

# Nouvelles techniques de contrôle optique de composants en matériaux non-métalliques pour des applications horlogères

Maël Dagon, Evelyne Vallat<sup>1</sup>, Olha Sereda, Jean Gobet, Saba Zabihzadeh, Fabienne Marquis Weible<sup>1</sup>

Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique  
Jaquet-Droz 1, CH – 2002 Neuchâtel  
[info@csem.ch](mailto:info@csem.ch) – <https://www.csem.ch/Home>

<sup>1</sup> Association Suisse pour la Recherche Horlogère  
Jaquet-Droz 1, CH – 2002 Neuchâtel  
[info@asrh.ch](mailto:info@asrh.ch) – <https://www.asrh.ch/>

À travers trois exemples d'application, le potentiel de la spectroscopie optique est illustré pour la caractérisation de l'état de contrainte mécanique de composants non-métalliques rencontrés dans les assemblages horlogers. Deux méthodes sont investiguées, la microspectroscopie Raman et la microscopie en fluorescence. En s'attachant à caractériser l'état de contrainte de pierres horlogères, libres ou chassées dans une platine métallique, les deux premiers exemples mettent en évidence les différences de contraintes résiduelles présentes dans des lots de pierres de divers types; ils illustrent également l'importance ainsi que la distribution potentiellement inhomogène des contraintes présentes dans une pierre chassée. Les mêmes méthodes appliquées à l'étude d'un disque en saphir contraint par serrage démontrent la possibilité de contrôler l'état de contrainte d'un verre de montre, explicitant ainsi le potentiel de ces techniques pour le contrôle des composants et des assemblages horlogers.

## Introduction

La maîtrise de l'assemblage d'un composant horloger fragile nécessite de pouvoir garantir que les contraintes présentes dans le matériau restent inférieures à son seuil de rupture. Si plusieurs travaux ont cherché à améliorer les techniques d'assemblage en se focalisant sur une caractérisation de paramètres tels que la tenue ou la déformation, aucune étude à notre connaissance ne s'est intéressée jusqu'ici aux méthodes permettant de mettre en évidence les contraintes dans les matériaux à assembler.

Largement répandue dans de nombreux domaines techniques, la spectroscopie optique offre la possibilité de caractériser avec une haute résolution spatiale de façon non-destructive et sans contact la composition ainsi que les contraintes mécaniques dans les matériaux non-métalliques. Deux conditions sont nécessaires à l'application de cette méthode optique de la caractérisation des contraintes: d'une part le composant à caractériser doit être accessible à un faisceau lumineux incident dont une partie réfléchi sera collectée pour analyse; d'autre part un mécanisme d'interaction lumière-matière doit induire dans le matériau

du composant une modification du spectre de la lumière en fonction de son état de contrainte. Le travail présenté ici s'appuie sur deux techniques connues de longue date et adaptées aux matériaux non-métalliques (rubis, céramiques, silicium...) utilisés dans les composants horlogers: la microscopie Raman et la microscopie de fluorescence. Ces techniques ont trouvé de nombreuses applications dans des secteurs très variés, en particulier pour l'identification de la composition chimique des matériaux, et sont couramment utilisées y compris dans des environnements industriels. Dans le domaine de la microtechnique horlogère, leur utilisation industrielle est peu, voire pas exploitée.

Le principe de mesure implique l'utilisation d'un faisceau laser d'excitation, de longueur d'onde  $\lambda_{\text{laser}}$  focalisé à travers un microscope sur le matériau à analyser. Un système optique permet de collecter une partie de la lumière réfléchi dont le spectre est analysé. La spectroscopie exploite divers mécanismes d'échange d'énergie entre la lumière et la matière. Dans la microscopie de fluorescence, la lumière incidente est partiellement absorbée puis réémise

