ACHETER

Un mini-spectromètre à réseau

Alexis FEUGIER, Ocean Optics Inc. - alexis.feugier@oceanoptics.com

L'apparition des mini-spectromètres à réseau remonte au début des années 90, et ils ont pris, au fur et à mesure des progrès technologiques, une place importante dans les laboratoires de recherche industriels ou scientifiques, tout comme dans l'industrie. Ils sont soit utilisés dans leur forme standard, soit intégrés dans des équipements sur les marchés liés à l'environnement, au contrôle des procédés ou de la qualité ; à l'agriculture de précision[1], à l'alimentaire, à l'éclairage, aux sciences du vivant, au biomédical, à la chimie et à la pharmacie, aux semi-conducteurs, à la sécurité et à la lutte anti-contrefaçon, *etc.* Aujourd'hui, la diversité de l'offre nécessite une analyse précise de ses besoins actuels et futurs afin d'effectuer le meilleur choix possible lors d'un investissement.

Les mini-spectromètres à réseau ont assis leur place au cours des 20 à 30 dernières années dans un marché de la spectroscopie jusqu'alors dominé par les spectromètres de paillasse. Aujourd'hui, ils sont considérés comme une technologie complémentaire à cette instrumentation scientifique aux côtés des micro-spectromètres qui commencent pour leur part à être testés et validés sur des marchés porteurs comme celui de l'automobile.
Le déploiement de cette technologie a profité de la baisse des coûts des détecteurs (fabriqués pour des marchés de masse), des technologies de miniaturisation (qu'elles soient optiques ou électroniques), et des évolutions des micro-processeurs permettant un traitement des données spectrales toujours plus rapide, sur des interfaces portables. Cette technologie de rupture, compacte, portable et à bas coût a révolutionné le monde de la spectroscopie, et permis de développer de nouveaux marchés jusqu'ici hors d'atteinte. En effet, de nouvelles méthodes de mesure ont pu voir le jour par la possibilité d'enfin apporter l'équipement d'analyse vers l'échantillon. Cela a permis notamment de mettre en place des mini-spectromètres pour la mesure en ligne et le contrôle de procédés, et de développer des analyseurs pour le terrain pour des applications environnementales ou pour l'agriculture. On les retrouve aussi intégrés dans des équipements au plus près des besoins comme pour les systèmes de détection d'explosifs lors des contrôles de sécurité dans les aéroports.

Conception

Un mini-spectromètre à réseau peut être développé suivant différents designs optiques, notamment le

[1] Il s'agit des technologies actuelles qui permettent par exemple d'embarquer sur un tracteur un détecteur de concentration d'azote basé sur un spectromètre pour mieux contrôler l'épandage (voir www.inra.fr/Grand-public/Dossiers/Les-agricultures-du-futur/L-agriculture-de-precision-sur-le-terrain/)

