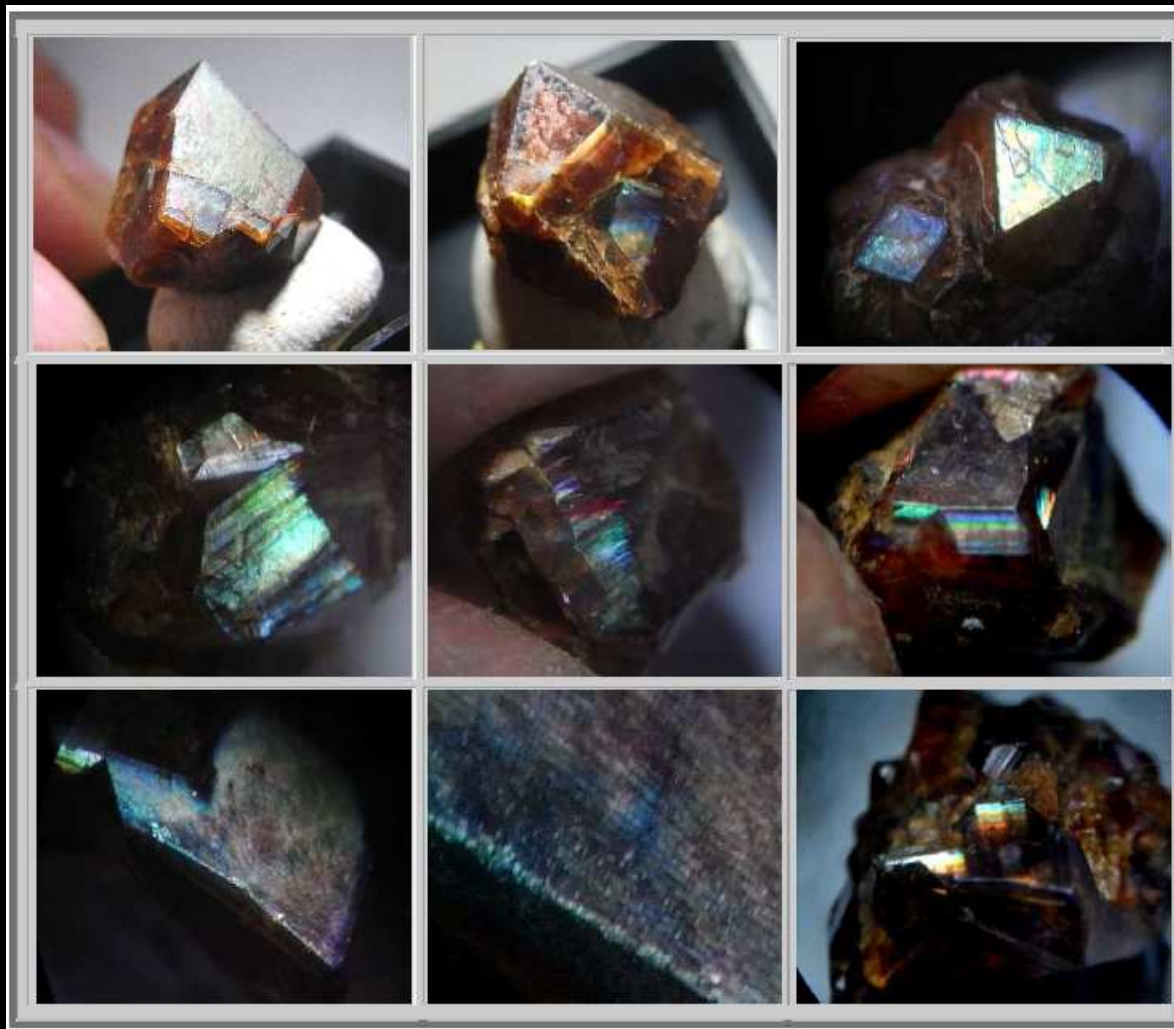


ANDRADITE IRIDESCENTE

C'est dans la localité de Nara, au Japon, que fut découvert le second site de dimension commerciale de grenats aux reflets iridescents, après Sonora, au Mexique.



