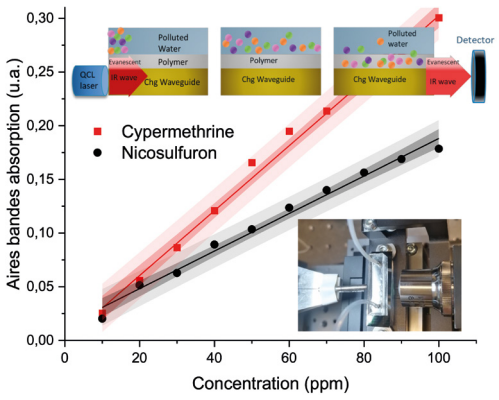
SPECTROMÉTRIES IR ET RAMAN POUR L'AGROPHOTONIQUE : INNOVATIONS EN SUIVI ENVIRONNEMENTAL ET SÉLECTION GÉNÉTIQUE

R. CHAHAL[1], M. LE CORVEC[2], A. MORÉAC[2,3], M. VRAZEL[1], F. ENEZ[4], S. BRAD-FUDULEA[5], S. LAGARRIGUE[6], R. ROUGER[5], P. HAFFRAY[4], J.CHARRIER[7] & V. NAZABAL[1,2,*]

[1] Univ Rennes, CNRS, Institut des Sciences Chimiques de Rennes – UMR 6226, F-35000 Rennes, France
[2] ScanMAT, Université de Rennes, 35042 Rennes
[3] IPR, Université de Rennes-CNRS, 35042 Rennes
[4] SYSAAF, Station LPGP-INRAE, 35042 Rennes, France
[5] INRAE, INSTITUT AGRO, PEGASE UMR 1348, Saint-Gilles, France
[6] SYSAAF, INRAE Val de Loire, UMR Biologie des Oiseaux et Aviculture, 37380 Nouzilly , France
[7] Univ Rennes, CNRS, Institut Foton-UMR 6082, 22305 Lannion, France
*** virginie.nazabal@univ-rennes.fr**



La spectrométrie portable et miniaturisée (proche et moyen infrarouge, Raman), couplée à des modèles chimiométriques performants, offre des potentialités pour la détection sélective de polluants agricoles et la caractérisation des acides gras en aquaculture et aviculture, avec des mesures rapides, fiables et applicables à la sélection génétique et à l'agro-industrie.

