

Du laboratoire à l'industrie : une technologie laser de pointe au service de la caractérisation chimique des matériaux

Résumé Ablatom conçoit, développe et déploie des solutions rapides, performantes et innovantes d'analyse élémentaire par technologie LIBS. Du laboratoire à l'industrie, les solutions proposées permettent aux chercheurs et aux industriels d'augmenter leur productivité, d'accroître leur compétitivité, tout en élargissant leur champ d'exploration et leurs capacités d'analyse chimique. L'équipe d'experts pluridisciplinaire intervient sur l'ensemble de la chaîne des besoins des clients : de l'étude de faisabilité technique en passant par la prestation d'analyse et d'imagerie chimique, à l'élaboration et à la conception d'instruments LIBS sur-mesure. La société assure entièrement le support technique, les formations et le service après-vente.

Mots-clés Ablatom, LIBS, analyse élémentaire, microscopie, matériaux, plasma.



Date de création : 2017

Implantation : Villeurbanne, Campus LyonTech la Doua

Secteur d'activité : analyse et imagerie chimique multi-élémentaire

Technologie : solutions analytiques basées sur la spectroscopie de plasma induit par laser (LIBS)

Fondateurs : Florian Trichard, Vincent Motto-Ros

Financement, subventions, crédits : capitaux privés, Bpifrance, France Relance, ANR

Produits : prestations analytiques, intégration et fourniture d'équipements, formation et assistance

Ambition : concevoir, développer et distribuer des solutions d'analyse chimique innovantes de pointe réalisées sur-mesure, du laboratoire à l'industrie, au service de la caractérisation chimique des matériaux d'aujourd'hui et de demain.

• <http://ablatom.com>

La caractérisation chimique pour la maîtrise de la matière

Dans un contexte de transition énergétique, dans lequel la maîtrise du cycle de vie de la matière et sa revalorisation deviennent essentielles, la caractérisation de la composition chimique s'impose comme un outil incontournable, aussi bien pour le développement de nouveaux matériaux que pour le contrôle de matières premières et de produits finis. La caractérisation de la composition chimique permet en l'occurrence d'identifier des corrélations entre les caractéristiques d'un

matériau et ses performances, ou encore d'assurer les contrôles libérateurs d'assurance qualité dans les laboratoires ou le milieu industriel. Les buts recherchés peuvent être multiples : vérifier la répartition des éléments d'intérêt, contrôler des teneurs cibles, rechercher des traces, localiser et identifier des polluants, etc. La caractérisation chimique se doit donc de répondre à des besoins identifiés tout au long du cycle de vie des matériaux : de la qualification des matières premières à celle de la matière revalorisée.

Les nombreuses techniques d'analyse chimique présentes sur le marché possèdent chacune des caractéristiques spécifiques qui leur permettent de s'adapter à des besoins précis. La technologie LIBS (« laser-induced breakdown spectroscopy »), ou spectroscopie de plasma induit par laser, est une technique de caractérisation émergente dont le principe répond à l'association des concepts d'ablation laser et de spectroscopie d'émission optique. Sa particularité est de posséder une polyvalence remarquable lui permettant de couvrir une gamme très étendue d'applications et de besoins sur l'ensemble de la chaîne de vie d'un matériau et dans une multitude de domaines.

La LIBS est une véritable méthode hyperspectrale élémentaire qui apporte une analyse extrêmement fine d'un échantillon en compensant certaines limitations techniques classiques liées aux performances analytiques telles que le temps d'analyse, la sensibilité, l'analyse des éléments légers, l'environnement de mesure ou encore les contraintes liées à l'échantillon.

Description de la technologie LIBS

La LIBS est une technique de caractérisation élémentaire entièrement optique, qui permet l'analyse sans contact d'un échantillon généralement en conditions de température et de pression ambiantes. Son principe est issu d'un concept décrit pour la première fois dans les années 1960. Elle repose sur une physique complexe tout en se caractérisant par une apparente simplicité : il suffit d'une unique impulsion laser pour produire simultanément l'ablation, l'atomisation et l'excitation. La LIBS consiste à focaliser un faisceau laser impulsif de haute énergie à la surface d'un échantillon, produisant l'ablation de quelques nanogrammes de matière (*figure 1*). La matière vaporisée se transforme instantanément en plasma constitué d'ions, d'atomes, d'électrons libres, ainsi que de molécules principalement formées par recombinaison. Le rayonnement optique du plasma possède une émission caractéristique