Andradites iridescents du Japon, collection perso

Images 7-8-9 : même face {100} : vue d'ensemble – zoom présentant l'aspect ondulé de la surface - la face {100} transparente présente peu d'iridescence mais permet de voir l'iridescence plus importante des faces {110} des cristaux attenants, dès qu'on augmente l'angle incident.

Cependant, les grenats japonais sont très différents des pierres mexicaines, dont la couleur tend davantage vers le verdâtre et présentent une iridescence lamellaire semblable à des stries, donnant parfois un astérisme. Les grenats andradites iridescents du Japon sont, quant à eux, franchement brun-rouges avec une iridescence qui rappelle l'éclat des labradorites.

Cette iridescence est due à la structure lamellaire de ces grenats : composée de couches microscopiques alternatives dont les compositions et les épaisseurs varient.

Certaines couches sont constituées d'andradite quasi pures, d'autres d'une solution d'andradite renfermant une certaine proportion de grossulaire.

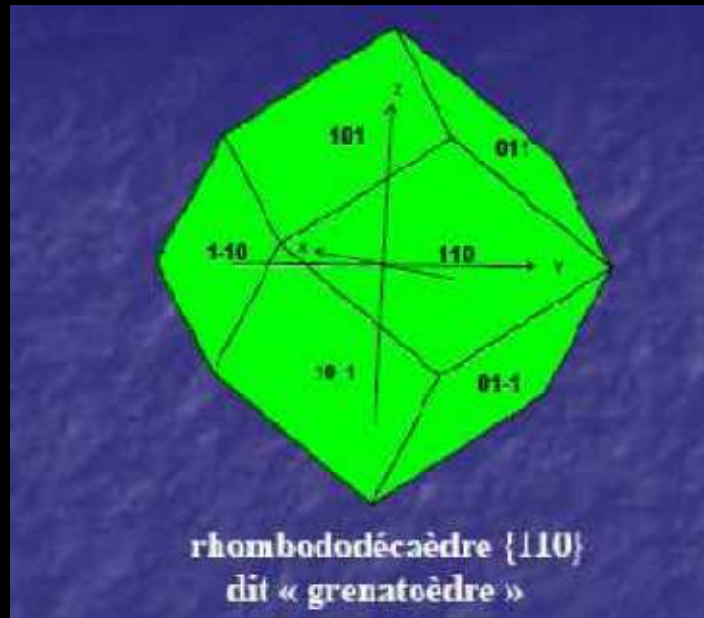
Les épaisseurs de ces couches peuvent être révélées par imagerie électronique. Elles sont telles qu'il puisse y avoir phénomène d'interférences dans le domaine du visible, comme pour des opales, lorsque la lumière frappe les arêtes de ces couches.

C'est la superposition de ces couches fines de composition différentes qui est la source d'interférence, créant ainsi ce phénomène d'iridescence de ces andradites.