https://doi.org/10.1051/photon/202513542

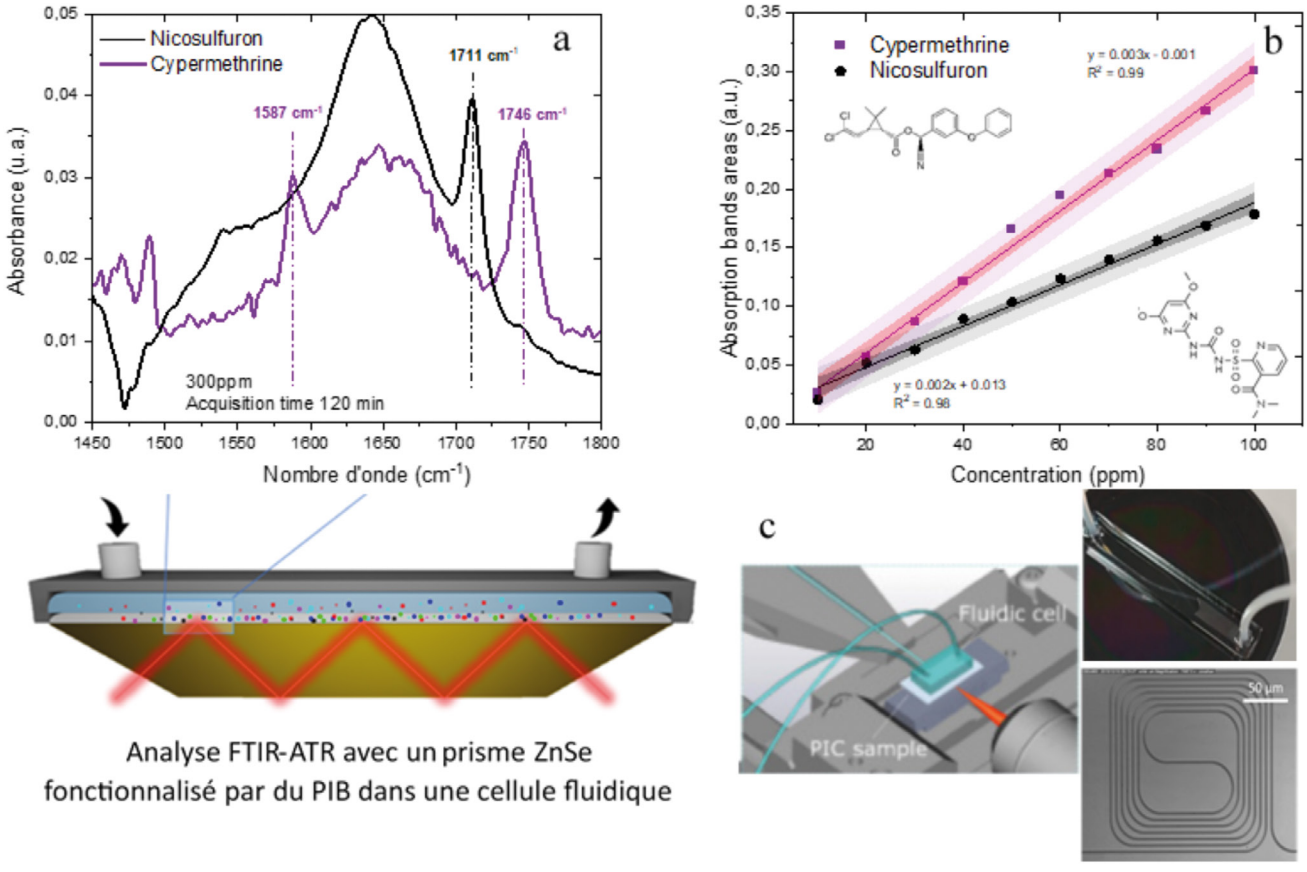
Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

Le développement de technologies photoniques pour répondre aux enjeux agricoles, environnementaux et de production animale offre aujourd'hui des perspectives inédites pour des analyses rapides et sélectives. L'intégration de spectroscopies du proche et moyen infrarouge au Raman améliore la qualité du diagnostic et permet d'adapter les mesures à la surveillance environnementale, à la sélection génétique et au contrôle qualité à haut débit. Cette convergence entre optique, biologie et ingénierie ouvre la voie à des stratégies de monitoring plus rapides, robustes et adaptées aux pratiques agro-environnementales.

