

# REVUE DE GEMMOLOGIE A.F.G.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GEMMOLOGIE



ISSN 0398 - 9011

Mars 2013 - N° 183

## La spectrométrie accessible à tous Spectromètre de table GL Gem Spectrometer du Gemlab Group

Marie SCHOOR<sup>1</sup> et Jean-Claude BOULLIARD<sup>2</sup>

### INTRODUCTION

La spectroscopie est une discipline peu appréciée voire même redoutée des étudiants. Quand on sait que la plupart des spectres sont difficiles à observer et que de nombreuses gemmes ne présentent pas de spectre significatif, on est tenté de se demander pourquoi s'engager dans leur analyse.

Les arguments en faveur de la spectroscopie sont cependant incontournables. Pour le gemmologue britannique, B.W. Anderson, la gemmologie s'appuierait sur trois outils : la loupe, le réfractomètre et le spectroscope. On devrait plutôt parler ici de «gemmologie de terrain» car le spectroscope de poche est peu encombrant et il est bien souvent le seul appareil que l'on peut utiliser (avec la loupe) pour reconnaître rapidement des gemmes brutes égrissées. Il est d'une grande importance dans la détermination de plusieurs grenats et de leurs variétés. Il donne des éléments de diagnostic pour des pierres d'indices de réfraction élevés (i.e. au-dessus de 1,78, la valeur habituelle du joint optique). A un certain niveau, il permet même de différencier des gemmes naturelles de leurs homologues synthétiques.

Il y a actuellement d'excellents spectroscopes de poche accessibles sur le marché, que ce soit des spectroscopes à prisme (Krüss ou Eickhorst) ou à réseau (OPL). Malheureusement, force est de constater que certaines personnes ont de grandes difficultés à observer un spectre. Ce qui est d'autant plus dommageable lorsque l'on sait que la gemmologie de laboratoire

repose en grande partie sur la spectroscopie ou plus précisément, sur la spectrométrie, puisqu'il va s'agir de mesure. Cette mesure est souvent une courbe (appelée parfois spectrogramme et plus souvent spectre) avec en abscisse, les longueurs d'onde (ou les nombres d'onde) et en ordonnée, les mesures de l'intensité de la lumière transmise (ou absorbée).

Le coût et l'encombrement des spectromètres sont tels qu'ils sont inaccessibles à l'ensemble des particuliers. Ou plutôt étaient inaccessibles... jusqu'à la mise sur le marché du GL Gem Spectrometer du Gemlab Group. Grâce à lui, ce domaine de la gemmologie devient beaucoup plus ludique.

### LES CARACTERISTIQUES DU SPECTROMETRE

Ce spectromètre se présente sous la forme de deux petits boîtiers fixés l'un sur l'autre. L'encombrement total est faible avec des dimensions de 170 x 100 x 50mm et un poids de 510 g.

Le premier boîtier, celui du bas, contient les dispositifs de mesure. Il est connecté à un ordinateur par un câble USB. Celui du haut contient la source d'éclairage, une ampoule halogène de 10 W et un ventilateur. Il est relié à un transformateur connecté au secteur. Une petite ouverture (20 x 20 mm), évitant toute perturbation par les sources lumineuses extérieures, permet d'accéder à l'emplacement réservé à la pierre à analyser, celui-ci étant recouvert d'une pellicule de téflon pour éviter les rayures.



Figure 1 - Spectre observé au spectroscope

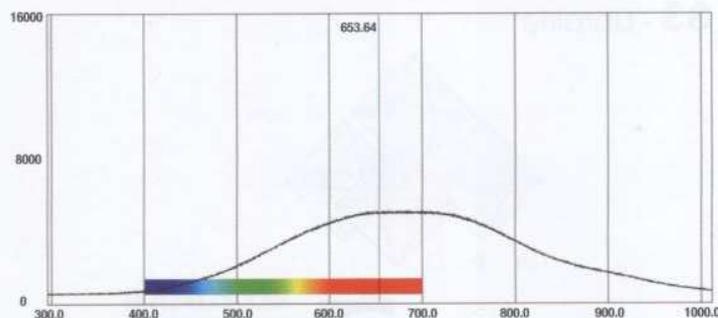


Figure 2 - Spectre (ou spectrogramme) observé au spectromètre

### Support pour l'échantillon

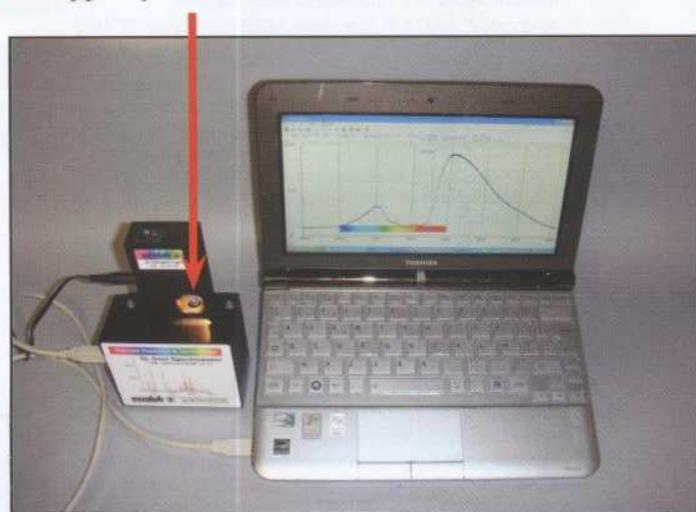


Figure 3 - Le GL Gem Spectrometer connecté à un ordinateur.

