3. **Méthode du bateau** (Hanneman, 1996 ; Gumpesberger, 2006) : Placer la matière gemme sur un petit morceau de polystyrène expansé, de liège ou de balsa qui sera à son tour déposé doucement à la surface d'une soucoupe remplie d'eau. Tenir l'aimant par une extrémité et l'approcher de la gemme horizontalement à plusieurs endroits jusqu'à constater si le "bateau" est ou non attiré et avec quelle facilité.

Il existe une autre méthode, non testée ici mais intéressante à mentionner. Elle consiste à tester une matière gemme suspendue par un fil dans un liquide de densité comparable afin d'augmenter le plus possible la sensibilité magnétique (Koivula et al., 1984).

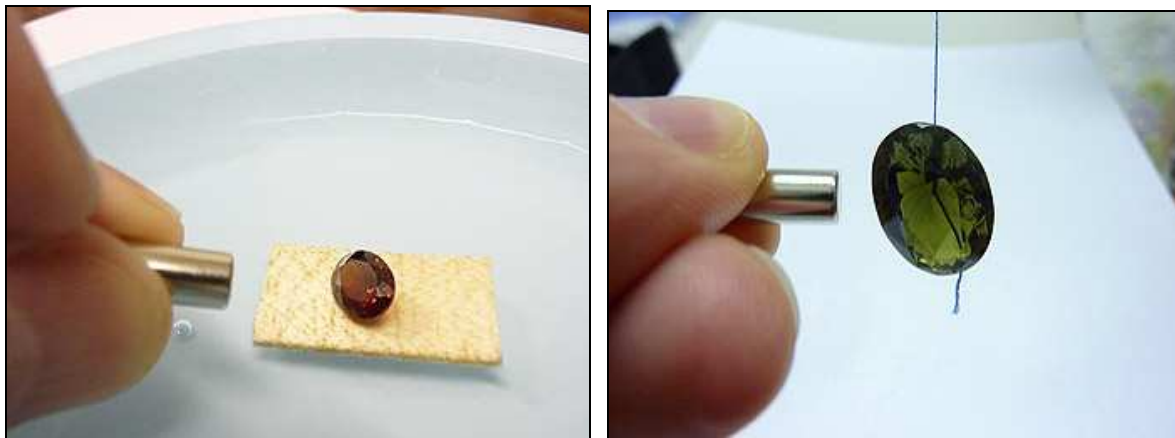


Figure 74 : Action d'un aimant sur des gemmes

Les méthodes du bateau à gauche et du pendule à droite sont plus adaptées pour les matières gemmes à faible teneur en ions magnétogènes ou de masse trop importante. Dans les deux cas ci-dessus, la méthode directe ne donnait aucune attraction visible. Grâce à la méthode du bateau, l'hessonite de 3,08 ct, comportant une faible proportion d'almandin, s'est visiblement déplacée sur l'eau. Quant à l'amphibole de 14,33 ct, la méthode du pendule a permis de constater une faible attraction.

Il existe des tests plus précis tels que celui proposé par D.B. Hoover et B. Williams (2007) qui nécessite le même aimant-Nd et une balance précise au 1/500ème de carat afin de "mesurer" les différences d'énergie diamagnétique ou paramagnétique d'une matière gemme à l'autre.

9.1.4. Effet et analyse du test

En fonction de la puissance d'attraction magnétique, quelle que soit la méthode utilisée, l'effet peut être qualifié de :

- **nul** : aucune attraction visible, la matière gemme reste immobile
- **faible** : attraction présente, la matière gemme bouge légèrement en direction de l'aimant
- **distinct** : attraction bien visible, la matière gemme bouge assez facilement en direction de l'aimant
- **fort** : attraction conséquente, la matière gemme est très facilement déplacée ou soulevée par l'aimant

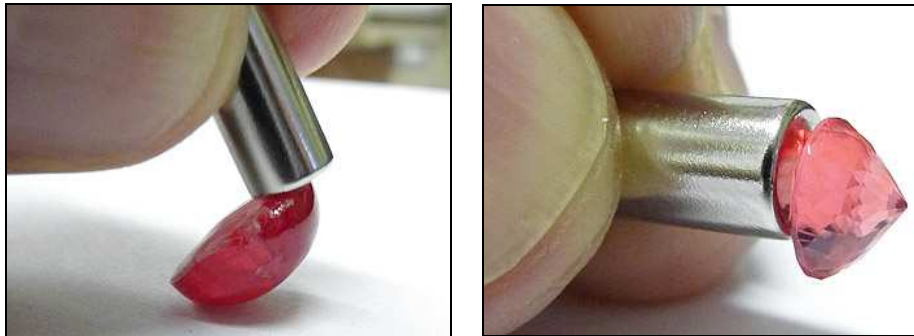


Figure 75 : Les matières gemmes riches en ions Mn^{2+} sont distinctement à fortement attirées par l'aimant-Nd. A gauche, une rhodonite du Brésil de 6,31 ct et à droite une rhodochrosite d'Afrique du Sud de 1,46 ct, facilement soulevée.