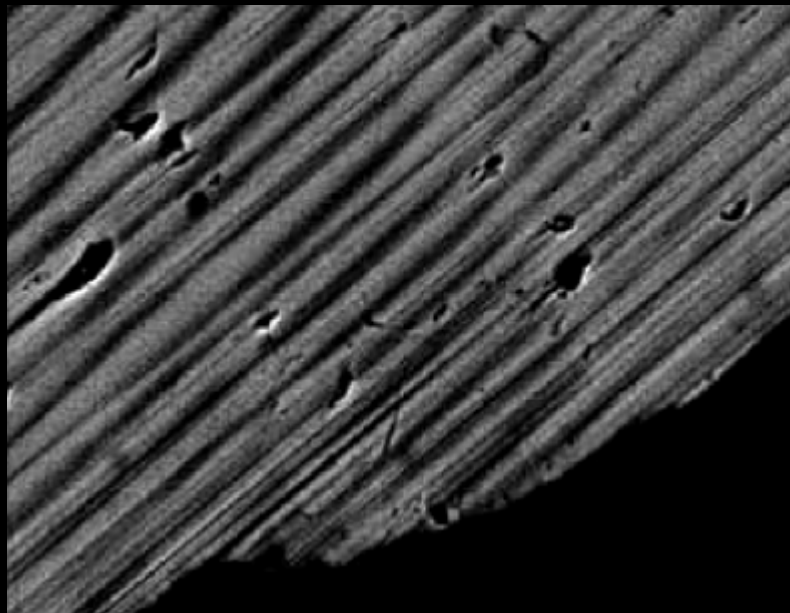
A cela s'ajoute également, un phénomène de diffraction, si l'on regarde les grenats avec un angle oblique par rapport aux faces des dodécaèdres. Ce qui explique que l'iridescence soit plus marquée quand on observe ces grenats en oblique par rapport aux faces $\{110\}$.

A contrario, le fait que l'iridescence soit beaucoup plus faible et moins colorée sur les faces $\{110\}$ peut être expliqué car il n'y a plus que le mécanisme d'interférence dues aux couches fines.

La plupart des faces ne présentent pas d'iridescence malgré leur structure ondulée car les intervalles entre les couches est trop grand pour que le phénomène d'interférence, qui existe pourtant, intervienne dans le domaine des longueurs d'onde du visible.

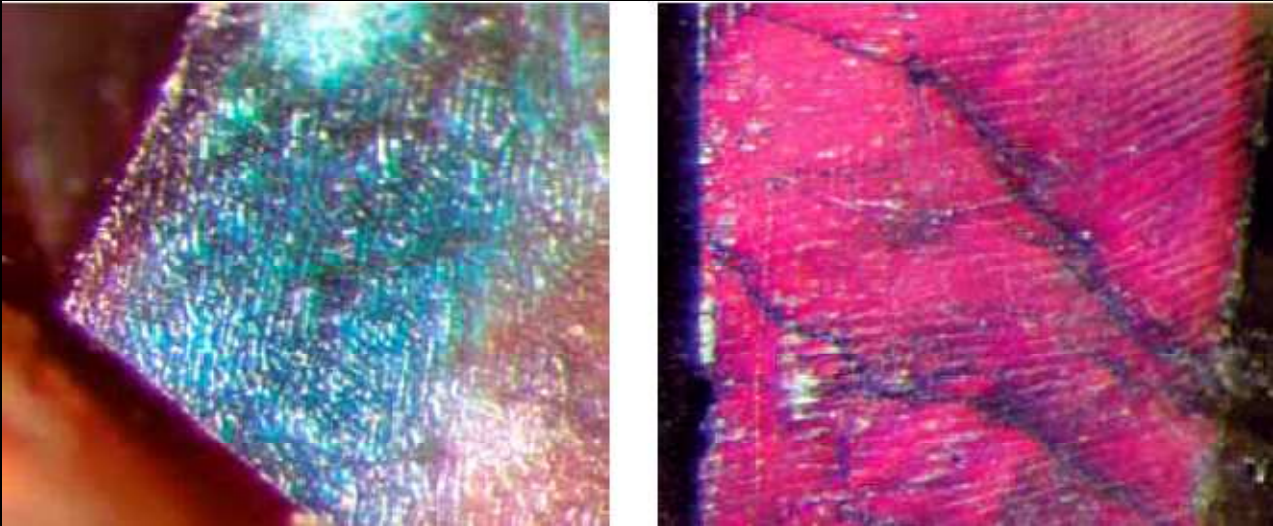


Grenats iridescents : rappel de la morphologie des grenats et de leurs faces $\{110\}$



Andradite iridescente : Image en électrons rétrodiffusés de fine lamelles parallèles au plan $\{110\}$.