<sup>1</sup> Etudiante à l'Institut National de Gemmologie (ING), 18 rue de la Belle Feuille, 92100 Boulogne Billancourt, marie.schoor@9online.fr.

<sup>2</sup> Directeur de la collection de l'UPMC-Sorbonne universités, Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés, professeur à l'ING, Case 73, Collection des Minéraux, 4 place Jussieu 75232 Paris cedex 05 Directeur - Laboratoire Français de Gemmologie.

Le programme GLGemSpec, propose différentes options d'affichage.

Une fois l'appareil allumé et avant de mettre en place la pierre à étudier, on visualise d'abord le spectre de la source lumineuse. Il se présente sous la forme d'une courbe en cloche. Le domaine de longueur d'onde va de l'ultraviolet (UV) moyen, 300 nm, au proche infrarouge (IR), 1000 nm. On dispose du spectre visible, sur le bas de l'écran, pour se repérer (Figure 2). Cette visualisation du spectre est parfaite. D'une part, on constate qu'elle est décalée : le jaune par exemple est figuré entre 550 et 560 nm à peu près alors qu'on l'attend entre 570 et 590 nm (rappelons que le doublet jaune du sodium se situe vers 589-590 nm environ). D'autre part, le rendu des différentes couleurs n'est pas au point, le violet est absent et on voit aussi une couleur d'un beau bleu ciel qui n'existe pas dans le spectre. Ne doutons pas que ce petit désagrément sera corrigé par la suite. Pour l'instant, il faut se rappeler des correspondances couleurs-longueurs d'onde, ou bien recalcer ce que l'on voit sur l'écran avec ce que l'on voit avec le spectroscopie.

La première option consiste à poser la pierre et à en analyser le spectre émergent (spectre en transmission, figure 4). L'échelle des ordonnées est graduée en unités arbitraires (de 0 à 16.000 avant réajustement éventuel). Cette option est la plus simple et la plus naturelle car elle visualise la lumière transmise à l'œil : les maxima correspondent aux maxima de lumière reçue par l'œil. On peut directement la comparer avec ce que l'on voit avec un spectroscopie.

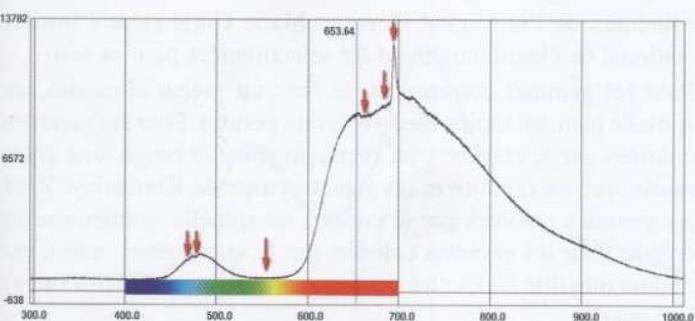


Figure 4 - Spectre d'un rubis Verneuil en transmission sans correction de la lumière incidente. Sur cette courbe, on distingue même une raie d'émission (pic maximum à la limite du rouge), souvent présente dans les rubis synthétiques. Les autres variations sont : deux raies dans le rouge, puis une large bande d'absorption (normalement entre le début du vert et le début du bleu, mais ici décalée du fait du décalage du spectre coloré) et enfin deux raies dans le bleu.

On peut aussi choisir de corriger ce spectre des variations d'intensité dues à l'éclairage de la lampe (option «lamp correction»). Le spectrogramme de la lampe sera alors une droite horizontale, comme si on avait la même intensité pour toutes les longueurs d'onde : autant de rouge que de violet, que de proche UV et proche IR (Figure 5). Le signal sur l'écran est alors égal à  $I/I_0$  où  $I_0$  est l'intensité incidente (pour une longueur d'onde donnée) et  $I$  l'intensité sortant de la pierre pour cette même longueur d'onde. S'il y a absorption, ce rapport est inférieur à 1. S'il y a émission, il peut être supérieur à 1. Les graduations de l'axe des ordonnées observées vont de -1 à 3 (0 à 3 est suffisant, il ne peut pas y avoir de rapport inférieur à 0, il s'agit là d'un aléa de programmation). Ce spectre corrigé est différent de ce

que voit l'œil. Cette correction est toutefois utile car elle permet parfois de mieux visualiser certains pics.