DÉTECTION *IN SITU* DES PESTICIDES PAR SPECTROSCOPIE MOYEN-IR À BASE DE PHOTONIQUE INTÉGRÉE EN VERRE DE CHALCOGÉNURE

Dans les zones densément peuplées, la gestion des polluants, tels que les hydrocarbures (benzène, toluène et xylènes, BTX), est critique. Les méthodes d'analyse conventionnelles (off-line), bien que précises, sont chronophages et nécessitent des infrastructures lourdes et exposent les échantillons à des risques de dégradation. Ces limites ont favorisé le développement d'outils d'analyse *in situ*, incluant stations autonomes, instruments portables et capteurs optiques ou électrochimiques, offrant rapidité, portabilité et robustesse. C'est dans ce contexte qu'a été envisagé, dans le cadre du projet européen IBAIA (Innovative environmental multisensing for waterbody quality monitoring and remediation assessment), le développement d'un micro-capteur optique microfluidique exploitant la spectroscopie par champ évanescent en moyen infrarouge. Cette technique non destructive est reconnue pour sa sélectivité dans la détection de composés organiques. Les circuits photoniques intégrés en verre de chalcogénure offrent une transparence étendue du proche au moyen infrarouge selon la composition de ces verres (jusqu'à 20 µm pour les tellurures) et un ajustement précis des indices de réfraction, assurant une propagation monomodale et un confinement optimisé du mode optique pour maximiser l'interaction avec le milieu analysé [1]. Le transducteur est fonctionnalisé par un polymère hydrophobe, permettant une extraction sélective des analytes tout en excluant l'eau, améliorant ainsi sensibilité et limite de détection. Ce point est essentiel, car l'un des principaux défis de la spectroscopie MIR en milieu aqueux réside dans l'absorption très intense de l'eau, dont le signal peut masquer celui des polluants ciblés. Une phase d'optimisation préliminaire a été menée par spectroscopie ATR-FTIR sur différents polymères hydrophobes, d'origine pétrosourcée ou biosourcée (Figure 1). Parmi ceux-ci, le polyisobutylène (PIB) s'est révélé particulièrement performant grâce à sa haute transmittance dans la fenêtre MIR d'intérêt [2]. Le PIB joue un rôle double : (i) extraire sélectivement les contaminants organiques non polaires, tels que les hydrocarbures aromatiques BTX, ainsi que certains pesticides comme la Cyperméthrine et le Nicosulfuron, en fonction de leur polarité ; (ii) concentrer ces analytes au contact immédiat du ●●●

Figure 1. Performance du microcapteur MIR fonctionnalisé : (a) spectres ATR-FTIR des pesticides analysés et (b) courbes de calibration quantitatives obtenues. c) schéma du microcapteur microfluidique intégrant un circuit photonique chalcogénure.



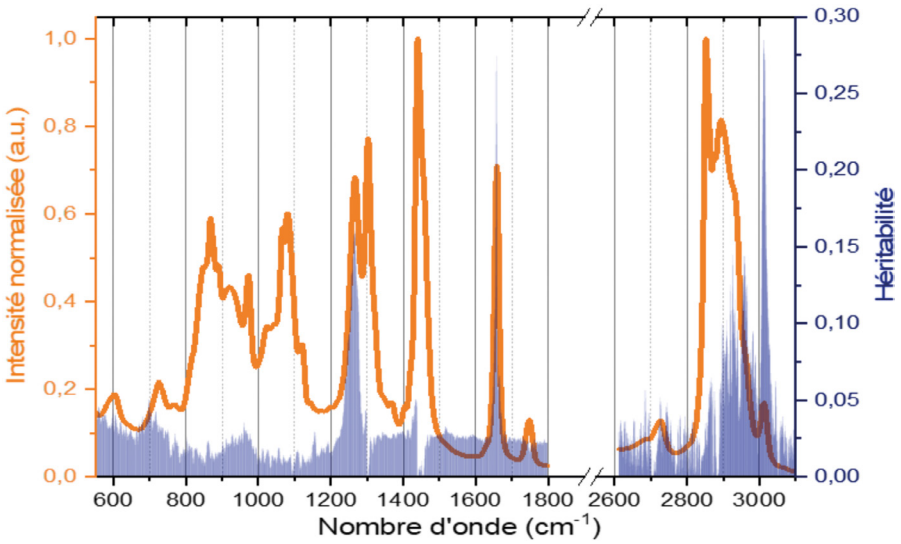
champ évanescent du guide d'onde, augmentant ainsi la sensibilité spectroscopique en amplifiant les bandes d'absorption observées. Les objectifs théoriques du projet visent une limite de détection d'environ 26 µg/L pour le toluène, avec une plage dynamique jusqu'à 100 mg/L, adaptée à la surveillance de pollutions accidentelles et aux opérations de remédiation. Pour les pesticides, le seuil actuel est inférieur à 10 mg/L, avec pour objectif des valeurs <1 mg/L à moyen terme. Cet impératif s'inscrit dans un contexte agronomique où l'usage intensif de produits phytosanitaires constitue une source majeure de contamination des eaux de surface et des nappes. Les pratiques agricoles, telles que traitements récurrents, ruissellements après épandage ou lessivages des sols, introduisent des molécules actives dans l'environnement aquatique. Une détection rapide et sensible est donc indispensable pour un diagnostic précoce, évaluer l'impact sur les écosystèmes et suivre l'efficacité des mesures de remédiation.