9.1.5. Utilité du test et liste des gemmes à éléments magnétogènes

Ce test est simple, non destructif et rapide pour séparer des pierres brutes ou taillées, sur le terrain, chez un négociant ou au laboratoire. Il est particulièrement intéressant de sortir l'aimant pour vérifier des lots disparates de pierres de couleurs similaires comme celles provenant des graviers gemmifères du Sri Lanka, du Myanmar ou de Madagascar. Les grenats, faiblement à très fortement attirés par l'aimant, seront vite séparés des spinelles transparents, corindons, chrysobéryls, zircons, etc. Voici quelques exemples illustratifs de ce qu'il est possible de distinguer grâce à l'aimant-Nd (Anderson, 1990 ; TP, 2010) :

Couleur	Pas d'attraction visible	Attraction magnétique visible
rose à rouge	spinnelle	grenat
orange ou vert	zircon métamicté	spessartite / démantioïde
Changement coul. vert/rouge	alexandrite	grenat à changement de couleur
vert à brun	sinhalite	péridot
vert & brun, fort pléochroïsme	andalousite	axinite
gris métallique	hématite	hématine artificielle
incolore	YAG artificiel	GGG artificiel

Pour le seul grenat, ce test aide à distinguer les différentes variétés de couleur similaire en fonction de leur degré d'attraction magnétique. Dans les nuances de rose, rouge ou orangé, les pierres fortement attirées indiquent la présence significative de molécules d'almandin et/ou de spessartite alors que les pierres nullement à faiblement attirées posséderont plutôt un nombre significatif de molécules de pyrope ou de grossulaire. Entre autres tests, les mesures de l'IR et de la densité ainsi qu'un spectre pourront confirmer l'identité de la variété

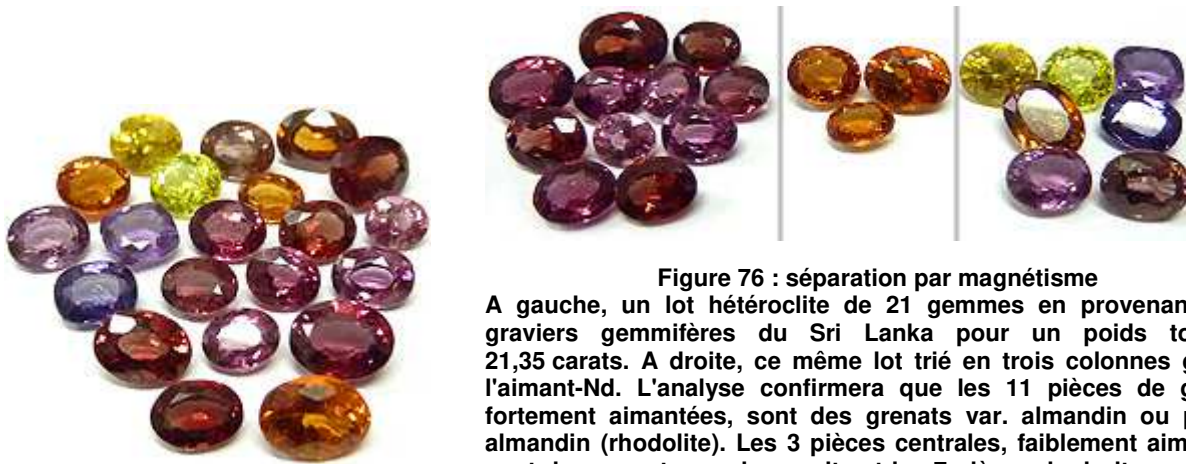


Figure 76 : séparation par magnétisme

A gauche, un lot hétéroclite de 21 gemmes en provenance des graviers gemmifères du Sri Lanka pour un poids total de 21,35 carats. A droite, ce même lot trié en trois colonnes grâce à l'aimant-Nd. L'analyse confirmera que les 11 pièces de gauche, fortement aimantées, sont des grenats var. almandin ou pyrope-almandin (rhodolite). Les 3 pièces centrales, faiblement aimantées, sont des grenats var. hessonite et les 7 pièces de droite, nullement aimantées, sont des zircons, chrysobéryls et spinelles. Notez pourtant la similitude de couleur entre les rhodolites et certains spinelles.

Les tableaux suivant indiquent les matières gemmes au pouvoir d'attraction magnétique visible en raison de leur nombre suffisamment significatif d'ions magnétogènes. A notre connaissance, aucun article précédent n'avait fait état d'une aussi longue liste, basée sur les tests des auteurs référencés en dernière colonne.

Légende : ETR = éléments des terres rares

Matière gemme	formule chimique	ions magnétogènes	effet aimant-Nd	réf.
Amphiboles :				
ACTINOLITE	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Fe^{2+}	faible	4,18
PARGASITE	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_3\text{Fe}^{2+}\text{Si}_6\text{Al}_3\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Fe^{2+}	faible	5,18
RICHTERITE	$\text{Na}(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_5[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$	Fe^{2+}	faible	18
Pyroxènes :				
AEGIRINE-AUGITE	$(\text{Ca}, \text{Na})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})\text{Si}_2\text{O}_6$	$\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$	faible	18
BRONZITE (massive opaque)	$\text{Fe}^{2+}\text{MgSi}_2\text{O}_6$	Fe^{2+}	distinct à fort	3,18
DIOPSIDE ÉTOILÉ opaque	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 / \text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$	$\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$	fort	7,15,18
ENSTATITE	$(\text{Fe}^{2+})\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Fe^{2+}	faible à distinct	3,18
HYPERSTHÈNE opaque	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_2\text{Si}_2\text{O}_6$	Fe^{2+}	faible à distinct	3,18