à une longueur d'onde plus élevée, le mécanisme en jeu faisant intervenir des transitions entre états électroniques de la matière. Dans les matériaux investigués dans cette étude, l'énergie des états électroniques est influencée par la présence, même sous forme de traces, de centres colorés tels les atomes de  $\text{Cr}^{3+}$  incorporés dans les rubis qui leur donnent leur couleur rouge caractéristique [2]. En microscopie Raman, les transitions en jeu impliquent des états vibrationnels entre lesquels la différence d'énergie est bien plus faible (typiquement 3 ordres de grandeur). L'échange d'énergie inélastique entre les photons de la lumière incidente et les vibrations du réseau cristallin [1] produit une modification de la longueur d'onde de la lumière rétro-diffusée par rapport à la longueur d'onde d'excitation. Le ou les décalages caractérisent les modes de vibration du réseau cristallin. Les spectres de la diffusion Raman et de la fluorescence sont sensibles à l'état de contrainte de la matière et une très légère modification de la longueur d'onde est observée par rapport au signal d'un matériau non contraint. Bien que d'origine fondamentalement différente, ces deux types de signaux optiques peuvent être mesurés avec le même instrument : un microscope micro-Raman. Ce type d'instrument est couramment utilisé en chimie pour l'identification de molécules (pigments en histoire de l'art, marqueurs en sciences forensiques), en gemmologie ainsi que dans le domaine des semi-conducteurs [3]. Dans ce dernier domaine, la microscopie Raman est utilisée en particulier pour la caractérisation de l'état de contrainte mécanique dans des dispositifs micrométriques en silicium. Dans la présente étude, cette possibilité est exploitée pour caractériser les contraintes résiduelles dans des composants libres (lots de pierres) et les contraintes totales dans des assemblages par serrage typiques d'applications horlogères (pierres chassées, glaces serrées). Ces signaux optiques sont utilisés ici comme indicateurs relatifs des contraintes mécaniques présentes dans le matériau, et non comme une mesure quantitative du champ des contraintes [4]. Ainsi les quelques exemples choisis, limités ici à des matériaux de type « céramique », ont pour but d'illustrer le potentiel d'application de ces techniques optiques pour la caractérisation de composants horlogers en matériau non-métalliques (assemblés ou non), sans entrer dans une analyse complète des causes à l'origine des variations des signaux optiques enregistrés.

Trois cas d'application sont étudiés :

- La distribution statistique des contraintes internes résiduelles présentes dans des lots de pierres horlogères, caractérisée sur des pierres libres en rubis, corindon et zircon ;
- L'état de contrainte de rubis chassés, caractérisé sur un mouvement commercial ainsi que sur une platine métallique expérimentale ;
- L'état de contrainte d'un disque en saphir contraint par serrage.

## Expérimentation

Tous les résultats de cette étude ont été obtenus sur un microscope Raman Horiba Jobin Yvon HR Evolution équipé d'un laser d'excitation vert de longueur d'onde  $\lambda_{\text{laser}} = 532\text{nm}$  avec un objectif de microscope x50LWD (*Long Working Distance*). Dans cette configuration optique, la résolution spatiale latérale de la mesure est estimée à  $2\mu\text{m}$  tandis que la profondeur de champ est d'environ  $10\mu\text{m}$ . L'instrument est placé dans un laboratoire climatisé, dans lequel la température ambiante respecte une stabilité de longue durée de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Pour les matériaux étudiés, les spectres Raman sont acquis avec l'illumination maximale du laser (100 mW à la sortie du laser) et une durée d'exposition d'environ 3 s, alors que les spectres de fluorescence sont acquis avec une puissance du laser atténuée d'un facteur 10 à 100 au moyen d'un filtre et un temps d'exposition de 1 s. On peut noter ici que pour les matériaux étudiés, le signal de fluorescence est nettement plus intense que le signal Raman. Cette observation n'est toutefois pas généralisable. L'exemple caractéristique d'un spectre Raman et d'un spectre de fluorescence obtenus sur un rubis horloger est donné à la figure 1.

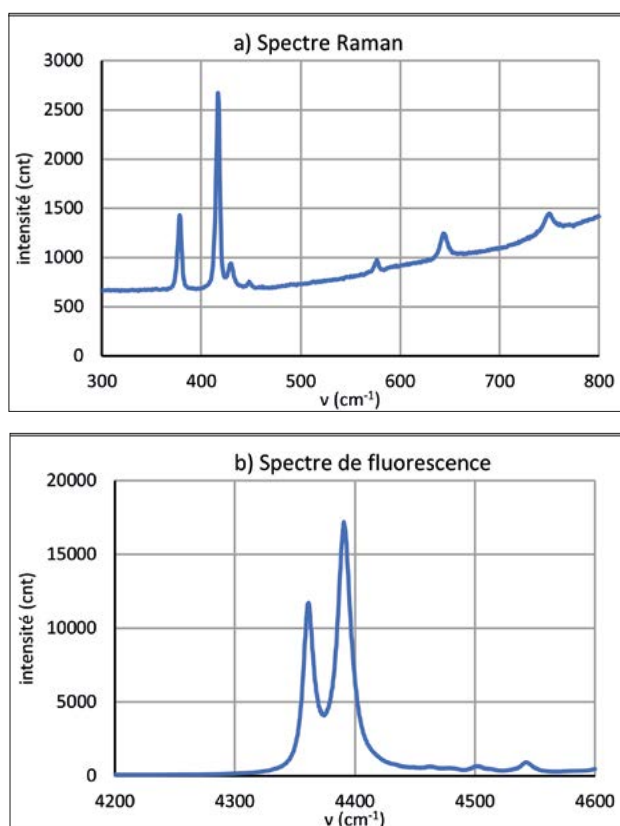


Fig. 1 : Exemples typiques a) d'un spectre Raman et b) d'un spectre de fluorescence obtenus au même endroit sur un rubis horloger. L'origine de l'axe x correspond à la longueur d'onde du laser d'excitation.