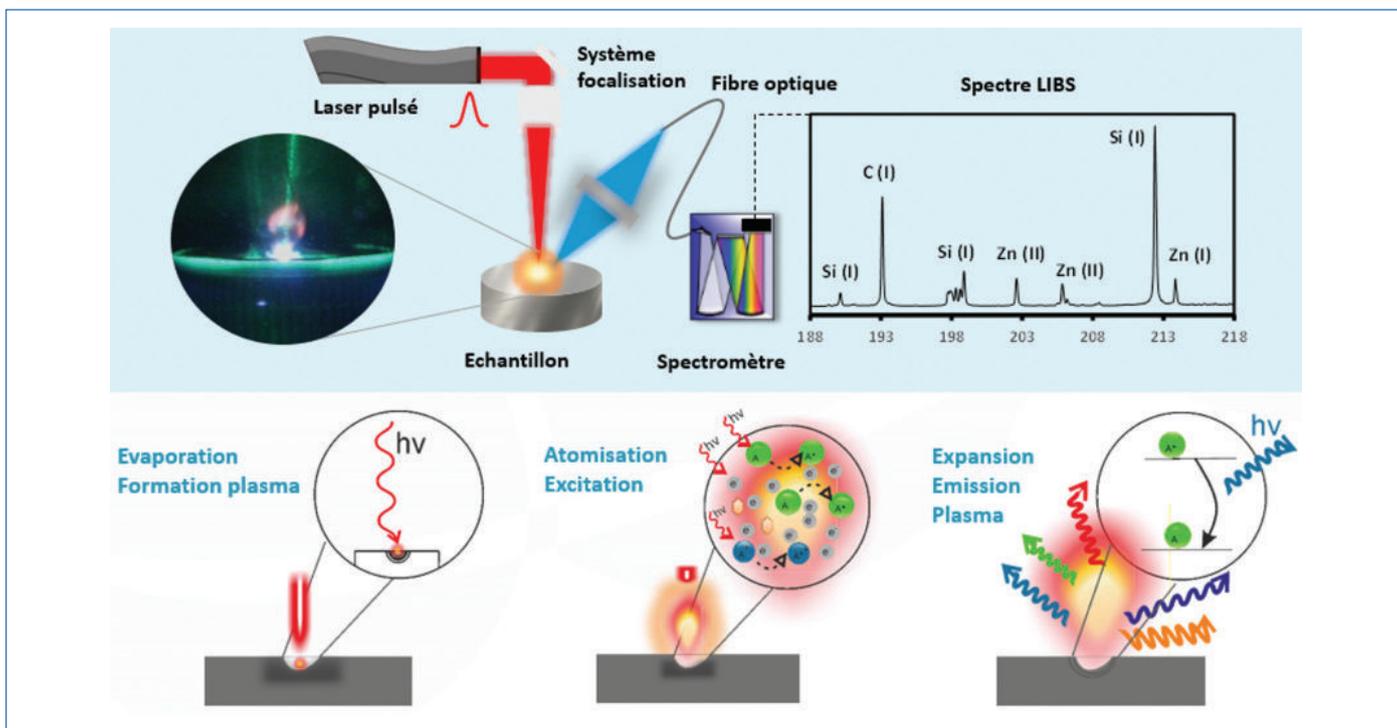


Figure 1 - Schéma de principe de la technologie LIBS.

de la composition chimique de la surface analysée. L'émission du rayonnement du plasma est donc collectée, par exemple par une fibre optique, puis conduite jusqu'à un spectromètre optique qui permet l'analyse du rayonnement en associant à chaque longueur d'onde émise une intensité liée à l'abondance de l'espèce chimique concernée dans l'analyte. Les données brutes de l'analyse LIBS sont des spectres d'émission optique au sein desquels chaque espèce chimique en présence dans le plasma peut émettre une ou plusieurs longueurs d'onde caractéristiques. Ces spectres sont constitués d'une intensité de fond, et d'une succession de raies d'émission dont le signal peut être corrélé à l'abondance de l'espèce chimique correspondante.