Grenats :				
ALMANDIN	$\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Fe^{2+}	fort	7,12,15,16,17,18
PYROPE	$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Fe^{2+}	nul à faible	7,12,15,17,18
PYROPE-ALMANDIN (rhodolite)	$(\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Fe^{2+}	faible à fort	12,15,17,18
PYROPE-SPESSARTITE (changement de couleur)	$(\text{Mn}^{2+},\text{Mg})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Mn^{2+}	faible à fort	15,17,18
SPESSARTITE	$\text{Mn}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Mn^{2+}	fort	7,12,15,16,17,18
ANDRADITE (démantoïde, topazolite, mélanite)	$\text{Ca}_3\text{Fe}^{3+}_2(\text{SiO}_4)_3$	Fe^{2+}	distinct à fort	7,12,15,17,18
GROSSULAIRE (hessonite, tsavorite)	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$	Fe^{2+}	nul à faible	7,12,15,16,17,18
HYDROGROSSULAIRE	$\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})_4$	Fe^{2+}	nul à faible	18
DOUBLET GRENAT-VERRE	$\text{Fe}^{2+}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3 / \text{SiO}_2$	Fe^{2+}	nul à faible	15,18
Corindons :				
RUBIS ÉTOILÉ opaque Inde	Al_2O_3	impuretés $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$	nul à fort	13,18
SAPHIR bleu foncé Australie	Al_2O_3	impuretés $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$	nul à faible	16
SAPHIR ÉTOILÉ opaque	Al_2O_3	impuretés $\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$	nul à faible	15
Spinelles :				
SPINELLE bleu, violet	$\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$	Fe^{2+}	nul à faible	15,16,18
HERCYNITE (spinelle noir)	$\text{Fe}^{2+}\text{Al}_2\text{O}_4$	Fe^{2+}	faible à distinct	9,18
Tourmalines :				
ELBAÏTE, DRAVITE, UVITE, couleur foncée	$(\text{Ca},\text{Na},\text{Mg})(\text{Fe}^{2+},\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$	impuretés Fe^{2+}	nul à distinct	7,12,15,16,18
SCHORL	$\text{NaFe}^{2+}_3\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_4$	Fe^{2+}	faible à distinct	18
Réf.: ¹ Weiss, 1899 - ² Nagata <i>et al.</i> , 1957 - ³ Akimoto <i>et al.</i> , 1958 - ⁴ Syono, 1960 - ⁵ Vernon, 1961 - ⁶ Rossmann <i>et al.</i> , 1984 - ⁷ Anderson, 1990 - ⁸ Shigley <i>et al.</i> , 1993 - ⁹ Johnson, 1994 - ¹⁰ Kammerling <i>et al.</i> , 1995 - ¹¹ Shigley <i>et al.</i> , 1995 - ¹² Hanneman, 2002 - ¹³ Hainschwang <i>et al.</i> , 2003 - ¹⁴ Titkov <i>et al.</i> , 2003 - ¹⁵ Gumpesberger, 2006 - ¹⁶ Hoover <i>et al.</i> , 2007 - ¹⁷ Hoover <i>et al.</i> , 2008 - ¹⁸ Testé sur les échantillons de l'auteur T.P., 2010				

Matière gemme	formule chimique	ions magnéto- gènes	effet aimant-Nd	réf.
ASTROPHYLLITE	$K_2Na(Fe^{2+}, Mn)_7Ti_2Si_8O_{26}(OH)_4$	Fe^{2+}	distinct à fort	18
AXINITE-(Fe)	$Ca_2Fe^{2+}Al_2BO_3Si_4O_{12}(OH)$	Fe^{2+}	faible à distinct	18
BASTNAESITE	$(Ce, La)(CO_3)F$	ETR	faible à distinct	18
CLINOCHLORE	$(Mg, Fe^{2+})_5Al(Si_3Al)O_{10}(OH)_8$	Fe^{2+}	nul à faible	18
DIAMANT NOIR naturel	C + inclusions de Magnétite	impuretés Fe^{2+} / Fe^{3+}	nul à distinct	14
DIAMANT SYNTHETIQUE	C + inclusions métalliques de flux	impuretés Fe^{2+}	nul à distinct	6,7,8,10,11
EPIDOTE	$Ca_2(Fe^{3+}, Al)_3(SiO_4)_3(OH)$	Fe^{3+}	nul à distinct	7,12,15,18
EUDIALYTE	$Na_4(Ca, Ce)_2(Fe^{2+}, Mn^{2+})ZrSi_6O_{17}(OH, Cl)_2$	$Fe^{2+} /$ Mn^{2+}	faible à distinct	18
GASPEITE	$(Ni, Mg, Fe^{2+})CO_3$	Fe^{2+}	faible	18
GGG ARTIFICIEL toutes couleurs	$Gd_3Ga_5O_{12}$	$Fe^{2+} /$ ETR	distinct à fort	15
HEMATITE	Fe_2O_3	Fe^{2+}	nul à faible	12,15,18
HEMATINE ARTIFICIELLE	$(Ba, Sr)Fe_{12}O_{19}$	Fe^{2+} / Fe^{3+}	très fort	9,18
HUMITE	$(Mg, Fe^{2+})_7(SiO_4)_3(F, OH)_2$	Fe^{2+}	nul à faible	18
CLINOHUMITE	$(Mg, Fe^{2+})_9(SiO_4)_4(F, OH)_2$	Fe^{2+}	nul à faible	18
CHONDRODITE	$(Mg, Fe^{2+})_5(SiO_4)_2(F, OH)_2$	Fe^{2+}	nul à faible	18
KORNERUPINE	$(Mg, Fe^{2+})_4Al_6(SiO_4, BO_4)_5(O, OH)_2$	Fe^{2+}	faible à distinct	18
MAGNÉTITE	$Fe^{3+}_2Fe^{2+}O_4$	Fe^{2+} / Fe^{3+}	très fort	18
OXYDE DE ZIRCONIUM CUBIQUE - rose, noir	ZrO_2	ETR	faible à fort	15,16,18
PERIDOT (forsterite <=> fayalite)	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	Fe^{2+}	faible à distinct	2,7,12,15,18
PHOSPHOSIDÉRITE	$Fe^{3+}(PO_4) \cdot 2(H_2O)$	Fe^{3+}	distinct	18
PYRRHOTITE (pyrite magnétique)	FeS	Fe^{2+} / Fe^{3+}	distinct à fort	1
RHODOCHROSITE	$Mn^{2+}CO_3$	Mn^{2+}	distinct à fort	7,12,15,18