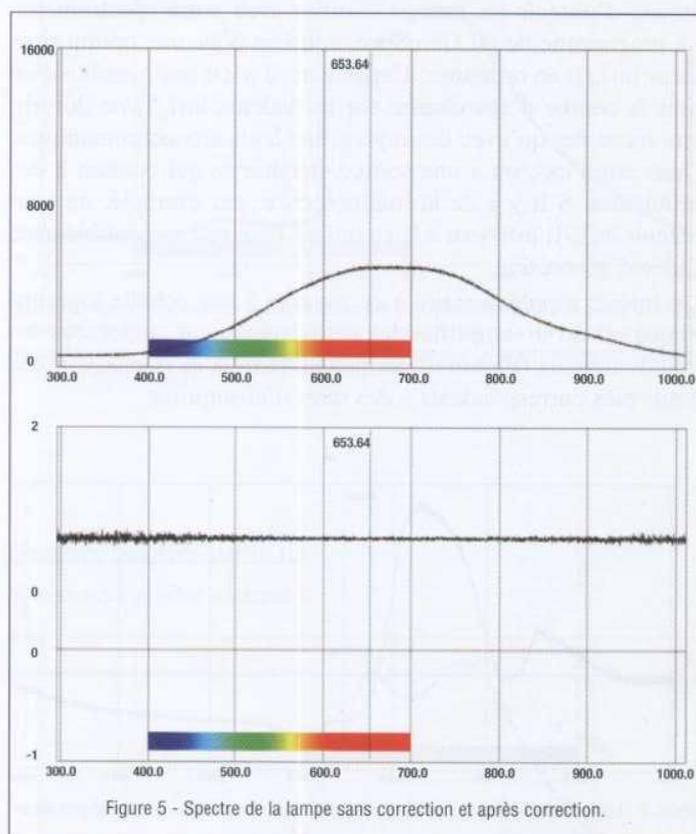


Figure 5 - Spectre de la lampe sans correction et après correction.

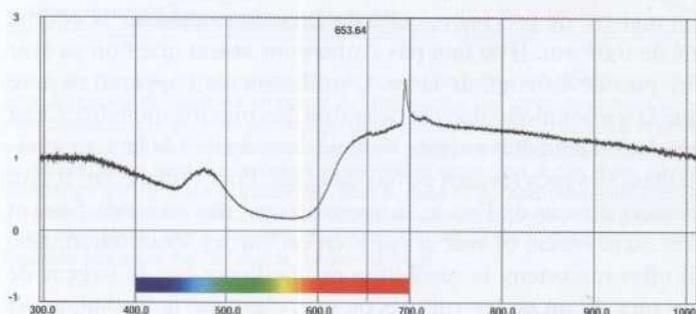


Figure 6 - Spectre du même rubis Verneuil en transmission avec correction de la lumière incidente.

Il est possible d'aller encore plus loin.

La loi de Beer-Lambert expose que l'intensité lumineuse transmise  $I$  est égale à  $I_0 e^{-\mu x}$  où, pour une longueur d'onde donnée,  $I_0$  est l'intensité incidente,  $\mu$  est le coefficient d'absorption linéaire du matériau pour cette longueur d'onde et  $x$  l'épaisseur traversée par le rayon lumineux. Les scientifiques recherchent ces coefficients  $\mu$  qui sont des caractéristiques des matériaux étudiés. Pour ce faire, on calcule le logarithme népérien du rapport  $\ln(I_0/I)$ , qui est égal à  $\mu x$  : pour un échantillon d'épaisseur constante  $x$ , le calcul donne  $\mu$ . Les courbes dites d'absorbance sont obtenues en éclairant la gemme par un dispositif envoyant une lumière monochromatique qui balaie, de proche en proche, tout le domaine de longueur d'onde. Pour chaque

longueur d'onde, l'appareil mesure et calcule  $\ln(I_0/I)$ . Ce sont ces courbes que l'on voit représentées dans les articles. Il est tentant d'obtenir les mêmes courbes avec notre spectromètre. Le programme de GLGemSpec, contient donc une option pour avoir  $\ln(I_0/I)$  en ordonnée. Cependant, il n'est pas possible d'en tirer la courbe d'absorbance car les valeurs  $\ln(I_0/I)$  ne doivent être mesurées qu'avec des rayons incidents monochromatiques. Dans notre cas, on a une source étendue ce qui conduit à des problèmes. S'il y a de la luminescence, par exemple, on peut obtenir  $\ln(I_0/I)$  inférieur à 0, ce qui est bien peu compatible avec l'idée d'absorption.

Un intérêt supplémentaire à ce passage à une échelle logarithmique est qu'il «amplifie» les petits signaux et «rapetisse» les grands signaux (Figure 6) permettant parfois de mieux voir des petits pics correspondants à des raies d'absorption.

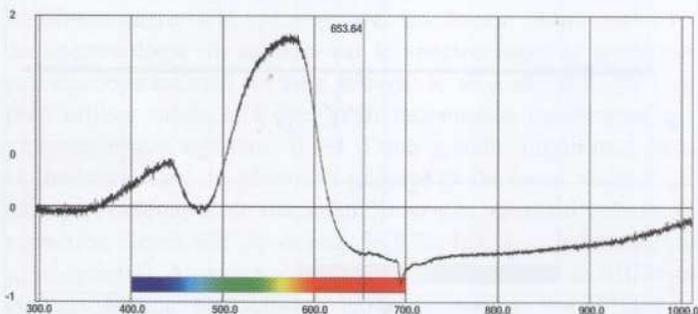


Figure 7 - Logarithme du rapport  $I_0/I$  du rubis synthétique : courbe de «pseudo-absorbance»

En matière de précision, celle du curseur mobile sur la courbe est de 0,01 nm. Il ne faut pas croire pour autant que l'on va voir des pics de 0,01 nm de large. L'utilisation de l'appareil montre que la «résolution» dans la détection des pics est moindre. Cette résolution peut être estimée comme étant égale à la largeur à mi-hauteur des pics les plus étroits détectés. Pour l'apprécier, il faut prendre des cas où l'on a, au spectroscopie, des raies très fines et très contrastées, et voir ce qu'il en est sur les spectrogrammes. Si elles ressortent, la résolution est meilleure que la largeur de ces pics. Si on ne les voit pas ou peu, c'est que la résolution est moins bonne. De plus l'élargissement, d'une raie fine, donne une estimation de la résolution. Le test sur la raie à 506 nm de l'enstatite montre que cette raie fine n'est pas détectée sur les spectres de transmission non corrigés (voir plus loin) alors qu'elle l'est, un peu, sur les courbes de «pseudo-absorbance». L'élargissement observé sur les pics comme le pic d'émission du rubis permet d'estimer que cette résolution est voisine de 5 nm.