Le processus analytique repose sur la circulation du mélange eau-polluant dans une cellule microfluidique. Les molécules diffusent dans le film polymère jusqu'à l'équilibre, augmentant progressivement l'intensité des bandes d'absorption. La quantification se fait par mesure de l'aire sous les pics caractéristiques, par exemple à 1746 cm^{-1} et 1587 cm^{-1} pour la Cyperméthrine, à partir de solutions étalons. La régénération du PIB après exposition à fortes concentrations a été démontrée, assurant la réutilisabilité du capteur et limitant son impact environnemental. L'optimisation des cycles de régénération reste cependant essentielle pour la fiabilité à long terme. La cellule microfluidique développée constitue la base du futur système portable de spectroscopie MIR intégrée, modulaire et évolutive, compatible avec sources et détecteurs miniaturisés, tels que lasers à cascade quantique (QCLs, MIRSense) et photodétecteurs intégrés, ouvrant la voie à une nouvelle génération de capteurs environnementaux rapides, précis et déployables sur site.

SPECTROMÉTRIE RAMAN COMME ALTERNATIVE PROMETTEUSE POUR LA PRÉDICTION DES ACIDES GRAS : POTENTIEL POUR LA SÉLECTION PISCICOLE

La santé humaine dépend notamment de l'apport en acides gras poly-insaturés à longue chaîne, tels que les oméga-3, majoritairement issus de poissons pêchés, activité en stagnation face à l'évolution démographique humaine rendant essentiel le développement de nouvelles stratégies pour renforcer la production de ces composés. L'une des approches envisagées consiste à améliorer, par sélection génétique, la capacité des poissons d'aquaculture à fixer, pour certaines espèces comme les poissons marin, et/ou à élonger et insaturer les chaînes carbonées pour d'autres espèces comme les salmonidés. Des travaux préliminaires ont montré cette possibilité, en particulier chez le saumon, du fait d'une variabilité génétique entre parents à ces caractéristiques physiologiques. Cependant, la quantification précise de la composition en acides gras de la chair demeure coûteuse (> 90–100 € par individu), nécessitant le broyage de l'échantillon, sa lyophilisation et analyse par chromatographie en phase gazeuse (CPG). Ces coûts contraignent considérablement la possibilité d'évaluer un nombre important de candidats à la sélection (quelques milliers) ou de collatéraux par population ou lignée. Dans le cadre du projet Omega-Truite soutenu par le Fonds Européen pour les Affaires Maritimes, la Pêche et l'Aquaculture, nous avons exploré la faisabilité d'une alternative non létale reposant sur la spectrométrie Raman appliquée au gras viscéral, un tissu accessible par biopsie chez les candidats à la reproduction. Dans un premier temps, des équations de calibration ont été établies à partir de truites nourries par l'INRAE selon des régimes enrichis en lipides d'origine marine ou terrestre. Les échantillons de gras viscéraux de 268 truites ont été analysés par spectrométrie Raman (Horiba), utilisant une excitation à 785 nm, selon deux fenêtres spectrales : 550–1800 cm^{-1} et 2610–3100 cm^{-1}. Les spectres obtenus ont été corrélés selon différents modèles à la composition réelle en acides gras mesurée en CPG. Selon les acides gras considérés, les coefficients de