PYROXMANGITE	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})\text{SiO}_3$	$\text{Mn}^{2+} / \text{Fe}^{2+}$	distinct à fort	18
RHODONITE	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{SiO}_3$	$\text{Mn}^{2+} / \text{Fe}^{2+}$	distinct à fort	7,12,15,18
SUGILITE	$\text{KNa}_2(\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{3+}, \text{Al})_2 \text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	$\text{Fe}^{3+} / \text{Mn}^{3+}$	faible	18
TEPHROITE	$\text{Mn}^{2+}_2(\text{SiO})_4$	Mn^{2+}	faible à fort	15
YIG ARTIFICIEL	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	$\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+} / \text{ETR}$	fort	15
Réf.: ¹ Weiss, 1899 - ² Nagata <i>et al.</i> , 1957 - ³ Akimoto <i>et al.</i> , 1958 - ⁴ Syono, 1960 - ⁵ Vernon, 1961 - ⁶ Rossmann <i>et al.</i> , 1984 - ⁷ Anderson, 1990 - ⁸ Shigley <i>et al.</i> , 1993 - ⁹ Johnson, 1994 - ¹⁰ Kammerling <i>et al.</i> , 1995 - ¹¹ Shigley <i>et al.</i> , 1995 - ¹² Hanneman, 2002 - ¹³ Hainschwang <i>et al.</i> , 2003 - ¹⁴ Titkov <i>et al.</i> , 2003 - ¹⁵ Gumpesberger, 2006 - ¹⁶ Hoover <i>et al.</i> , 2007 - ¹⁷ Hoover <i>et al.</i> , 2008 - ¹⁸ Testé sur les échantillons de l'auteur T.P., 2010				

Table 9 : Réaction magnétique d'une gemme soumise à un aimant

9.1.6. Conclusion

En raison de son coût modique, de son faible encombrement et de sa facilité d'utilisation, l'aimant-Nd devrait aujourd'hui faire partie de la trousse des instruments de base du gemmologue, notamment lors de déplacements sur le terrain ou chez les négociants. Il faudra cependant veiller à ce qu'il ne soit jamais en contact ou proche d'objets sensibles au magnétisme tels que clés USB, cartes à piste magnétique, petits circuits électroniques, disques durs, etc.

Le résultat de ce test n'est pas diagnostique dans l'identification d'une matière gemme. Il donne seulement une indication de ce qu'elle peut être ou ne pas être. D'autres tests plus probants doivent être effectués, à l'aide des instruments gemmologiques de base ou des instruments avancés de laboratoire si nécessaire. D'autre part, il est prudent de ne pas tirer de conclusion trop hâtive lorsqu'une matière gemme non indiquée dans le tableau ci-dessus est magnétiquement réactive. Il se peut que la gemme soit intrinsèquement diamagnétique mais que ses inclusions soient paramagnétiques ou ferrimagnétiques. C'est notamment le cas du diamant naturel et synthétique mais aussi du quartz et d'autres silicates ou carbonates.

Pour conclure, il est probable qu'une fois calibré en gemmologie de manière standard, le magnétisme des matières gemmes effectué en laboratoire, mesuré scientifiquement, prendra de plus en plus d'importance pour aider à distinguer les différentes variétés, les gisements, les types de traitement ou les synthèses. Les ions magnétogènes n'ont pas fini de faire parler d'eux.

9.2 Le magnétisme des gemmes – une nouvelle méthode d'identification de grenats par Kirk Feral

Les grenats sont parmi les pierres précieuses les plus magnétiques. D'ailleurs, je me souviens qu'on avait séparé des grenats, d'un tas de petits cailloux, par l'action d'un champ magnétique en TP de minéralogie, au cours de mes études à l'ESEM à Orléans.