Plusieurs fonctionnalités supplémentaires sont disponibles sur cet appareil. Ainsi, lorsque les signaux sont faibles (peu de lumière transmise), les spectres sont «bruités» : au lieu d'un trait continu il y a des va-et-vient incessants (voir figure 14). Une astuce pour limiter ce bruit est de cliquer sur l'option «box car» qui effectue de proche en proche la moyenne entre signaux voisins. Il faut choisir un nombre supérieur à 1 : si on prend 2 par exemple, au lieu de voir affichées les mesures  $x_n$  brutes on verra des mesures  $(x_n + x_{n+1})/2$ . On peut «écraser» davantage le bruit en

prenant un nombre plus grand, mais dans ce cas, on diminue la résolution et on peut exceptionnellement avoir des faux pics.

Une autre possibilité est d'empiler plusieurs spectres (avec la touche «scans»). Le niveau relatif du bruit diminue avec le nombre de spectres empilés. En effet, le niveau moyen des signaux s'additionne, pas les bruits : imaginons que pour le signal  $x_n$  du premier spectre on ait un bruit positif, il n'y a pas de raison pour le bruit du deuxième spectre soit positif et s'il l'est qu'il soit du même niveau. Si on fait N mesures identiques : la valeur moyenne du signal dépend linéairement de N alors que le bruit varie bien souvent selon la racine de N. Avec 10 pics mesurés, le résultat est déjà significatif (le nombre maximum de spectres empilables est de 64, mais la mesure devient longue).

## QUELQUES SPECTRES IMPORTANTS ET COMPARAISON SPECTROMETRE-SPECTROSCOPE

Afin de tester les qualités de ce spectromètre, nous avons choisi des pierres connues pour leur spectre bien visible au spectroscopie. Nous avons donc comparé ce que l'on voit avec ces deux instruments en vérifiant au préalable que nos résultats étaient compatibles avec ceux décrits dans la notice d'accompagnement rédigée par W. Hanneman.

Dans la plupart des cas, on a utilisé les spectres en transmission et non corrigés. Cette option est celle de la notice. Dans quelques cas, il nous a paru plus opportun d'utiliser les spectres en pseudo-absorbance (courbes  $\ln(I_0/I)$ ) car ils présentent mieux certains détails que l'on voit au spectroscopie.

Différentes gemmes, brutes ou taillées, de la Collection de Minéraux de l'université Pierre et Marie Curie et de l'Institut National de Gemmologie ont été sélectionnées pour ce test.

Pour les gemmes colorées par le fer : un grenat almandin, un spinelle bleu, un saphir bleu-vert et un périclote. Pour les gemmes colorées par le chrome : un rubis, un spinelle rouge, une émeraude, une alexandrite et un grenat pyrope de Kimberley. Pour les gemmes colorées par le cobalt : un spinelle synthétique au cobalt. Pour les gemmes colorées par le manganèse : une tourmaline rubellite et pour les gemmes colorées par les terres rares : une apatite.

Deux pierres, une enstatite brune et un zircon vert, mineures en gemmologie, mais réputées pour leur spectre assez spectaculaire au spectroscopie, ont aussi été incluses dans l'étude.

Malgré quelques variations (induites par l'intensité de la coloration, la taille de la gemme, les axes optiques...), les courbes obtenues au moyen de ce spectromètre présentent une bonne corrélation avec ceux proposés dans la notice d'utilisation.

Afin de pouvoir apprécier la sensibilité de l'appareil, on procède à un comparatif avec des observations au spectroscopie à main, ici un spectroscopie à réseau OPL. Il ressort de cette comparaison trois situations différentes : soit les résultats obtenus au spectromètre sont plus précis – ce qui est le cas le plus fréquent ; soit ils sont identiques (spinelle bleu au cobalt et tourmaline rubellite) ; soit les résultats de ce spectromètre sont moins précis et le spectroscopie permet de visualiser plus de raies d'absorption.

Les flèches rouges sur les spectrogrammes indiquent les zones d'absorption observées, à la fois, au spectromètre et au spectroscopie.

### Gemmes colorées par le chrome

#### Spectre du corindon synthétique rouge

La figure 4 présente une raie d'émission et deux raies d'absorption dans le rouge, une large bande d'absorption entre la fin de l'orangé et le milieu du vert, deux raies d'absorption dans le bleu et le cut-off (absorption) du violet (rappelons qu'il ne faut pas tenir compte des couleurs du spectre, faussé, représenté systématiquement en bas de chaque spectre).

L'observation faite au spectroscopie nous donne le même résultat. Cependant l'absorption du rouge est bien plus visible au spectromètre.