Les zones brillantes, qui ont un nombre atomique moyen plus élevé, correspondent à l'andradite pure, tandis que les zones plus sombres, dont le nombre atomique moyen est plus faible) sont de l'andradite avec du grossulaire en solution. Largeur de l'image : environ $80 \mu\text{m}$



Andradite iridescente :

en plus de la structures en fines lamelles parallèles au plan {110}, il y a une structure en escalier, ondulée, de dimension plus grossière, présente sur presque toutes les faces inclinées du dodécaèdre. Ces figures produisent des couleurs iridescentes par figure de diffraction. Photo T. Hainschwang grossie 30 x (gauche) et 45x (droite)

Rappels d'optique

Interférence de matériau multicouches

Si ces deux ondes ont suivi un parcours différent, cette différence de parcours provoque un certain déphasage entre les ondes. La plupart du temps se déphasage est infime et n'est pas perçu par l'œil humain. Toutefois, si ce déphasage correspond à $k \lambda$, $k=1,2,3$, ou à $(k+1/2) \lambda$, k restant de l'ordre de quelques unités. Ce déphasage a pour effet dans le premier cas l'addition des intensités de l'onde incidente $I_{\text{interf}} = I_{\text{incid}} + I_{\text{incid}} = 2 I_{\text{incid}}$ (cas d'interférence constructive) accroissant ainsi l'aspect visuel de la lumière, et $I_{\text{interf}} = I_{\text{incid}} - I_{\text{incid}} = 0$ dans le second (cas d'interférence destructive), conduisant à l'extinction totale de l'onde. Tous les cas intermédiaires étant représentés avec des évolutions sinusoïdales.

Dans le cas d'une couche mince, il y a interférence entre le faisceau incident réfléchi par la surface du matériau et par le faisceau réfléchi par la frontière interne de cette couche fine et la couche suivante.

L'onde incidente atteint la surface du matériau avec un angle incident θ_i , une partie de cette onde est réfléchi avec le même angle θ_i . Le complémentaire de cette onde réfléchi va alors traverser la couche mince avec un angle θ_{it} , l'angle de l'onde transmise, déduit de l'angle incident par les lois de Snell-Descartes, en fonction de l'indice de réfraction du matériau.

Cette onde transmise se comporte alors comme une onde incidente sur l'interface suivante. Cette interface pouvant être soit la fin du matériau soit le limite entre deux couches successives dans le cas d'un matériau multicouche.

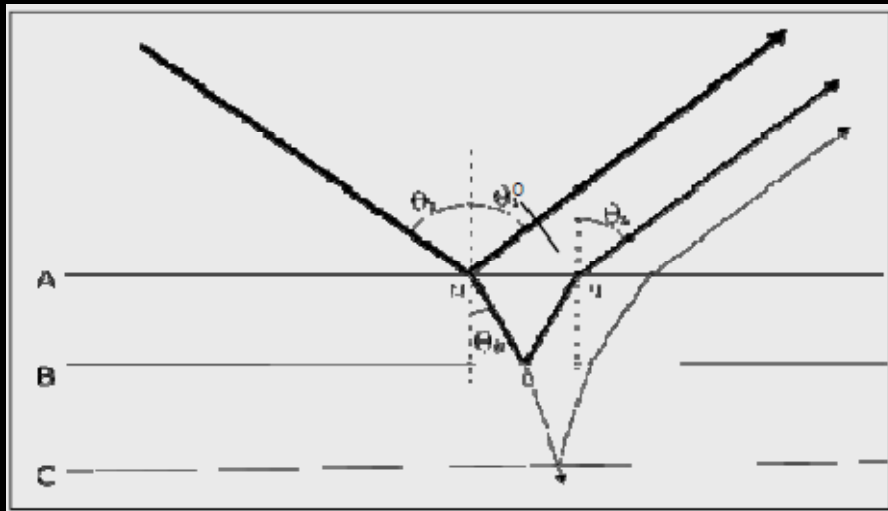
L'onde transmise se reflète donc sur cette interface, retransverse la couche du matériau une nouvelle fois et ressort du matériau. Compte tenu des indices de réfraction du matériau et de l'air, le faisceau ressort du matériau avec le même angle que l'onde réfléchi par la surface du matériau.