Ces deux spectres représentent l'intensité du faisceau retro-diffusé (lumière collectée par l'objectif du microscope) par l'échantillon en fonction du nombre d'onde ( $\nu = 1/\lambda$ ). Les spectres sont affichés de manière relative à la longueur d'onde d'excitation ( $\nu = 1/\lambda_{\text{laser}} - 1/\lambda_{\text{rétrodiffusée}}$ ). Le spectre Raman du rubis se compose principalement de cinq pics, situés respectivement à  $\nu = 378, 416, 576, 643$  et  $750 \text{ cm}^{-1}$  pour une longueur d'onde d'excitation de  $532 \text{ nm}$ . L'intensité relative des trois derniers pics dépend du couplage entre la polarisation du faisceau d'excitation et l'orientation cristalline du composant examiné. Le spectre de fluorescence quant à lui présente deux lignes caractéristiques d'émission du  $\text{Cr}^{3+}$  à  $\nu = 4360$  et  $4390 \text{ cm}^{-1}$  [2]. Que ce soient les pics Raman ou ceux de fluorescence, leur position se décale sous l'effet d'une contrainte mécanique élastique [5], [6]. L'étude réalisée se concentre sur ce décalage, qu'il est proposé d'exploiter comme indicateur de contrôle de l'état de contrainte.

Afin de déterminer le décalage d'un pic choisi sur le spectre, un traitement automatisé des données permet de soustraire la ligne de base et d'ajuster ensuite une fonction de type Gaussienne-Lorentzienne (profil pseudo-Voigt) à la mesure afin d'en extraire la position du maximum du pic. Dans cette étude, l'analyse se limite à un seul pic, choisi à  $\nu = 416 \text{ cm}^{-1}$  dans le spectre Raman et à  $\nu = 4390 \text{ cm}^{-1}$  dans le spectre de fluorescence. Pour s'affranchir d'éventuelles dérives de l'instrument, potentiellement liées à son environnement (température), un spectre de référence est mesuré périodiquement sur un composant de référence. Le décalage entre la position  $\nu$  du pic choisi, mesuré sur le composant de référence ( $\nu_{\text{ref}}$ ) et mesuré sur le composant sous analyse ( $\nu_{\text{mes}}$ ), est l'indicateur enregistré. Il est exprimé sous la forme  $\Delta\nu = \nu_{\text{mes}} - \nu_{\text{ref}}$ .

Dans la configuration optique utilisée, le signal optique provient d'un petit volume de matière de dimension typiquement cylindrique de rayon  $r = 2 \mu\text{m}$  et de hauteur  $h = 10 \mu\text{m}$ . La lumière d'excitation n'étant que partiellement absorbée, le volume investigué peut être balayé sur toute la profondeur des composants étudiés. Sauf précisé différemment, les résultats présentés ci-dessous correspondent à des valeurs moyennes obtenues sur 8 positions radialement symétriques et localisées directement sous la surface du composant. La figure 2 illustre la répartition des points de mesure sur les pierres horlogères libres et sur celles du mouvement commercial. La taille du faisceau focalisé permet l'acquisition de spectres à de très nombreux endroits de la pierre horlogère.

## Résultats

### Pierres libres

Dans cet exemple d'application, des pierres de type «pierre de palier sans creusure» mises en forme à des dimensions de  $20\text{-}140\text{-}20$  [1/100mm] ont été investi-