Au-delà de l'action de sélection, les études du magnétisme des gemmes permettent, de surcroît, de définir la composition d'une gemme en ces concentrations en pôles limites du groupe grenats.

9.2.1. Reconnaître et identifier les grenats à partir du magnétisme

Les grenats almandin rouges peuvent être identifiés aux spinelles rouges ou aux rubis car ils sont 100 fois plus magnétiques que ces autres gemmes.

De plus, parmi les différentes variétés de grenat, la susceptibilité magnétique varie grandement, en fonction de leurs concentrations en fer et/ou manganèse. Le grossulaire vert Mali à gauche ressemble à l'hydrogrossulaire vert à droite, avec lequel il peut être confondu. Mais le grenat du Mali est bien davantage magnétique en raison de sa teneur en fer plus élevé (Fe^{3+}).



Figure 77 : Grenat chromifère Mali – Hydrogrossulaire chromifère
Réponse marquée au magnétisme – réponse modérée

Les grenats sont les seules pierres précieuses transparentes communes qui montrent une réponse marquée à un aimant N52. Ils sont en effet bien plus magnétiques que les autres gemmes transparentes, grâce à leurs concentrations plus élevées en fer paramagnétique (jusqu'à 35%pds d'oxyde de fer) et/ou de manganèse (jusqu'à 40%pds d'oxyde de manganèse).

Même l'uvarovite présente un fort magnétisme, causé par sa concentration en chrome (jusqu'à 27%pds d'oxyde de chrome).



Figure 78 : Almandin - Spessartine
Contient jusqu'à 35% de fer – jusqu'à 40% de manganèse

Ces exemples montrent qu'il est possible d'établir une méthode d'analyse des grenats gemmes à partir de la mesure de la susceptibilité magnétique des grenats, car cette propriété intrinsèque à chacun des pôles limites des grenats, rend possible la détermination des concentrations relatives de fer et de manganèse, entre autres, du grenat étudié.

L'identification des grenats par leur composition chimique nécessite généralement, au-delà de la destruction de l'échantillon ou de la gemme, des technologies compliquées et coûteuses. Par conséquent, la composition chimique d'une gemme et donc, l'identification d'un grenat, n'est généralement pas connue du gemmologue ou de l'étudiant moyen qui veut identifier un grenat par espèce et variété.

Habituellement, l'indice de réfraction, les spectres de couleur et d'absorption sont les principaux indices d'identification d'un grenat. Mais, aujourd'hui, l'utilisation d'une balance de susceptibilité magnétique Hoover permet d'aller plus loin dans l'analyse des grenats.

Avec une balance Hoover, en combinaison avec un réfractomètre et un diagramme Hoover, un échantillon de grenat peut être identifié selon sa variété, et la composition chimique de la gemme peut être estimée avec précision en termes de pourcentages de 2 ou 3 pôles limites des grenats.

C'est ainsi que cette méthode d'analyse a pu révéler la vraie nature de certaines gemmes vendues jusqu'alors avec des appellations erronées.



Figure 79 : balance hoover et un minuscule aimant au néodyme 1/8 de 3mm de diamètre appliqué aux gemmes pour mesurer la susceptibilité magnétique par l'intermédiaire d'une balance Hoover

9.3 Graphique de composition des grenats

Le graphique de compositions de Hoover est une évolution du diagramme de Winchell pour les grenats, développée par le Dr. Horace Winchell dans les années 1950. Plus tard en 1985, Manson & Stockton ont publié une étude classique d'analyse des grenats en utilisant l'indice de réfraction, la couleur et la spectroscopie. Selon la méthode très souvent appliquée d'identification des grenats gemmes, définie par Manson/Stockton, les deux paramètres utilisés étaient des évaluations qualitatives des spectres de couleur et d'absorption. Les résultats étaient tracés sur un diagramme Winchell adapté.