#### Spectre du spinelle rouge

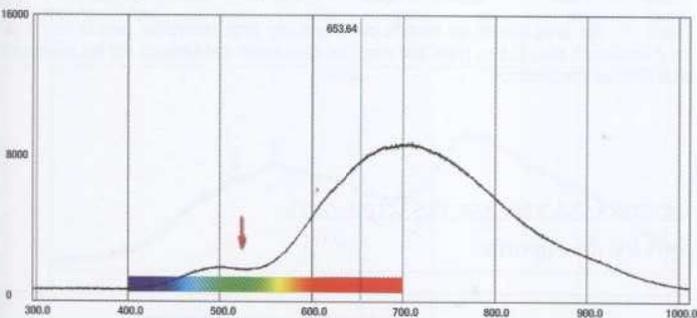


Figure 8 - Sur ce spectrogramme on voit uniquement une absorption entre la fin du jaune et le début du bleu. Avec le spectroscopie, en plus de l'absorption du vert, on observe trois raies fines d'émission dans le rouge et le cut-off de la fin du violet. Dans le cas de ce spinelle rouge, les observations spectroscopiques sont de meilleure qualité.

#### Spectre de l'émeraude

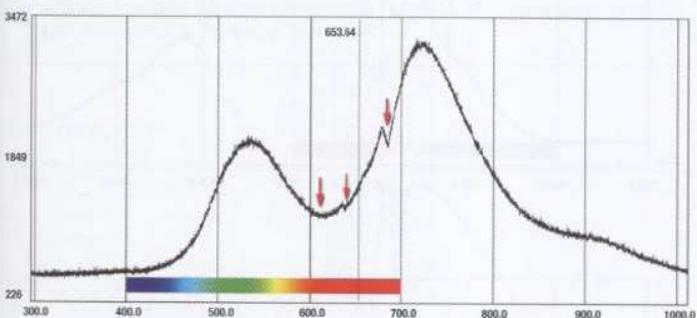


Figure 9 - Sur cette figure on distingue différentes zones d'absorption, notamment deux raies dans le rouge et une absorption faible du rouge au vert. Au spectroscopie, nous observons la même chose (l'absorption est surtout visible par l'atténuation du jaune). L'avantage avec cet appareil est qu'il nous renseigne en plus sur l'absorption dans le proche infrarouge (dans lequel on distingue une bande faible).

#### Spectre de l'alexandrite

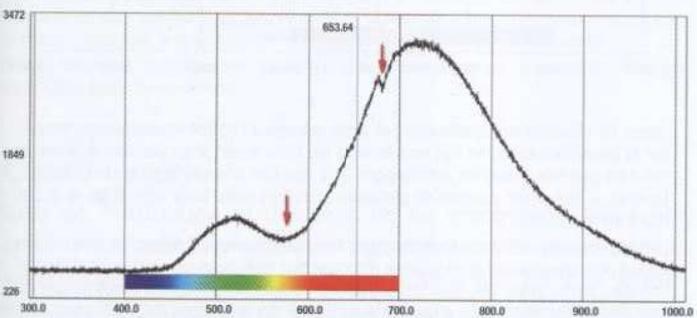


Figure 10 - Cette courbe présente un pic d'absorption dans le rouge et l'absorption de cette couleur. On voit aussi une bande d'absorption allant du jaune au vert. Au spectroscopie, on observe, en plus, 3 raies d'absorption dans le rouge. À l'œil, nous avons donc une meilleure résolution des raies dans le rouge.

#### Spectre du pyrope de Kimberley

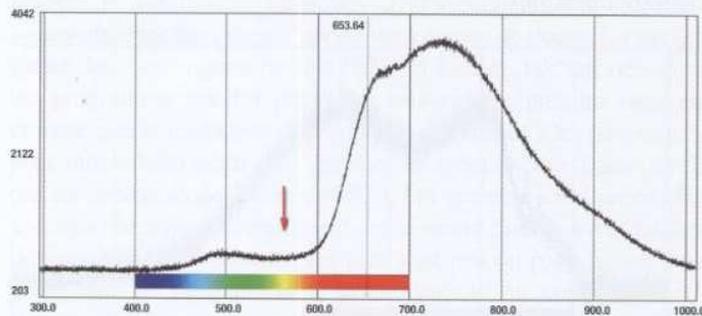


Figure 11 - Sur ce spectrogramme, on remarque des pics d'absorption dans le rouge, une large bande entre la fin du rouge et le début du bleu et une absorption de la fin du bleu au violet. Au spectroscopie, seule la bande d'absorption a été observée. Le spectromètre est beaucoup plus précis dans le rouge.

### Gemmes colorées par le fer

#### Spectre du grenat almandin

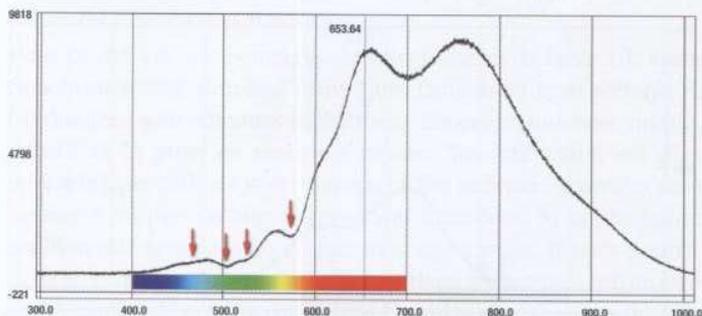


Figure 12 - Sur cette courbe, on distingue une bande d'absorption peu profonde à la limite entre le domaine du visible et l'infrarouge. On observe aussi une bande dans le vert-jaune, deux bandes dans le vert et un pic très léger dans le bleu. Au spectroscopie, nous avons vu une absorption entre la fin de l'orangé et le vert-jaune, une bande dans le vert, une bande dans le vert bleu et une bande très estompée et relativement furtive dans le bleu. Nous n'avons évidemment pas vu la bande d'absorption dans le rouge-IR et l'absorption entre l'orangé et le vert-jaune est plus nette sur le spectrogramme. Ces pics d'absorption correspondent relativement bien au spectre observé au spectroscopie à main, le spectromètre est cependant beaucoup plus précis que l'œil dans le domaine du rouge.