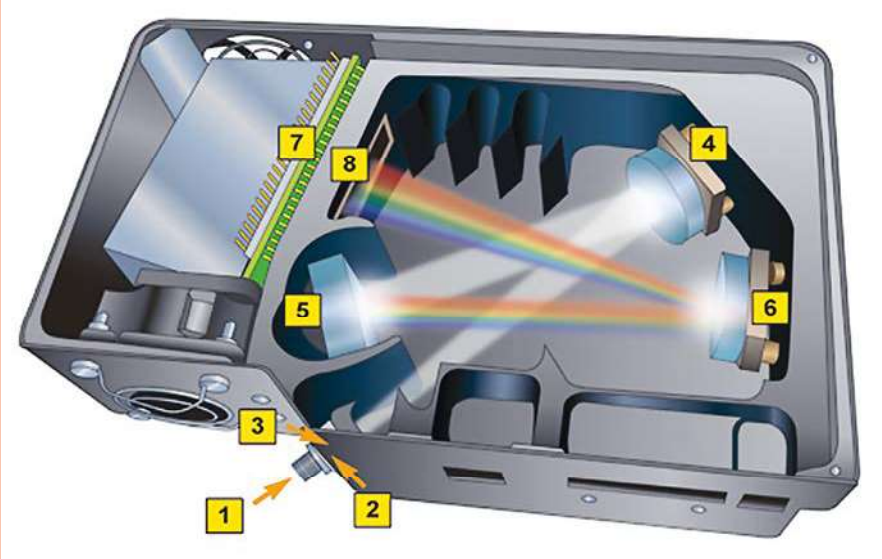

Figure 1. Configuration optique d'un mini-spectromètre avec une configuration Czerny-Turner symétrique croisée utilisant un réseau en réflexion. Celui-ci est composé d'un connecteur pour fibre optique (1), d'une fente d'entrée d'une largeur variable (2), d'un filtre passe-haut optionnel (3), d'un miroir de collimation (4), d'un réseau en réflexion (5), d'un miroir de focalisation (6), d'une lentille cylindrique de collection optionnelle, d'un détecteur (7), d'un filtre trieur d'ordre optionnel (8), ou d'une fenêtre améliorant la transmission dans l'ultraviolet.

Czerny-Turner, qui peut lui-même être décliné dans une configuration symétrique ou asymétrique, croisée ou non. Nous traitons dans cet article uniquement les spectromètres miniatures intégrant comme élément dispersif un réseau, que ce soit en réflexion ou en transmission. D'autres spectromètres miniatures dont le design est basé sur d'autres technologies que le réseau sont également disponibles sur le marché, comme les spectromètres à transformée de Fourier, ou Fabry-Pérot notamment à base de composants MEMS.

La *figure 1* présente la configuration optique d'un mini-spectromètre avec une configuration Czerny-Turner symétrique croisée utilisant un réseau en réflexion. La possibilité de modifier certains composants par l'utilisateur ou en usine sur une même base de banc optique, permet de configurer un spectromètre à façon. Cet aspect modulaire a été essentiel dans l'adoption de cette technologie par les utilisateurs, leur permettant ainsi par le simple changement de la fente d'entrée d'utiliser le même spectromètre pour effectuer successivement des mesures d'absorbance et de fluorescence.

Critères de choix

En tant qu'utilisateur, il est essentiel d'analyser son besoin actuel et futur, sachant que l'équipement est évolutif, et cela passe par le questionnement suivant : qu'est-ce que je veux mesurer et pourquoi ? Ai-je besoin de traiter mes données en temps réel et, si oui, quel doit être le temps de réaction entre la fin de l'acquisition spectrale et la prise de décision ? Quelles sont mes contraintes d'encombrement ? Quelles seront les conditions environnementales d'utilisation ? Quel type de communication dois-je privilégier pour interfacer le spectromètre ? Et enfin, quel est mon budget ?

D'autres critères pourront bien sûr entrer en jeu s'il s'agit d'un projet pour un intégrateur ou un industriel qui voudra s'assurer, par exemple, de la reproductibilité des performances d'une unité à une autre afin de garantir l'utilisation de modèles chimiométriques. Le choix du mini-spectromètre et celui de sa configuration doivent être définis en accord avec la réponse aux questions soulevées ci-dessus.

Le banc optique et sa distance focale, la largeur de fente d'entrée, la densité de traits du réseau et le nombre de pixels sur le détecteur sont les composants principaux à étudier pour jouer sur la résolution optique du spectromètre. Ainsi, pour des applications liées à la caractérisation des lasers, ou pour la spectroscopie LIBS (*laser induced breakdown spectroscopy*) nécessitant les meilleures résolutions possibles pour une gamme de longueurs d'ondes donnée, il faudra privilégier le montage d'une fente d'entrée la plus étroite, associée à un réseau présentant une densité de traits élevée, dans un banc optique ayant une focale la plus grande possible. Cela ne veut pas dire pour autant que ce choix doit être appliqué à toutes les applications liées à la spectroscopie LIBS ou à la caractérisation laser. En effet, si le critère de choix concernant la solution finale se porte sur le développement d'une solution portable pour le terrain, alors l'utilisateur cherchera surtout à minimiser le poids et l'encombrement de l'analyseur.