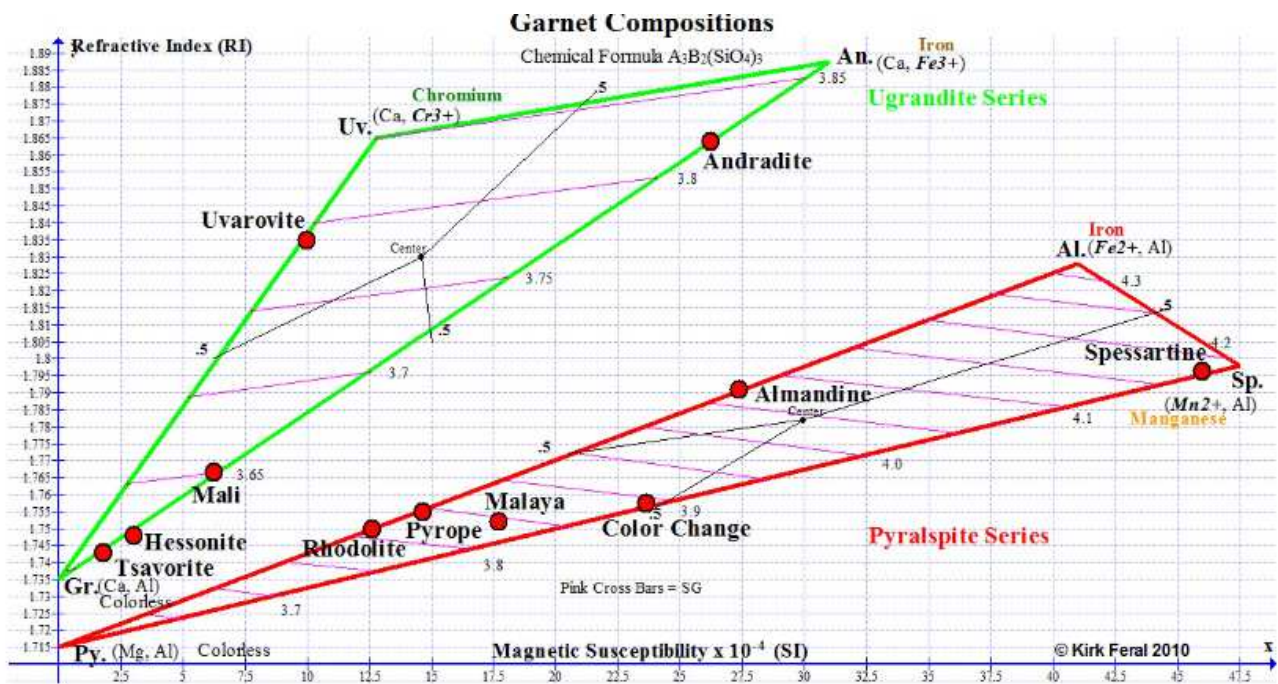


Figure 80 : Graphique RIMS de compositions des grenats Rédigé par Kirk Feral basé sur le diagramme Hoover

Dr. B.S. Hoover, ainsi que Bear Williams et ses collègues, ont publié depuis, en 2008, une nouvelle méthode pour identifier les grenats, basée sur une autre évolution du diagramme de Winchell, en faisant intervenir le magnétisme comme variable. La méthode de Hoover permet une détermination beaucoup plus précise de la composition du grenat que la méthode Manson/Stockton parce qu'elle repose, à la fois, sur l'indice de réfraction et des mesures de susceptibilité magnétique, qui sont des mesures quantitatives précises.

Le diagramme RIMS (indice de réfraction, susceptibilité magnétique) présenté ici est un graphique montrant des compositions typiques de grenats exploitées en tant que gemme. Il a été rédigé par Kirk Feral pour servir d'aide à l'enseignement pour les étudiants, et a été construit à l'aide d'un logiciel de graphique gratuit appelé « Graph ». Les points rouge du graphe représentent des moyennes estimées pour les espèces de grenat courantes et les variétés basées sur les mesures réelles des grenats de gemmes obtenues par ce chercheur. Un graphique plus complet de tous les grenats gemmes est présenté en fin de ce paragraphe.

9.4 À propos du graphe grenat

L'axe horizontal du graphique RIMS montre la susceptibilité magnétique augmentant de 0 à $47,5 \cdot 10^{-4}$ SI, le plus haut niveau de magnétisme mesuré dans les grenats gemmes. Plus le point sur le graphe est à droite, plus le grenat est magnétique. Comme les grenats sont de l'ordre de 100 fois plus magnétiques que les pierres gemmes transparentes allochromatiques, la notation pour le grenat a été changée de 10^{-6} , qui est utilisé habituellement pour l'indice de susceptibilité magnétique pour les pierres précieuses, à 10^{-4} .

L'axe vertical montre l'indice de réfraction augmentant de la valeur de RI 1,70 jusqu'à RI 1,89, qui est proche de la limite supérieure de l'indice de réfraction pour les grenats gemmes. Plus le point de graphe est élevé, plus le RI du grenat est élevé.

9.5 Masse spécifique (ou densité) et Indice de réfraction

Les rayures roses sur chaque ternaire représentent la masse spécifique par incréments de 0,1. La masse spécifique de n'importe quel grenat gemme peut être estimée à partir de l'emplacement de son point tracé sur le graphe par rapport à ces barres transversales roses. Par exemple, la masse spécifique de l'almandin peut être estimé à 4,07.

Inversement, nous pouvons utiliser le graphique pour estimer l'indice de réfraction d'un grenat basé sur sa mesure précise du poids spécifique. Cela peut être utile pour les gemmes OTL comme Andradites dont les RI ne peuvent pas être mesurées avec un réfractomètre standard.

La masse spécifique représente la densité d'une gemme. Plus le grenat est dense, plus la concentration d'agents colorants métalliques dans la structure de la gemme est élevée, et plus la susceptibilité magnétique est élevée.

9.6 Le magnétisme augmente avec l'indice de réfraction

Le degré de magnétisme augmente proportionnellement à l'indice de réfraction, et cette relation existe au sein de chacune des deux groupes de grenats, Pyrospites et Ugrandites.

Le point inférieur du ternaire vert, sur le graphique, correspond à une gemme cabochon verte de grenat grossulaire avec un indice de réfraction de 1,76 et une susceptibilité magnétique de 5. Le point supérieur sur le même ternaire correspond à une gemme cabochon brune du Mali avec un RI 1,785 plus élevé. Le grenat Mali brun est deux fois plus magnétique que le grenat Mali vert, avec une susceptibilité de 10 contre 5.