L'allure d'un spectre d'émission LIBS dépend intrinsèquement des caractéristiques du plasma, dont le rayonnement obéit à un phénomène transitoire, portant des informations atomiques, ioniques, voire moléculaires, liées à des recombinaisons au sein du plasma au fur et à mesure de sa relaxation. Cette technologie offre ainsi une richesse d'informations et une grande versatilité pour la caractérisation chimique : il est possible d'ajuster les paramètres temporels de détection du rayonnement du plasma pour adapter et optimiser la technologie à l'information chimique recherchée (figure 2).

La genèse d'Ablatom

La société Ablatom est une start-up deeptech issue de l'Institut Lumière Matière (ILM), laboratoire de pointe à l'origine de développements majeurs dans le domaine de la LIBS.

Le concept originel porté par le laboratoire de l'ILM était de développer une nouvelle génération d'instruments LIBS permettant d'obtenir des mesures analytiques robustes pour compenser les lacunes des systèmes existants manquant de fiabilité et de reproductibilité.

En 2011, afin de transformer le simple concept en prototype, un programme de maturation a été obtenu par l'ILM avec Lyon Sciences Transfert (avant la fusion avec Créalyx pour

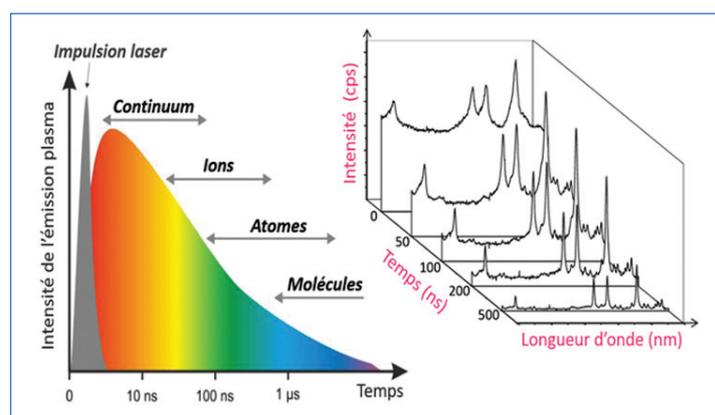


Figure 2 - Évolution temporelle du rayonnement d'un plasma LIBS et spectres d'émission correspondants.

devenir PULSALYS). C'est alors qu'a vu le jour un premier prototype LIBS capable de réaliser l'analyse spatialement résolue de la répartition multi-élémentaire au sein d'un matériau, fondée sur une instrumentation unique et révolutionnaire brevetée par l'ILM et développée par Vincent Motto-Ros, l'un des fondateurs d'Ablatom, maître de conférences à l'ILM depuis 2008. En 2015, Florian Trichard, actuellement président et cofondateur d'Ablatom, intègre l'équipe de l'ILM en tant qu'ingénieur maturation après sa thèse portant sur l'analyse LIBS, réalisée à l'Institut des Sciences Analytiques (ISA). La société Ablatom naît de la rencontre entre Vincent, désireux de repousser les limites de la technologie LIBS, et Florian, animé par la volonté d'apporter des solutions réelles et novatrices au monde industriel de demain. La société est créée en 2017 dans un contexte où l'analyse chimique basée sur la LIBS connaît un développement remarquable depuis près d'une décennie, aussi bien en termes d'instrumentation que d'applications [1]. Dans ce contexte, les besoins exigent fiabilité et robustesse de la mesure chimique, qui reposent sur des concepts de répétabilité et de performances. La politique