Il s'en déduit donc deux faisceaux, parallèles, de même longueur d'onde, entre lesquelles existe néanmoins un décalage de phase dû à la double traversée MLN de la couche fine du matériau.

Si cette longueur MLN est proche de la longueur d'onde, il y a phénomène d'interférence.

Ainsi, certaines longueur d'onde, ou couleur) peuvent voir les intensités accrue ou au contraire éteinte.

Dans le cas d'un matériau multicouches, ce phénomène se reproduit à chaque fois pour chaque nouvelle couche. Toutefois, en pratique, la grande majorité de la lumière est absorbée ou réfléchi après quelques réflexions, et l'on peut ne considérer que les deux premiers faisceaux incidents.



Interférence dues aux couches fines

Le faisceau incident est fragmenté en deux complémentaires à la surface A du matériau, le faisceau réfléchi et le faisceau transmis. Ce dernier est à son tour fragmenté sur l'interface B. L'onde transmise à travers AB et réfléchi sur B ressort du matériau après avoir parcouru la distance MLN-MO de plus que l'onde réfléchi sur la surface A.

Comme ces deux ondes réfléchies proviennent de la même source lumineuse, elles sont dites cohérentes et vont donner

un phénomène d'interférences

Ce phénomène intervient principalement sur la ou les premières couches du matériau. Il y a rapidement atténuation des ondes transmises, ce qui limite ensuite leur effet sur les interférences lumineuses.

Pour illustrer ce phénomène, prenons un exemple :

Soit une couche AB de 290 nm, avec un indice de réfraction de 1,7, l'indice de réfraction des grenats est compris entre 1,7 et 1,8 (cf paragraphe indices de réfraction)

Pour un angle incident θ_i de 39°

$$\begin{aligned} MO &= MN \sin \theta_i \\ &= 2 AB \sin \theta_i \tan \theta_{it} \end{aligned}$$

En outre,

$$n_{\text{air}} \sin \theta_i = n_{\text{grenat}} \sin \theta_{it}$$

où n est l'indice de réfraction du milieu, $n_{\text{air}}=1$

Dans ce cas, θ_{it} mesure $21,7^\circ$,
et la distance MLN-MO vaut

$$MLN - MO = 600 \text{ nm}$$

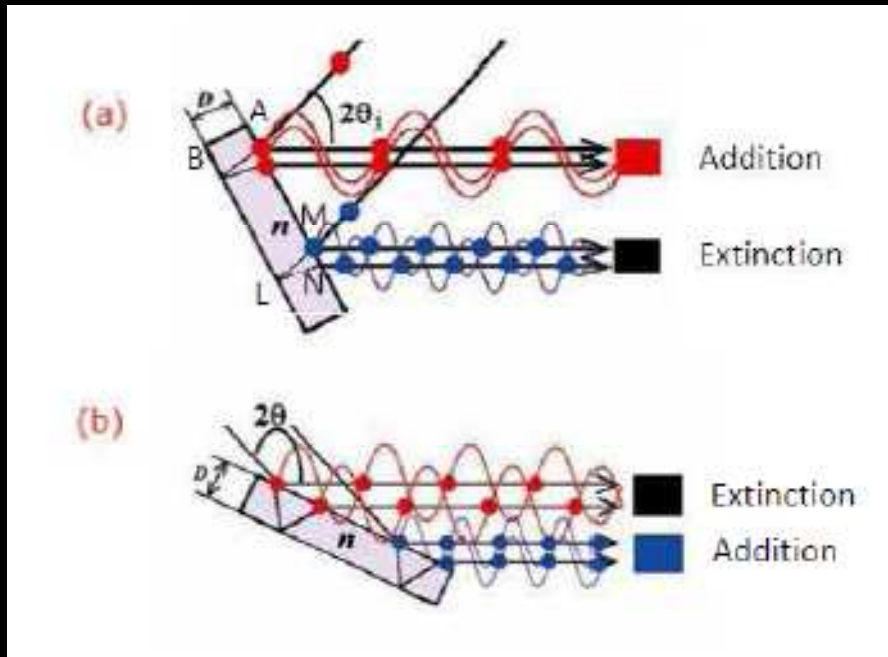
On obtient donc que si l'on regarde le grenat avec un angle incident de 39° , le déphasage entre les deux faisceaux réfléchis par la surface A et la première interface B vaut 600 nm.