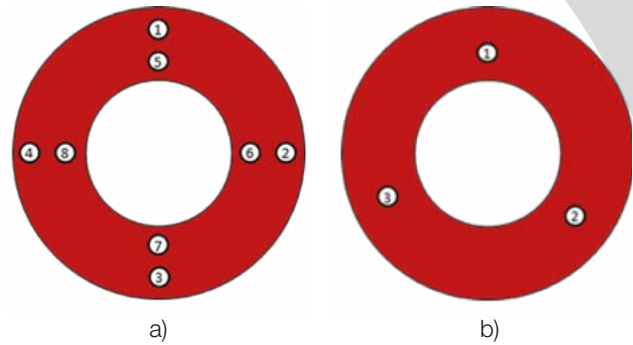
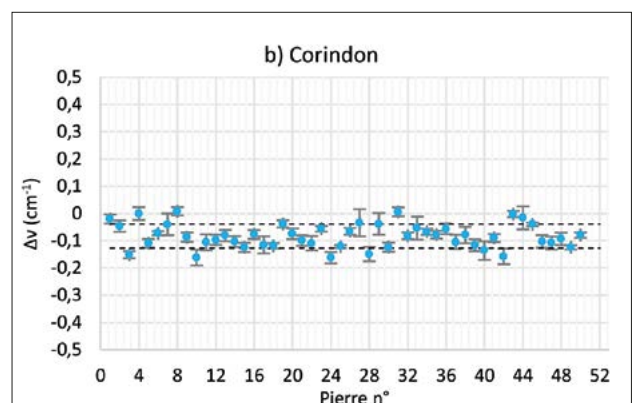
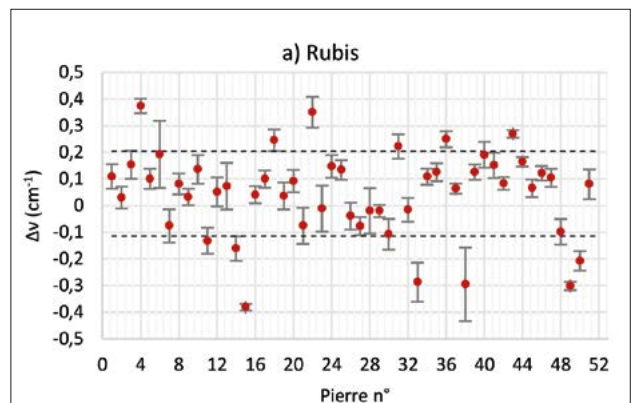
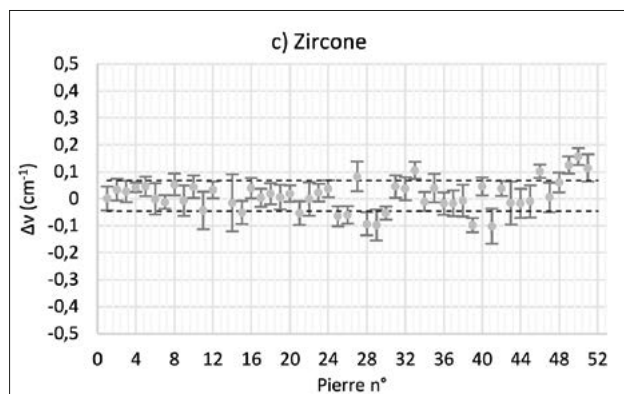


Fig. 2: a) Répartition des huit points de mesure sur une pierre horlogère libre et b) des trois points de mesure sur les pierres du mouvement. Une pierre horlogère mesure typiquement  $1.5 \text{ mm}$  de diamètre.

guées. Trois lots commerciaux de 50 pierres sont caractérisés en fluorescence, la position des pics de fluorescence étant mesurée individuellement sur chacun des 50 composants du lot. Les trois lots sont composés respectivement de pierres en rubis monocristallin ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_3\text{O}_2$ ) élaboré par la technologie Verneuil, de pierres en corindon monocristallin ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de pierres en zirconne ytriée polycristalline ( $\text{ZrO}_2$  (95 %) +  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (5 %)). La figure 3 présente la distribution du décalage du pic de fluorescence à  $4390 \text{ cm}^{-1}$  mesuré dans les trois lots. Comme mentionné plus haut, la valeur  $\Delta\nu = 0$  est donnée par le résultat de la mesure d'un composant de référence arbitrairement choisi comme le premier composant tiré du lot.





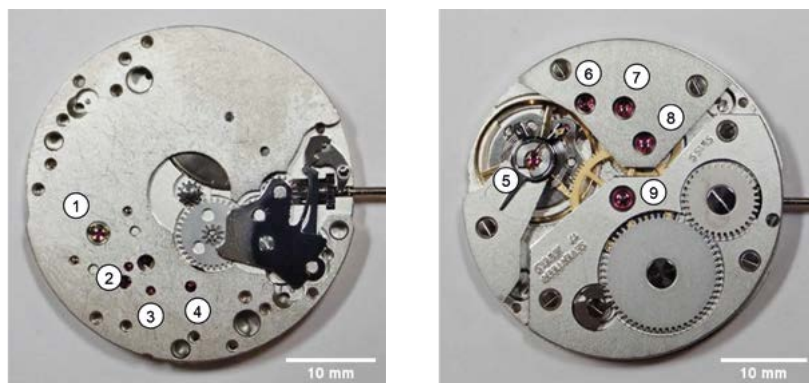
Matériau	Composition	Structure	$\sigma$ (cm <sup>-1</sup> )
Rubis	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Cr <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	Monocristallin	0.16
Corindon	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Monocristallin	0.04
Zircone Ytrée	ZrO <sub>2</sub> (95 %) + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5%)	Polycristallin	0.06

Fig. 3: Mesure de la distribution des décalages  $\Delta\nu$  mesuré sur le pic de fluorescence à 4390 cm<sup>-1</sup> dans 50 pierres de palier commerciales en a) rubis, b) corindon c) zircone ytrée. Le décalage est évalué arbitrairement par rapport à la position des pics mesurés dans le premier composant tiré du lot. Les lignes pointillées représentent l'écart-type à la moyenne  $\sigma$  calculée sur le lot, dont la valeur est indiquée dans le tableau récapitulatif. Les barres d'erreur représentent l'écart-type des 8 points de mesure effectués sur le pourtour de la pierre.