Figure 2. Parmi les applications, les mini-spectromètres à réseaux permettent la mesure et le contrôle des LED.

Figure 3. Spectromètre OCEAN-HDX pour le tri des fruits.

Il s'orientera vers un spectromètre un peu moins résolutif sur une gamme spectrale étendue, au lieu de couvrir la même gamme spectrale avec plusieurs spectromètres dédiés chacun à une gamme spectrale différente associée à une très bonne résolution.
À titre d'exemple, un spectromètre avec une fente de 5 microns de large, couplée à un réseau de 2400 traits par millimètre dans un banc optique de focale 101,6 millimètres, permettra d'obtenir une résolution à mi-hauteur de 0,1 nanomètre sur une plage de 200 à 300 nm, alors qu'un autre spectromètre plus compact avec une fente de 5 microns, couplée à un réseau de 1200 traits par millimètre et une focale de 68 mm donnera une résolution de 0,5 nm à mi-hauteur sur une gamme de 200 à 500 nm. Dans ce dernier cas, le spectromètre plus compact avec une focale plus courte et le réseau de densité de traits moins élevée sera peut-être, pour ce projet spécifique, suffisant pour distinguer des raies d'émission d'espèces différentes.

Des solutions pour chaque besoin

Nous avons donc vu que le choix de la densité de traits du réseau permet de travailler sur une gamme spectrale plus ou moins étendue avec un impact sur la résolution. Lorsque la gamme spectrale minimum d'intérêt peut être définie par l'utilisateur, cela permet de choisir un type de détecteur, un réseau et un certain nombre d'options associées comme un filtre trieur d'ordres.
Les fabricants de mini-spectromètres utilisent des détecteurs à bas coût pour leurs produits d'entrée de gamme couvrant le spectre UV et visible (200 à 1100 nm), principalement des capteurs en silicium linéaires, de type CCD. Ils sont néanmoins remplacés progressivement ces dernières années par des capteurs CMOS permettant d'atteindre des cadences de mesure nettement supérieures, associées à des temps d'intégration minimum très courts (de l'ordre de quelques microsecondes). Les capteurs CCD à couches de silicium amincies éclairés par l'arrière (*back thinned CCD*) sont quant à eux utilisés pour la décomposition de signaux sur la gamme 165 à 1180 nm principalement pour la détection de signaux peu intenses comme pour le suivi de plasmas ou la détection de fluorescence. Ces détecteurs peuvent bénéficier de l'intégration d'un élément à effet Peltier qui permettra de refroidir le composant et ainsi de réduire considérablement le bruit sur des temps d'intégration longs ; ils sont notamment destinés aux applications liées à la spectroscopie Raman.
Les mini-spectromètres à réseau peuvent également être configurés pour une utilisation dans le domaine du proche infrarouge et dans ce cas il faut les équiper d'un détecteur InGaAs pour obtenir une sensibilité suffisante dans une gamme pouvant aller de 900 à 2500 nm. Ces détecteurs InGaAs sont refroidis pour la majorité d'entre eux par effet Peltier pour garantir un niveau de performance acceptable en termes de rapport signal sur bruit.
Pour ce qui est de la rapidité de mesure, il faut considérer le système

LES DOMAINES APPLICATIFS DES MINI-SPECTROMÈTRES, ET LES TECHNOLOGIES ASSOCIÉES.

APPLICATION	TECHNIQUE DE MESURE	MARCHÉ
Caractérisation de LEDs	Éclairement	Éclairage
Analyse de céréales	Réflexion NIR	Agriculture
Contrôle procédés en ligne	Raman	Chimie
Cartographie de tissus biologiques	LIBS	Biomédical
Suivi de la végétation	Réflectance	Environnement
Traçabilité	Réflectance	Alimentaire
Détection d'explosifs	SERS Raman	Défense & Sécurité
Détection de contrefaçon de spiritueux	Absorbance UV	Lutte contre la contrefaçon
Contrôle qualité d'optiques	Transmittance	Industrie

dans sa globalité afin de choisir le type de communication du spectromètre. Des standards USB 3.0 et ethernet sont apparus depuis quelques années et remplacent, pour quelques applications spécifiques, le standard USB 2.0. Ceux qui privilégient la portabilité opteront pour une communication Wi-Fi lorsque celle-ci est disponible.