Sur le graphique de compositions des grenats, les parenthèses () précisent les ions qui occupent les sites A et B, avec des **italiques gras** indiquant l'ion agissant comme le chromophore. Pour l'almandin, les deux ions sont le fer et l'aluminium, avec le fer ferreux (Fe^{2+}) comme chromophore. Pour le spessartine, le chromophore est l'ion manganèse (Mn^{2+}), pour l'uvarovite, le chrome (Cr^{3+}) et l'andradite est colorée par le fer ferrique (Fe^{3+}).

Avec les parenthèses est indiquée la couleur prédominante couramment associée à la variété. Toutefois, les couleurs des espèces 100% pures ne sont pas vraiment connues, puisque les grenats réels ne sont jamais totalement pur. Notez que les le pyrope et le grossulaire sont allochromatiques (incolores) ; ils n'ont pas de chromophores métalliques dans leurs compositions chimiques.

Le graphique montre que la susceptibilité magnétique de l'almandin est mesurée à 41, tandis que celle de l'andradite est seulement de 31. Le fer ferreux (Fe^{2+}) qui colore l'almandin engendre donc une susceptibilité magnétique plus élevée pour le pôle limite almandin que le fer ferrique (Fe^{3+}) qui colore le pôle limite andradite.

Mais les gemmes de ces grenats ne correspondent pas à des pôles limites purs, et nous constatons que les gammes réelles de susceptibilité magnétique pour les gemmes d'almandin et d'andradite sont très semblables les unes aux autres.

Le spessartine dont la couleur est due au manganèse (Mn^{2+}), possède la susceptibilité magnétique la plus élevée de toutes les espèces de grenats gemmes avec une valeur de 47,5.

Les pôles limites pyrope et grossulaire sont totalement incolores et ont des valeurs de susceptibilité magnétique de 0.

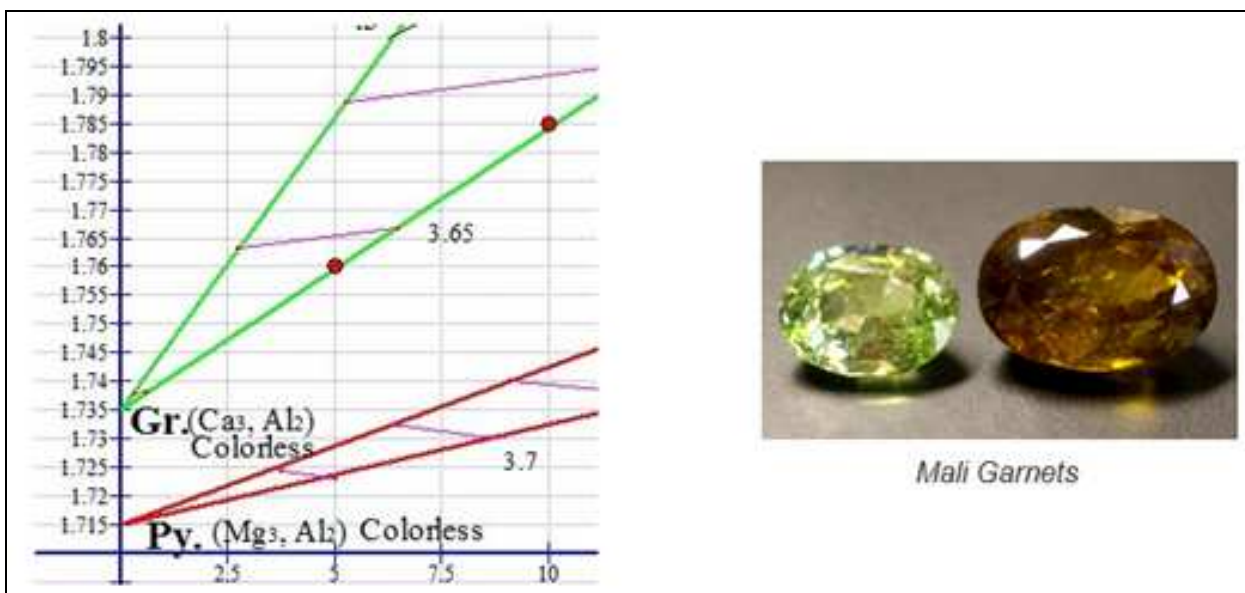


Figure 81: la susceptibilité magnétique augmente avec l'indice de réfraction

9.7 Le magnétisme augmente avec la densité

L'indice de réfraction augmente à mesure que la densité augmente. Une augmentation de densité a donc pour effet une augmentation de la susceptibilité magnétique. C'est vrai non seulement pour les grenats, mais également pour toutes les espèces de pierres précieuses.

9.8 Trisection de l'almandin

Chacun des deux ternaires grenat a un point central à partir duquel 3 sections égales (trisections) sont dessinées, une pour chacun des 3 pôles limites de grenat du groupe Pyrope ou Ugrandite. Quand un point du graphe tombe sur une trisection particulière, nous concluons que la gemme appartient à cette variété particulière de grenat. Comme vous pouvez le voir ci-dessous, le point de l'Almandin tombe dans la trisection Almandin. Ce point particulier de l'almandin représente une moyenne des lectures de grenats almandin mesurés jusqu'ici.

Les points réels pour les gemmes almandins individuels peuvent théoriquement tomber n'importe où dans la trisection almandin.