#### Spectre du spinelle bleu ferrique

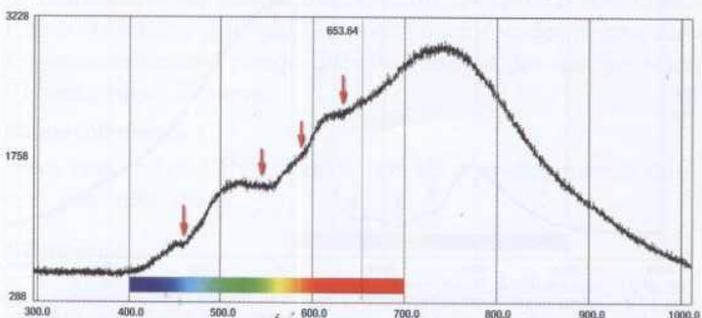


Figure 13 - Sur ce graphique, on observe une faible bande dans la limite rouge-orangé (vers 630 nm), une bosse (raie ?) dans la fin du jaune (590 nm), puis une faible bande dans le vert (centrée à 555 nm) et enfin un petit pic dans le bleu (460 nm). Comme l'indiquent les flèches, le spectroscopie confirme ces observations.

## Spectre du saphir

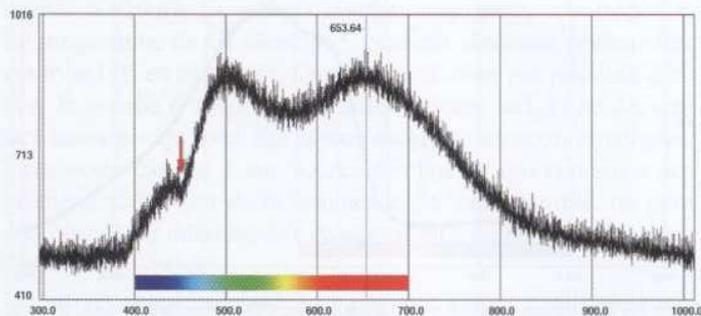


Figure 14 - Nous avons conservé les mêmes paramètres que pour les autres gemmes étudiées pour avoir un exemple de courbe «bruiteuse», a priori assez peu précise. Ceci est dû à la couleur très sombre de ce saphir. On y voit une zone assez faible d'absorption entre l'orangé et le milieu du vert et une raie d'absorption dans le bleu. Au spectroscope, nous n'avons observé aucune absorption entre l'orangé et le vert, par contre on a identifié un doublet dans le bleu (deux raies d'absorption assez estompées). Le spectromètre apporte donc une légère précision en plus de ce que l'on observe, cependant la résolution est moindre.

## Spectre du péridot

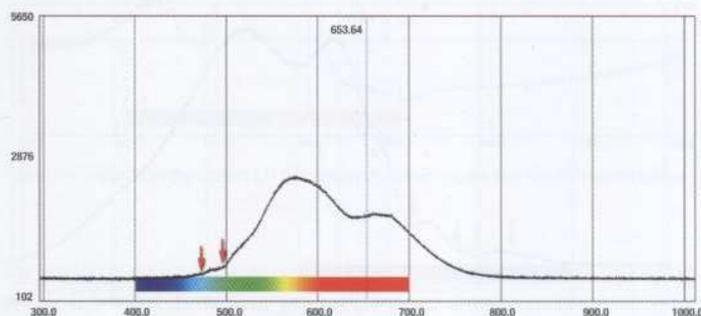


Figure 15 - Ici, on note l'absorption de l'infrarouge et une légère absorption dans le rouge. On observe également deux très légers pics d'absorption dans le bleu et une absorption du bleu et du violet. Au spectroscope, on a uniquement observé deux raies fines dans le bleu. Le spectromètre permet d'apporter une meilleure lisibilité dans le domaine du rouge visible mais on retient que les raies dans le bleu étaient plus facilement observables au spectroscope.

## Gemmes colorées par le cobalt

### Spectre du spinelle synthétique au cobalt

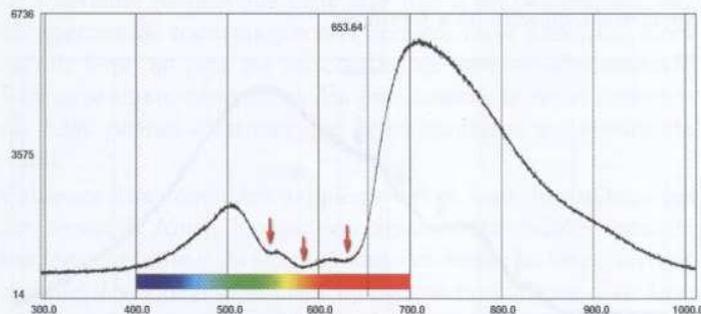


Figure 16 - Ci-dessus, on reconnaît facilement le spectre en drapeau caractéristique du spinelle au cobalt avec la bande entre la fin du rouge au milieu de l'orangé, la bande entre le début du jaune et le début du vert et la bande située dans le vert. (On note toutefois que cette dernière bande devrait se situer normalement dans le vert proche du bleu, comme sur le spectre d'absorption observé au spectroscope). Encore une fois, les deux instruments sont équivalents en terme d'observation.