Or, pour l'onde incidente de 400 nm (couleur bleu), le déphasage vaut $600 \text{ nm} = (k+1/2) \lambda$, avec $k=1$, il y a donc extinction de la couleur bleu.

Inversement, pour l'onde incidente de 600 nm (couleur jaune -orange), le déphasage vaut $600 \text{ nm} = k \lambda$, avec $k=1$, il y a donc doublement de l'intensité lumineuse.

On est dans le cas a) de la figure ci-après.

Pour un angle incident θ_i différent, $61,3^\circ$ dans notre exemple, c'est le phénomène inverse qui a lieu, à savoir que la couleur bleu est amplifiée et la couleur jaune orangé éteinte (cas b)).



Interférence dues aux couches fines

En fonction de l'incidence du faisceau lumineux, il peut y avoir amplification ou extinction des intensités lumineuses selon la longueur d'onde (ie de la couleur)

Diffraction du matériau sillonné

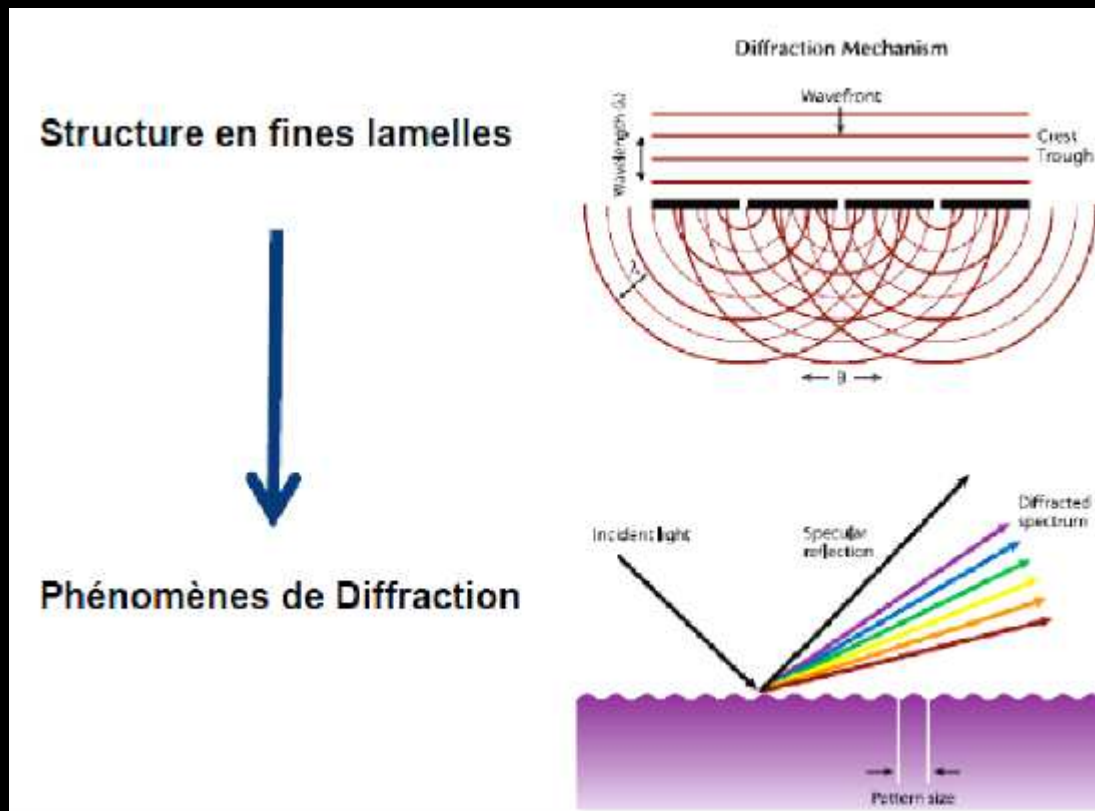
Un réseau optique plan est un système constitué d'un grand nombre d'objets diffractants appelés traits, régulièrement espacés. Les traits peuvent être des fentes séparées par des zones opaques dans les réseaux par transmission, ou des miroirs dans les réseaux par réflexion. Lorsqu'une onde électromagnétique tombe sur de tels réseaux, elle est diffractée, c'est-à-dire renvoyée dans toutes les directions par chaque trait agissant comme des sources secondaires, de sorte que les ondes renvoyées – transmises ou réfléchies – vont pouvoir interférer. Pour une longueur d'onde donnée, ces ondes seront en phase dans certaines directions et y produiront des interférences constructives; elles seront en opposition de phase dans d'autres directions et y produiront des interférences destructives. Ces directions ne dépendent alors que du pas du réseau (la distance entre les traits) et de l'angle d'incidence. Si le réseau est éclairé en lumière blanche, chaque longueur d'onde interférera de manière constructive dans une direction différente : on retrouve bien là les deux caractéristiques de l'iridescence.