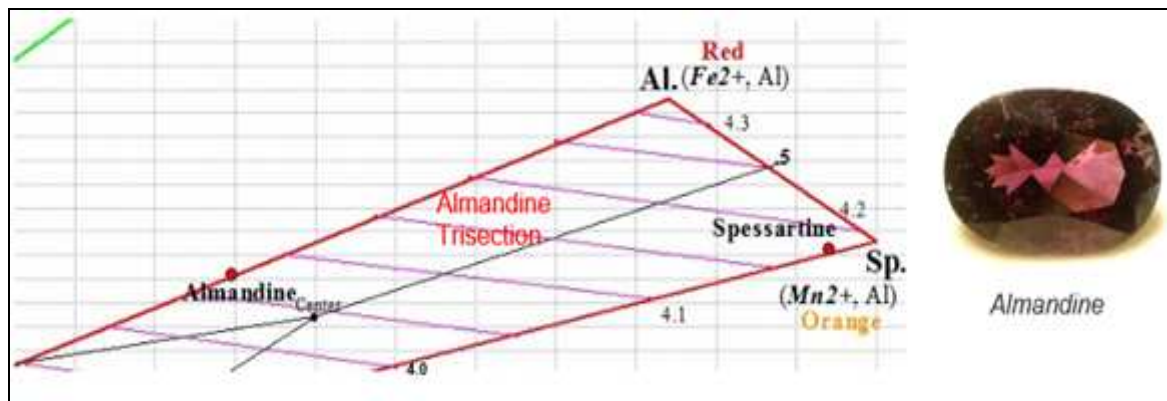


Figure 82 : trisection de l'almandin

9.9 Origine du magnétisme

Le graphique à barres ci-dessous compare la susceptibilité magnétique (degré d'attraction magnétique) de la plupart des variétés de grenats gemme les uns par rapport aux autres. Les grenats sont présentés du moins magnétique au plus magnétique. La hauteur de chaque barre colorée représente la susceptibilité magnétique moyenne mesurée pour la variété de grenat correspondante. La couleur de chaque barre correspond à la couleur des points du graphe pour les variétés sur le graphique précédent.

Ce graphique à barres montre que les grenats grossulaires (leuco, Rosolite, tsavorite, hessonite, Mali) sont les moins magnétiques.

La spessartine est l'espèce la plus magnétique, suivie par andradite et l'almandin.

La variété la moins magnétique parmi les Pyralspites est le pyrope chromifère

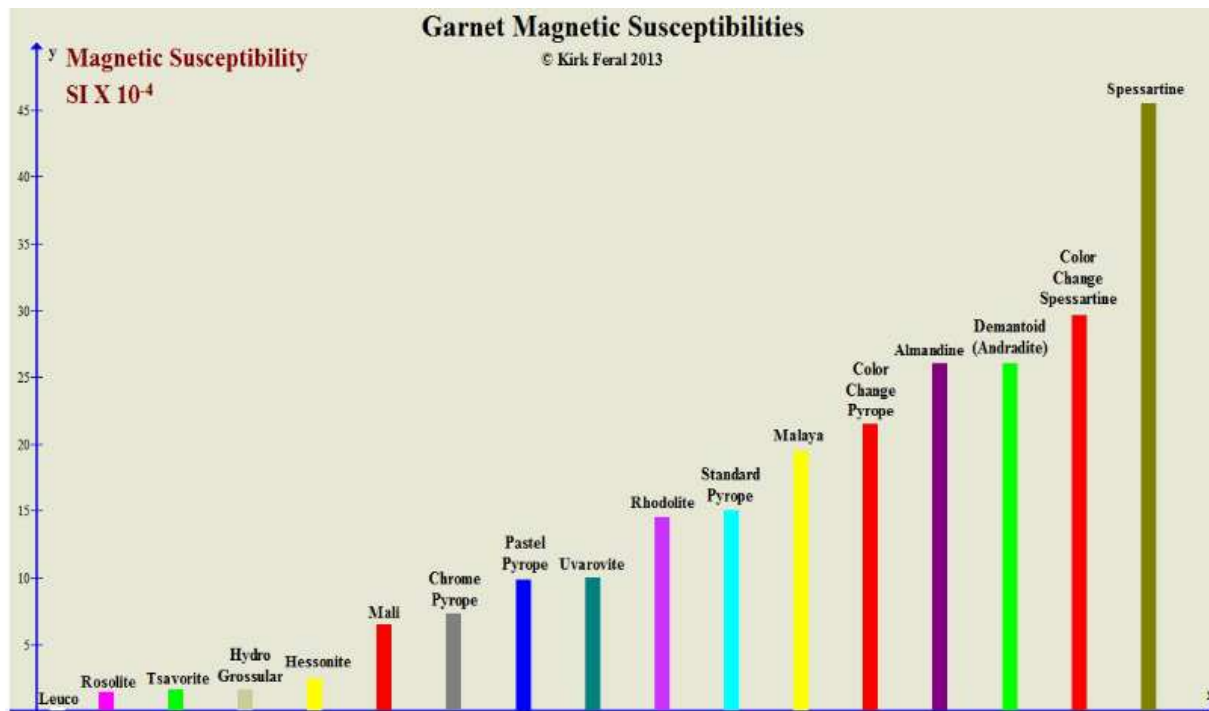


Figure 83 : Susceptibilités magnétiques relatives des grenats