Si l'échantillon de référence n'a pas de contraintes résiduelles, un décalage négatif ( $\nu_{\text{mes}} < \nu_{\text{ref}}$ ) indique une augmentation des contraintes résiduelles en traction, alors qu'un décalage positif (vers les grands nombres d'onde) indique une augmentation des contraintes en compression [2]. Les résultats des mesures permettent de constater que la plage de distribution des contraintes résiduelles dans le lot est réduite dans les pierres de corindon en comparaison à celle observée dans les cristaux de rubis (écart-type  $\sigma_{\text{corindon}} = 0.04 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\sigma_{\text{rubis}} = 0.16 \text{ cm}^{-1}$ ). Le choix d'une pierre polycristalline comme de la zircone ytrée permet d'atteindre un écart type de la distribution des décalages similaire à celui mesuré pour le corindon.

### Pierres chassées

Afin d'illustrer le potentiel d'application des mesures optiques sans contact à un produit horloger commercial, la microscopie Raman et la microscopie de fluorescence ont été utilisées pour contrôler l'état de serrage des pierres sur un mouvement commercial ETA 6498-1. Seules les pierres directement accessibles visuellement ont été caractérisées. Illustrées à la figure 4, 9 pierres sont concernées, 4 côté cadran et 5 côté pont. Pour chaque pierre la grandeur analysée est la position du pic choisi, soit le pic à  $\nu = 416 \text{ cm}^{-1}$  dans le spectre Raman et celui à  $\nu = 4390 \text{ cm}^{-1}$  dans le spectre de fluorescence.



	Pierre	Raman ( $\nu \pm \sigma$ ) cm <sup>-1</sup>	Fluo ( $\nu \pm \sigma$ ) cm <sup>-1</sup>
Côté cadran	1 Balancier	417.18 ± 0.03	4394.79 ± 0.07
	2 Échappement	417.59 ± 0.05	4396.1 ± 0.1
	3 Seconde	417.9 ± 0.1	4396.9 ± 0.3
	4 Moyenne	417.7 ± 0.2	4396.6 ± 0.1
Côté ponts	5 Balancier	417.36 ± 0.02	4394.84 ± 0.00
	6 Échappement	417.5 ± 0.1	4395.3 ± 0.2
	7 Seconde	417.46 ± 0.05	4395.7 ± 0.1
	8 Moyenne	417.59 ± 0.06	4395.5 ± 0.1
	9 Centre	417.9 ± 0.1	4395.9 ± 0.1

Fig. 4: Photographie du mouvement ETA 6498-1 avec l'indication des pierres caractérisées. Le tableau fournit les valeurs de la position du pic Raman autour de 416 cm<sup>-1</sup> et du pic de fluorescence autour de 4390 cm<sup>-1</sup>. Plus la valeur de cet indicateur est élevée, plus la contrainte en compression est grande.



L'analyse des résultats de la figure 4 montre que la position du pic en fluorescence suit linéairement celle du pic de Raman. On note que les pierres de balancier d'un côté et de l'autre du mouvement sont celles qui présentent les positions des pics les plus basses. Il s'agit ici d'une observation attendue car ces pierres ne sont pas chassées dans la platine ou les ponts comme les autres, mais maintenues presque sans contrainte dans les anti-chocs.

Dans un autre exemple d'application, des pierres en rubis (diamètre 1.6mm, épaisseur de paroi 0.2mm, hauteur 0.25mm) ont été chassées dans une platine en acier Dur-nico (épaisseur 1 mm) dans laquelle 30 alésages de diamètre variable ont été préalablement usinés. Mesurés individuellement avec une précision de  $\pm 1 \mu\text{m}$ , ces alésages ont permis de réaliser des serrages variables, l'interférence (différence de diamètre entre l'alésage et la pierre) augmentant incrémentalement. Nominale, les diamètres de deux alésages successifs sont identiques et le diamètre augmente de  $+1 \mu\text{m}$  à chaque incrément. Dans la platine, les alésages 1 et 2 sont usinés de manière à atteindre une interférence nominale identique de  $2 \mu\text{m}$ . Le couple d'alésages suivants (3 et 4) a nominale le même diamètre avec une interférence de  $3 \mu\text{m}$  et ainsi de suite pour atteindre une interférence nominale de  $16 \mu\text{m}$  pour les alésages 29 et 30. L'écart-type sur le diamètre du lot de pierre chassées a été caractérisé, il est de  $\pm 1 \mu\text{m}$ . La configuration de la platine d'essai est illustrée à la figure 5.