## Gemmes colorées par le manganèse

### Spectre de la tourmaline rubellite

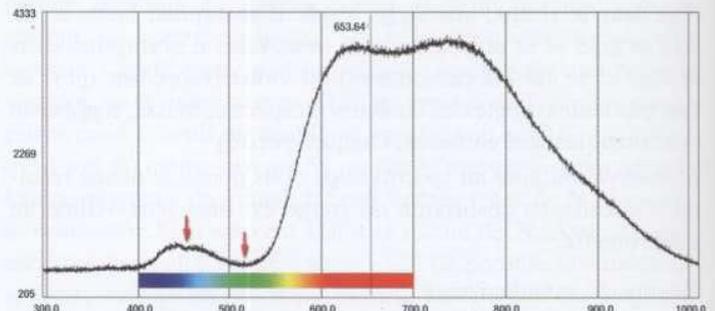


Figure 17 - Sur cette courbe, on identifie clairement une large absorption dans le vert et un pic d'absorption dans le bleu (vers 450 nm). Les deux zones d'absorption ont été clairement identifiées au spectroscope.

## Gemmes colorées par des terres rares

### Spectre de l'apatite

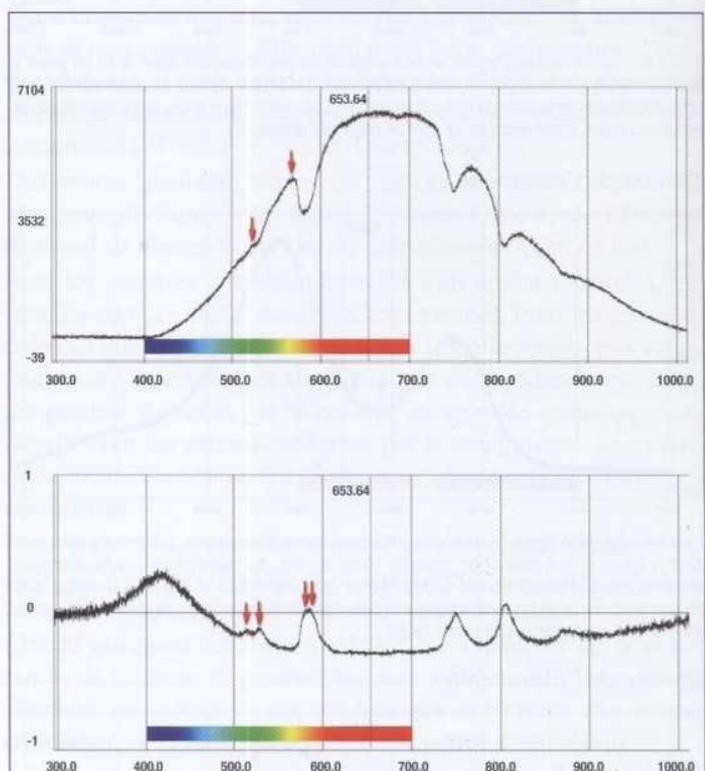


Figure 18 - Spectre de l'apatite avant et après passage à l'option «pseudo-absorbance». Sur la première courbe, on voit un très léger pic dans le vert et un pic dans le jaune, ce qui n'est pas très précis en comparaison à ce que l'on observe avec le spectroscope. En effet, à l'œil, il est possible de distinguer plusieurs raies fines dans le jaune et une raie dans le vert.

Lorsqu'on applique l'échelle logarithmique, les observations sont beaucoup plus nettes : on voit deux absorptions dans le jaune et dans le vert mais aussi plusieurs pics d'absorption dans l'infrarouge. Les deux instruments se complètent puisque le spectromètre est plus précis dans le domaine du vert et nous donne des indications de l'absorption dans l'infrarouge. En revanche, dans le jaune on observe cinq à six raies d'absorption avec le spectroscope contre deux ou trois avec le spectromètre.

## Spectres spéciaux

### Spectre de l'enstatite

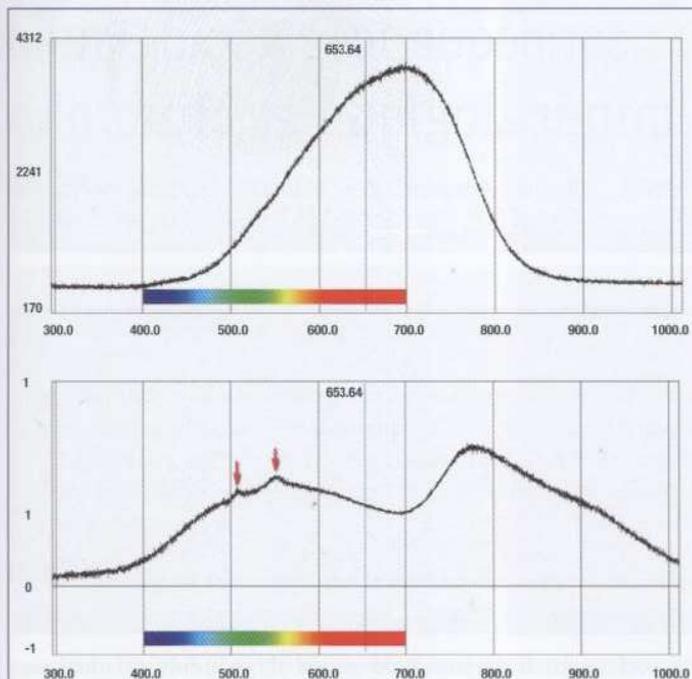


Figure 19 - Spectre de l'enstatite avant et après passage à l'option «pseudo-absorbance». Tout comme pour le cas de l'apatite, la corrélation entre le spectrogramme et l'observation au spectroscopie n'est pas bonne. En revanche avec l'échelle logarithmique, on distingue les deux pics (dans le vert jaune et dans le vert bleu). On voit également une large bande absorption à la limite du rouge et de l'infrarouge. Au spectroscopie, on ne voit que les deux raies, bien marquées, dans le vert.