Enfin, la question relative aux conditions environnementales mérite d'être posée. En effet, bien que de gros progrès aient été effectués ces dernières années par les fabricants pour diminuer la dépendance des mini-spectromètres aux variations lentes ou rapides de température, cette sensibilité peut être pénalisante pour certains projets, notamment ceux exploitant les données spectrales par chimiométrie. Dans ce cas, le conseil est de consulter votre interlocuteur qui pourra vous orienter au mieux vers une solution adaptée.

Conclusion : un indispensable !

Que vous soyez utilisateur en spectroscopie d'absorbance, de transmittance, de réflectance, de luminance, de fluorescence, de plasma..., en spectroscopie Raman ou LIBS, et que ce soit pour des analyses colorimétriques, moléculaires, atomiques ou toute autre analyse résultant de l'interaction lumière-matière, un mini-spectromètre est fait pour vous.
À l'image de la photonique, identifiée comme l'une des technologies clés du 21e siècle par l'Union Européenne, les mini-spectromètres apparaissent comme une technologie diffusante que vous pouvez retrouver à tout niveau de la chaîne de valeur, et dans des domaines applicatifs très nombreux (voir tableau).

FOURNISSEUR	MARQUE(S) DISTRIBUÉE(S)	CONTACT COMMERCIAL
ARDOP Industrie	RGB Photonics	**Stéphane Duval** - tél. + 33 (0)6 49 54 52 94 Email : stephane.duval@ardop.com
Hamamatsu Photonics France		**Laurent Demezet** - tél. + 33 (0)1 69 53 71 00 Email : fdemezet@hamamatsu.fr
Horiba		**Arnaud Cotel** Email : arnaud.cotel@horiba.com
IDIL Fibres Optiques	Ocean Optics	**Yi Mei Liu** - tél. + 33 (0)1 69 31 39 52 - Email : Yimei.liu@idil.fr (agence Orsay) ; **Bruno Volpe** - tél. + 33 (0)4 50 28 34 81 - Email : bruno.volpe@idil.fr (agence Est et Sud) ; **Patrick Cardoas** – tél. + 33 (0)6 79 23 55 48 (agence Sud-Ouest)
Just Normlicht France	GL Optics	Tél. + 33 (0)3 88 06 28 22 Email : info@just-normlicht.fr
Laser2000	StellarNet	**Fabien Poujol** - tél. + 33 (0)5 57 10 92 87 Email : poujol@laser2000.fr
Ocean Optics Inc.		**Alexis Feugier** (Responsable clientèle Intégrateurs) tél. + 33 (0)4 42 38 65 88 - Email : alexis.feugier@oceanoptics.com
Opton Laser International	BW Tek	**Jean-Claude Sanudo** – tél. + 33 (0)1 69 41 04 05 Email : jean-claude.sanudo@optonlaser.com
Optoprim	Avantes	**Arnaud Langlois** - tél. + 33 (0)6 14 01 01 12 - Email : alanglois@optoprim.com
Photonlines	Zeiss, Radiantis	**Laurent Colomer** - tél. + 33 (0)1 30 08 99 00 Email : la-colomer@photonlines.com
Pro-Lite Technology France	Admesy BV, Wasatch Photonics Inc.	**Jérôme Castay** - tél. + 33 (0)5 47 48 90 70 Email : jerome.castay@pro-lite.fr
Wavetel	ISTEQ, SolarLaser	**Arnaud Bout** - tél. + 33 (0)6 83 55 19 47 / + 33 (0)2 99 14 69 65 Email : about@wavetel.fr