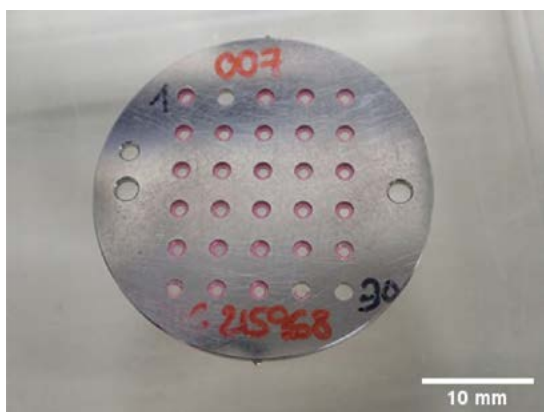


Fig. 5: Photographie de la platine d'essai dans laquelle des rubis provenant d'un même lot ont été chassés. De diamètre variable, les alésages sont numérotés de 1 (serrage minimal, interférence nominale de  $2 \mu\text{m}$ ) à 30 (serrage maximal, interférence nominale de  $16 \mu\text{m}$ ).

La figure 6 présente le décalage du pic Raman à  $416 \text{cm}^{-1}$  en fonction du numéro de l'alésage.

On peut noter les tendances générales suivantes: les valeurs des décalages du pic Raman  $\Delta\nu$  sont généralement positifs ce qui traduit la présence de contraintes mécaniques en compression dans les pierres. L'augmentation progressive du décalage  $\Delta\nu$  avec le numéro de l'alésage observée sur la figure 6 est la signature de l'augmentation des

contraintes dans la pierre avec l'interférence. Pour les alésages n° 24-25-27-29 (marqués d'un ⚡) on observe que  $\Delta\nu$  diminue brutalement, ce qui coïncide avec l'observation visuelle de fissuration ou de rupture de la pierre. Dans ce cas, les contraintes de serrage sont relaxées et on s'attend effectivement à mesurer une valeur de  $\Delta\nu$  négligeable (par rapport au pic mesuré dans une pierre libre). Finalement, la variabilité des décalages mesurés d'un alésage à l'autre est une indication de la difficulté de contrôler l'état de contrainte dans des pierres où la dispersion des contraintes internes est relativement grande (cf. Fig. 3 a) et où l'état de contrainte externe (serrage) est difficile à contrôler (maîtrise simultanée des dimensions de l'alésage et de la pierre).

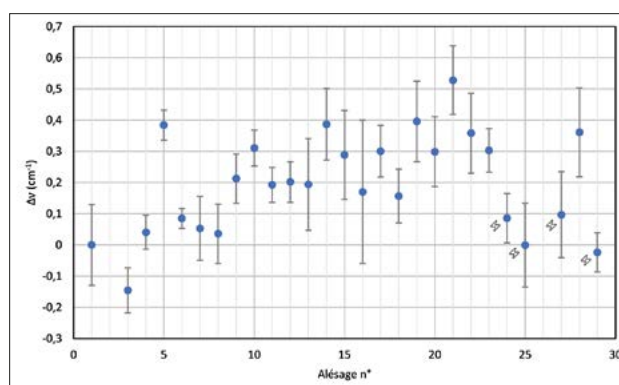


Fig. 6: Décalage du pic Raman  $\Delta\nu$  autour de  $416 \text{cm}^{-1}$  relatif à l'alésage n°1 (pris comme référence) sur des pierres chassées dans des alésages de diamètre augmentant incrémentalement de  $+1 \mu\text{m}$  entre chaque paire de numéros. Les couples d'alésages 1-2, 3-4, ..., 7-8 et 9-10, etc. ont nominale un diamètre identique. Le point bleu représente la valeur moyenne de  $\Delta\nu$  évalué par rapport au signal mesuré sur la pierre n°1, l'écart-type résultant de la mesure de 8 points par pierre est indiqué par des barres d'erreur.

### Verres serrés

Dans cet exemple d'application, des disques en corindon de diamètre 12mm, épaisseur 0.8mm sont serrés progressivement dans une pince de machine-outil type REGO-FIX ER25 (DIN 6499) à 8 mors. La position du pic de fluorescence à  $\nu = 4390 \text{cm}^{-1}$  est mesurée sur un diamètre du disque en fonction de l'angle de serrage des clés de la pince.