Figure 2. Spectre Raman de gras viscéral de truite arc-en-ciel (orange) et héritabilités (bleu) estimés à partir de 817 truites.



corrélation se révèlent plutôt élevés, notamment pour les acides gras d'intérêt majeur tels que les oméga 6, l'EPA et le DHA. Dans une seconde étape, la composition en acides gras de 1382 truites issues d'une structure génétique familiale contrôlée (831 familles issues de 84 mères et 99 pères) de l'entreprise de sélection Aqualande a été prédite par spectrométrie Raman [3]. Ces valeurs ont permis d'estimer l'héritabilité génomique (valeur comprise entre 0 et 1) des concentrations des principaux acides gras (part de la variation due aux parents sélectionnable), en utilisant 29 652 marqueurs génétiques de type SNP, afin d'évaluer les gains potentiels par sélection [4]. À la génération suivante, dans le projet Phenomix aussi soutenu par le FEAMPA, l'héritabilité de la variabilité spectrale elle-même a été étudiée toujours par spectrométrie Raman pour 817 truites issues de 400 familles (croisement de 20 mères et de 20 pères). Si la majorité des bandes spectrales présentent une héritabilité limitée ($h^2 < 0,05$), il s'avère qu'à minima trois d'entre elles présentes des valeurs plus élevées (0,16–0,28), informant sur l'existence d'une variabilité génétique portant directement sur certaines signatures vibrationnelles, ouvrant ainsi de nouvelles pistes pour combiner information spectrale et information génomique.

Les travaux initiés montrent la pertinence de la spectrométrie Raman pour prédire la composition en acides gras du gras viscéral chez la truite. Ils révèlent également que certaines bandes spectrales associées à des liaisons biochimiques spécifiques présentent une héritabilité significative. Cette avancée ouvre la voie à l'investigation d'outils de spectrométrie Raman, potentiellement portables et à usage industriels en sélection génétique piscicole, pour des mesures non létales des acides gras sur les candidats à la reproduction. L'application de la spectroscopie Raman sur la chair d'individus apparentés bien que létale constitue une approche complémentaire permettant, à moindre coût, d'envisager l'intégration pérenne de ces caractères dans les schémas de sélection génétique.

LA SPECTROSCOPIE NIR COMME OUTIL DE PHÉNOTYPAGE À HAUT DÉBIT POUR LES ACIDES GRAS DU JAUNE D'ŒUF : PERFORMANCES PRÉDICTIVES ET IMPLICATIONS GÉNÉTIQUES

Un enjeu majeur pour la filière œuf est l'allongement de la carrière productive des poules pondeuses, avec des bénéfices économiques, éthiques et environnementaux. Cependant la composition en acides gras du jaune d'œuf (~30 %) n'a jamais été étudiée et la production, qui dure environ 70 semaines, voit ensuite décliner le taux de ponte ainsi que la solidité de la coquille. Dans ce contexte, l'un des objectifs du projet européen GERONIMO (Genome and Epigenome eNabled breedIng in MOnogastrics) est d'étudier la composante génétique des trois principales classes d'acides gras du jaune d'œuf, saturés (SFA), mono-insaturés (MUFA) et polyinsaturés (PUFA), dont plusieurs travaux indiquent une évolution au cours de la carrière des pondeuses. L'estimation des héritabilités (h^2) et des corrélations génétiques permet d'évaluer quelle mesure la variabilité des caractères entre poules est d'origine génétique et comment les acides gras du jaune évoluent conjointement avec d'autres caractères d'intérêt zootechnique ou fonctionnel. Une telle estimation nécessite toutefois plusieurs centaines d'animaux, chacun fournissant plusieurs œufs, compte tenu de la variabilité déjà observée entre œufs d'une même poule. Or, comme chez la truite, l'analyse des profils lipidiques repose sur une méthode de référence, la chromatographie en phase gazeuse couplée à la détection par ionisation de flamme (GC-FID), précise mais coûteuse et peu adaptée aux études à grande échelle. La spectroscopie proche infrarouge (NIRS) apparaît alors comme une alternative robuste et économique, grâce à une préparation d'échantillon simplifiée et une acquisition rapide des données spectrales. Dans cette étude, les œufs provenaient de 251 poules issues d'un schéma de sélection génétique de l'entreprise Novogen, avec une généalogie connue. Les taux d'acides gras totaux et des classes SFA, MUFA et PUFA ont été déterminés par GC-FID sur la plateforme Genotoul Metatoul (Toulouse). Les mêmes jaunes • • •