Comme précédemment dans les couches minces, l'interférence entre les deux ondes est constructive lorsqu'elles sont en phase, c'est-à-dire chaque fois que la différence de marche d est un multiple entier de la longueur d'onde ($d=k\lambda$). L'existence de ces valeurs multiples k conduit à observer des ordres de diffraction, associés à des directions multiples dans lesquelles on peut observer des spectres analogues au spectre de dispersion du prisme.

Si le réseau est éclairé en lumière blanche, on constate que pour $k=0$, toutes les longueurs d'onde interfèrent de manière constructive dans la même direction (la direction de la réflexion spéculaire $i=i'$) et donnent donc une lumière blanche, mais qu'elles sont séparées, et forment donc des spectres, pour tous les autres ordres ($k=\pm 1, \pm 2, \dots$)

Pour un réseau de 1000 traits par mm et une longueur d'onde bleue $\lambda=400$ nm en incidence normale ($i=0$), k ne peut prendre que les valeurs 0, ± 1 et ± 2 correspondant à des angles de déviation de 0, $23^{\circ}30'$ et $53^{\circ}6'$. Dans le rouge à l'autre extrémité du spectre ($\lambda=700$ nm), k ne peut plus prendre que les valeurs 0 et ± 1 et l'angle de déviation est de $44^{\circ}30'$ environ.

La dispersion est d'autant plus grande que k est élevé et que la longueur d'onde est grande : à l'inverse du prisme, et dans chaque ordre, le rouge est plus dévié que le bleu.



Diffraction des ondes par deux sillons séparés de la distance d

– Ici, l'onde est transmise, il en est de même pour une onde réfléchie. Il est à noter que pour les grenats andradites iridescents, la présence d'interférence montre qu'une partie de l'onde incidente est transmise dans le matériau. Pour cette dernière la figure 15 est représentative des phénomènes optiques dans la couche AB avant réflexion par l'interface B.