La figure 7 présente le décalage du pic de fluorescence mesuré sur un diamètre du disque en fonction de la position radiale, pour différents serrages. On observe un décalage progressif du pic, plus ou moins uniforme sur tout le diamètre, vers les plus grands nombres d'onde, indiquant l'augmentation progressive de la compression du disque. À partir d'un angle de serrage de 180 degrés et jusqu'à 360 degrés, la position du pic de fluorescence ne varie pratiquement plus: la pièce est tenue et la pince reprend élastique-

ment l'augmentation du serrage exercé sur les mors. Juste avant la rupture du disque, la distribution des décalages devient très inhomogène.

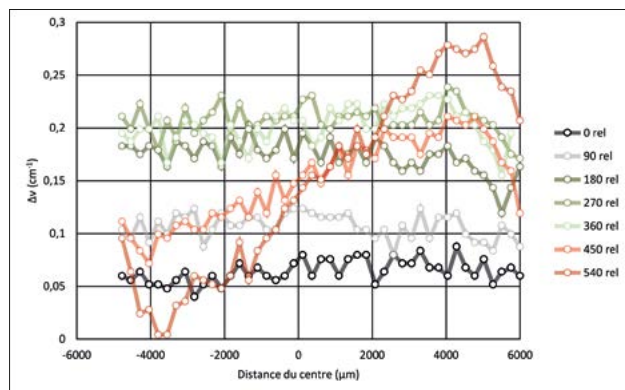


Fig. 7: Décalage du pic de fluorescence autour de  $\nu=4690\text{cm}^{-1}$  en fonction de l'angle de serrage des clés d'une pince de serrage «REGO-FIX», mesuré sur un disque en corindon. La distribution radiale des décalages augmente progressivement et homogènement jusqu'à un serrage de 180 degrés avant de rester stable jusqu'à 360 degrés. À partir d'un serrage de 450 degrés, c'est à dire juste avant la rupture du disque, la distribution des décalages devient très inhomogène.

## Discussion

Les conditions expérimentales d'acquisition de spectre Raman ou de fluorescence sont généralement différentes. Le signal Raman est fonction de la composition moléculaire ainsi que de la structure du matériau, alors que le signal de fluorescence est déterminé par les caractéristiques d'absorption optique du matériau, fréquemment liées à la présence de défauts de type «centre colorés» dans les matériaux céramiques qui ont été choisis pour cette étude. Pour ceux-ci, le signal Raman est notablement moins intense que le signal en fluorescence, ce qui se révèle par la différence des conditions d'acquisition des spectres décrites dans le paragraphe "Expérimentation", page 40. Dans les matériaux étudiés, le décalage du pic de fluorescence est plus important que le décalage du pic Raman (cf tableau figure 4 en page 42). La sensibilité de la mesure du décalage des pics de fluorescence est par conséquent plus élevée que celle de la mesure du décalage des pics Raman. Le système optique requis pour obtenir un spectre Raman est également plus complexe que celui nécessaire à l'acquisition du spectre de fluorescence. C'est là où le microscope Raman de recherche utilisé dans cette étude présente l'avantage de permettre les deux types de mesures. Pour une application industrielle du contrôle des contraintes dans des composants en matériau non-métallique de taille horlogère, il serait envisageable d'utiliser spécifiquement le décalage des pics de

fluorescence selon l'application déterminée d'après les besoins industriels, une instrumentation plus simple serait alors suffisante. Néanmoins, la richesse de l'information contenue dans les spectres Raman (cinq pics pour le rubis, signal présent dans la plupart des oxydes métalliques et des semi-conducteurs) ainsi que la dépendance du signal en fonction de la cristallographie offrent le potentiel de pousser l'analyse jusqu'à établir la distribution du champ des contraintes [4], ce qui dépasse le cadre de cette étude.

La caractérisation des contraintes résiduelles dans des lots de 50 pierres de palier horlogères élaborées dans différents matériaux montre que la dispersion du signal optique est la plus importante dans les rubis. La cause de cette dispersion n'est pas encore confirmée expérimentalement, cependant l'une des hypothèses supposées est que la présence de contraintes résiduelles plus élevées dans le rubis en comparaison avec le corindon est liée à la présence du  $\text{Cr}^{3+}$  introduit à quelques % de la masse au cours de l'élaboration du monocristal. Le chrome est incorporé par substitution de l'aluminium dans le réseau cristallin et toute inhomogénéité dans sa distribution spatiale lors de l'élaboration du cristal engendrera des contraintes internes et une variation du signal optique [5].