W3 + FAIR CONVENTION
ENABLING TECHNOLOGIES
18 + 19 March 2026
Wetzlar, Germany

Visit us!
Marketplace for High-tech innovations
Optics, photonics, electronics & mechanics
w3-fair.com

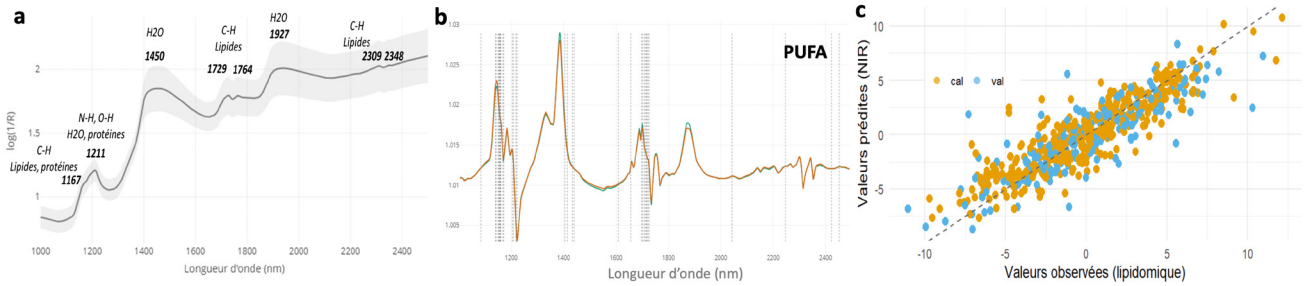


Figure 3. a) Spectre moyen (ligne foncée) et écart-type (bandes claires) de l'ensemble des spectres acquis sur des œufs. b) Spectres prétraités par première dérivée et SNV, avec en pointillé les variables sélectionnées pour la prédiction des PUFA. c) Résultats de la prédiction par NIRS des PUFA résiduels rapportées au taux d'acide gras totaux. Valeurs résiduelles prédites par NIRS en fonction des valeurs résiduelles de lipidomique.

d'œufs ont été analysés en spectroscopie NIR (PerkinElmer) en réflexion diffuse. Cinq spectres ont été acquis par œuf, soit 2958 spectres couvrant la gamme spectrale 1000–2500 nm, avec un pas spectral 0,5 nm. Les spectres ont été prétraités par normalisation SNV, puis dérivés selon l'algorithme de Savitzky–Golay avec une fenêtre de lissage de 17 points. Les données spectrales ont été divisées en un ensemble de calibration (2/3 soit 1970 spectres pour 394 œufs) et un ensemble de validation (1/3 soit 988 spectres pour 198 œufs), en veillant à ce que les cinq spectres d'un même œuf restent groupés. L'estimation des taux résiduels de PUFA, MUFA et SFA , rapportés aux acides gras totaux, à partir des spectres a été réalisée par régression linéaire multiple après sélection de variables par algorithme génétique. Les profils spectraux obtenus correspondaient bien à la composition du jaune d'œuf (52 % eau, 27 % lipides, 17 % protéines). Les longueurs d'onde retenues pour la prédiction se situaient dans les domaines d'absorption caractéristiques des liaisons C–H, en accord avec les structures des chaînes carbonées saturées et insaturées des acides gras. Les meilleures performances ont été obtenues pour la prédiction des PUFA et des MUFA résiduels, avec des coefficients de corrélation de 0,88 et 0,76 en calibration, et de 0,86 et 0,77 en validation, respectivement. Pour les SFA, les coefficients étaient plus faibles de 0,66 (calibration) et 0,58 (validation). Les premières estimations d'héritabilité issues des données lipidomiques étaient de $h^2 = 0{,}58 \pm 0{,}17$ pour les MUFA et 0,52 ± 0,19 pour les PUFA. Celles obtenues avec les données NIRS, légèrement inférieures restent néanmoins suffisamment élevées pour indiquer une forte contribution génétique à la variabilité observée. Ces résultats montrent que la spectroscopie NIR constitue une méthode fiable pour prédire les taux d'acides gras dans des œufs en l'absence d'analyses lipidomique et représente un outil performant pour estimer les paramètres génétiques nécessaires aux programmes de sélection visant l'allongement de la carrière des poules pondeuses.