### Le zircon vert

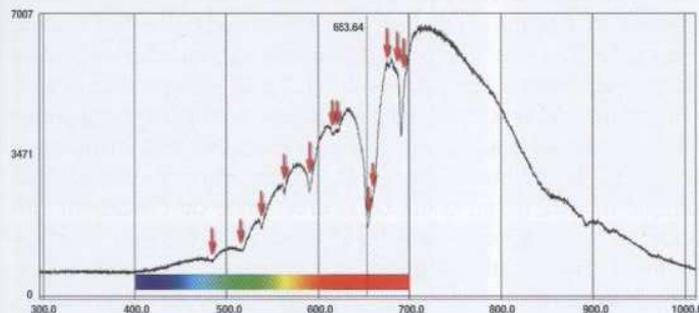


Figure 20 - Le cas du zircon vert est très intéressant car on observe les mêmes raies d'absorption avec les deux instruments. On a recensé au total douze zones d'absorption avec le spectromètre (treize avec le spectroscopie : on observe en plus une raie dans le violet).

Il est cependant important de souligner que l'observation au spectromètre est plus confortable qu'au spectroscopie.

## CONCLUSION

Lors de l'utilisation et des tests de ce spectromètre de table, nous avons constaté quelques inconvénients et de nombreux avantages. Commençons par les inconvénients. Le plus problématique est certainement la visualisation du spectre (l'échelle chromatique) qui est approximative, avec de mauvaises limites de couleurs. Le ventilateur est assez bruyant ce qui peut devenir gênant. Le support échantillon est petit et il y a des risques de

heurter le ventilateur. Quelques dysfonctionnements informatiques obligent à relancer l'application en cas de doute. La sauvegarde des spectrogrammes est dans un format .fak qui nécessite un programme spécial pour être ouvert. On prendra bien en compte que la résolution de l'appareil est limitée : les pics étroits sont moins bien contrastés qu'avec le spectroscopie (dans notre cas un spectroscopie à réseau OPL). On prendra aussi garde aux spectres «bruités» qui indiquent des niveaux faibles à très faibles de lumière : à ces niveaux, les pics sont peu ou pas visibles ; de plus, dans les options «lamp correction» et en «pseudo-absorbance», de faux signaux peuvent apparaître. On peut y remédier avec une option d'empilement de spectrogrammes successifs et/ou en moyennant les signaux.

N'oublions pas que ce spectromètre n'est pas autonome, mais nécessite un accès au secteur. C'est dommage, on aurait apprécié une source autonome (mais il est vrai qu'avec une lampe de 10 watt la batterie devient vite volumineuse si on veut une durée de marche d'une heure ou plus). Pour finir, il y a le fascicule joint qui porte sur la spectroscopie en général et sur le spectromètre qui nous intéresse en particulier. Rédigé (en anglais US) par Hanneman, il n'est pas d'une lecture pratique et on gagne à se contenter des spectres reportés à la fin.

Pour ce qui est des avantages, le spectromètre de table GL Gem Spectrometer est simple d'utilisation, facilement transportable et les données sont obtenues rapidement. Le programme est simple, intuitif et la prise en main est rapide. Son utilisation est plus agréable (que celle du spectroscopie) voire ludique : il permet de « pointer » les pics ou bien les positions attendues. Si sa résolution est bien inférieure à celle du spectroscopie à main, il nous permet de voir le comportement des gemmes dans les proches infrarouge et ultraviolet. Il nous permet aussi de voir des variations dans le spectre que l'œil ne distingue pas. Cela en fait un appareil très intéressant en complément d'un spectroscopie classique.

Les diverses comparaisons effectuées dans cette étude indiquent que les résultats de ce spectromètre sont bien reproductibles : il y a eu peu de variation entre quelques pierres de même nature que nous avons analysées et les spectrogrammes donnés dans la notice. Il faudra cependant se souvenir des pièges que l'on rencontre en spectroscopie. Dans le rouge, il peut y avoir compétition entre émission et absorption : une raie peut être en émission, en absorption ou entre les deux suivant la source d'éclairage. Par ailleurs, les pierres sombres donnent des spectres sensiblement différents des pierres claires. Enfin, les spectres sont anisotropes : la relative difficulté des positionnements des pierres dans le spectromètre rend parfois difficile l'analyse des spectres selon l'orientation de la pierre.

## Remerciements

Nous remercions l'ING pour le prêt de plusieurs pierres utilisées pour cette étude.

## Bibliographie

- B.W. Anderson, 1990, Gem Testing, Rev. by E.A. Jobbins, 10th ed. London: Butterworth.
- W.W. Hanneman, 2011, Pragmatic Spectroscopy for Gemmologists, Hanneman Gemological Instruments.
- H. Taylor, 2003, OPL A Students' Guide to Spectroscopy, OPL Press.