Les résultats des mesures du signal optique Raman sur les pierres chassées dans une platine expérimentale permettent de classer les décalages  $\Delta\nu$  en trois groupes:  $\Delta\nu < 0.2\text{cm}^{-1}$  est caractéristique des pierres presque libres ou relaxées à cause de la rupture du composant. Lorsque  $0.2\text{cm}^{-1} < \Delta\nu < 0.4\text{cm}^{-1}$ , les chassages ont «bien fonctionné». Finalement, les cas où  $\Delta\nu > 0.4\text{cm}^{-1}$  sont rares et le lien entre la qualité fonctionnelle de l'assemblage et la valeur du décalage n'a pas été établi. À ce stade de nos investigations, les données ne sont pas suffisantes pour proposer un seuil d'acceptation ou de rejet robuste pour le contrôle industriel d'assemblages de pierre chassées. Il serait nécessaire de mener des essais supplémentaires dans le cadre d'un projet industriel afin d'établir la robustesse des seuils observés dans cette étude.

Finalement, la cartographie du signal optique de fluorescence dans un disque de corindon serré incrémentalement dans une pince illustre le potentiel de la méthode pour suivre l'évolution de l'homogénéité et de l'intensité du serrage d'un composant de dimensions similaires à celles d'un verre de montre.

## Conclusions

Pour le domaine de l'horlogerie, les résultats de cette étude illustrent le potentiel de la caractérisation optique non-destructive des pierres horlogères après usinage (contraintes résiduelles) ainsi que de pièces serrées (distribution spatiale des contraintes spécifique à de nombreux assemblages horlogers). L'utilité de la fluorescence

est illustrée à travers la mise en évidence de différences dans la distribution statistique des contraintes résiduelles sur des lots de pierres horlogères libres en rubis, corindon et zircon, ainsi que par l'identification de contraintes en compression dans des rubis mesurées sur un produit horloger commercial. L'intérêt de la technique Raman comme moyen de contrôle est également illustré : grâce à la haute résolution spatiale du microscope Raman, il est possible de cartographier les contraintes (résultantes d'un assemblage ou résiduelles) sur des composants horlogers millimétriques et centimétriques en matériaux non-métalliques. De plus, les techniques utilisées dans ce travail sont potentiellement applicables à d'autres matériaux non-métalliques (silicium, diamant, quartz, polymères, etc.). L'étude de l'effet des contraintes externes induites dans cette étude par le serrage est également généralisable à d'autres assemblages (braisage, etc.). ■

## Références

- [1] W. WEBER et R. MERLIN, *Raman Scattering in Materials Science*, Springer, 2000.
- [2] R. COOK et C. MICHAELS, «Review: Coefficients for stress, temperature and composition effects in fluorescence measurements of alumina,» *J. Res. Natl. Inst. Stand.*, vol. 122, p. 43, 2017.
- [3] T. DIEING, O. HOLLRICHER et J. TOPORSKI, *Confocal Raman Microscopy*, Springer, 2011.
- [4] W. ZHU et G. PEZZOTTI, «Raman analysis of three-dimensional graded stress tensor components in sapphire,» *J. Appl. Phys.*, vol. 109, p. 073502, 2011.
- [5] Q. MA et D. CLARKE, «Stress measurement in single-crystal and polycrystalline ceramics using their optical fluorescence,» *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 76, p. 1433, 1993.
- [6] N. NOGUCHI, A. ABDOURYIM, I. SHIMIZU, M. KAMEGATA, S. ODAKE et H. KAGI, «Imaging of internal stress around an mineral inclusion in a sapphire crystal: application of micro-raman and photoluminescence spectroscopy,» *J. Raman Spectrosc.*, 2012.

Publicité

Bulletin **SSC**

La publication des professionnels  
du monde horloger

Cet article nous a été spontanément soumis par un lecteur.

Vous aussi, vous souhaitez publier un texte dans une de nos rubriques ?

N'hésitez plus et contactez-nous !

SSC  
Rue Jaquet-Droz 1  
CH – 2002 Neuchâtel  
032 720 50 79  
begonia.tora@ssc.ch





# UNE SYMPHONIE DE SAVOIR-FAIRE

**DD DUBOIS DÉPRAZ**  
AU SERVICE DES MARQUES DEPUIS 1901

Dubois & Dépraz SA  
Grand-Rue 12  
CH - 1345 Le Lieu  
+41 (0)21 841 15 51  
info@dubois-depraz.ch

Leader dans son domaine, Dubois Dépraz met son savoir-faire au service de ses clients.

Depuis plus d'un siècle, Dubois Dépraz marque de son empreinte l'industrie horlogère tant dans la conception, la fabrication et l'assemblage de mécanismes horlogers à complications que de composants et mobiles à haute valeur ajoutée.

Dubois Dépraz est une entreprise indépendante, qui place l'humain et ses partenaires au centre de ses préoccupations. Son nom est synonyme d'innovation, d'expertise et de qualité.



DÉVELOPPEMENTS  
SUR MESURE



MANUFACTURE DE  
COMPOSANTS



MANUFACTURE DE  
COMPLICATIONS

[www.dubois-depraz.ch](http://www.dubois-depraz.ch)