CONCLUSION

Ces études mettent en évidence le potentiel de l'agrophotonique pour renouveler les approches analytiques en agriculture, aquaculture et aviculture. En combinant des techniques spectroscopiques avancées et des dispositifs miniaturisés ou adaptés au terrain, ce domaine permet d'extraire rapidement des informations structurales et chimiques directement dans les matrices biologiques ou environnementales. Les capteurs MIR pour la détection *in situ* de polluants, la spectrométrie Raman pour le phénotypage non létal des poissons, ou la spectroscopie NIR pour le suivi des acides gras dans les œufs illustrent la capacité de ces technologies à fournir des mesures rapides, fiables et économiquement accessibles, même sur de grands volumes de données. En améliorant la surveillance environnementale, l'efficacité des programmes de sélection génétique et la maîtrise de la qualité des productions, l'agrophotonique devient un pilier essentiel pour des systèmes plus durables et précis, adaptés aux contraintes actuelles de performance et de préservation des ressources. À plus long terme, l'imagerie hyperspectrale, notamment dans le SWIR, offre de nouvelles perspectives pour le contrôle qualité en temps réel. Le développement de sources SWIR incohérentes combinant puissance et luminance et accessibles économiquement constituera un levier clé pour industrialiser ces approches et renforcer l'intégration de la photonique dans les procédés agroalimentaires.

RÉFÉRENCES

[1] S. Meziani, Adv. Sensor and Energy Materials, **4 (3)**, 100149 (2025)

[2] M. Vrazel *et al,* Analyst **149 (18)**, 4723 (2024)

[3] E. Prado *et al,* Analytica Chimica Acta. **1191**, 229212 (2022)

[4] C. Blay *et al,* BMC Genomics **22**, 788 (2021)

SHARPER EDGES.
DEEPER INSIGHTS.

ODiate® RAMAN EDGE FILTERS

Experience precision in Raman spectroscopy with ODiate Edge Filters – engineered for exceptional signal clarity and performance across research, industrial, and portable platforms.

- OD ≥ 6 blocking suppresses Rayleigh scattering
- ≥ 93% average transmission ensures high Stokes signal throughput
- ≤ 0.5% edge steepness enables precise signal isolation
- Block key Raman laser lines: 488, 532, 632.8, and 785 nm
- Proven performance in Raman microscopes, industrial probes, and portable analyzers
- Standard and custom formats available

For more information visit
www.newport.com

www.newport.com

mks | Newport

INTERNATIONAL YEAR OF
Quantum Science and Technology

Ultra-cold atoms, ions, molecules and quantum technologies

By Robin Kaiser, Michèle Leduc, Hélène Perrin

The field of cold atoms was born fourty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. The book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last ten years.

Prix Roberval

ISBN : 978-2-7598-2745-9
192 illustrated pages
Price : 95 €

edp sciences