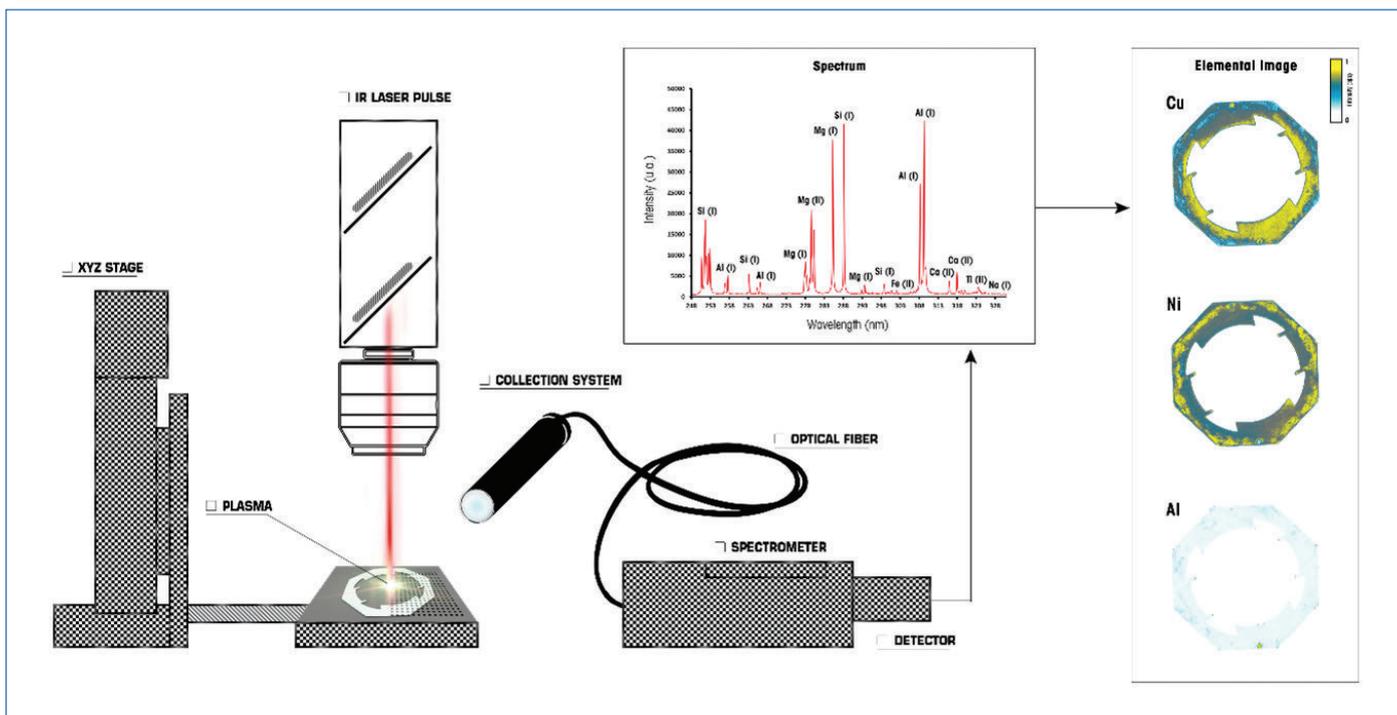


Figure 3 - Principe de la microscopie élémentaire par LIBS.

d'Ablatom s'aligne parfaitement sur ces exigences qui guident constamment la société à apporter de nouveaux développements instrumentaux à sa technologie, bénéficiant toujours de l'appui de l'ILM, et qui viennent s'ajouter aux avantages intrinsèques de la technologie LIBS.

Les missions d'Ablatom

La principale mission d'Ablatom est de développer et déployer l'analyse LIBS au service de la R&D et des procédés industriels en couvrant un large domaine applicatif. Son objectif est aujourd'hui de vendre son expertise et ses solutions pour répondre à des besoins analytiques en industrie ou au laboratoire, voire spécifiquement à des besoins précis. La société se positionne à la fois en tant qu'intégrateur de solutions d'analyse, qui peuvent être réalisées spécifiquement et sur-mesure auprès d'acteurs concernés par le besoin, et également en tant que laboratoire d'analyse proposant une technique de caractérisation émergente en pleine expansion technologique.

L'équipe d'Ablatom se compose aujourd'hui de profils variés et complémentaires, aux compétences pluridisciplinaires dans les domaines de l'optique et de l'instrumentation, de la chimie analytique, des matériaux et du développement d'IHM (interfaces homme-machine) et de logiciels spécifiques à la LIBS. La technologie déployée par Ablatom est à l'état de l'art et repose sur plus de dix ans d'expérience et développements. Aujourd'hui, les nouvelles générations d'instruments LIBS mis au point bénéficient des avancées récentes en termes de lasers, de spectromètres et de détecteurs. La technologie LIBS d'Ablatom permet de réaliser aussi bien de l'analyse conventionnelle que de l'analyse spatialement résolue par imagerie chimique sur des échantillons de quelques dizaines de μm^2 jusqu'à plusieurs cm^2 . Ablatom a pour ambition de garantir l'accès à la qualité de mesure et à la performance analytique pour l'analyse et l'imagerie chimique de surface des matériaux, aussi bien en laboratoire qu'en industrie.

Le concept de microscopie élémentaire par laser pour repousser les limites de l'imagerie chimique

La microscopie élémentaire par LIBS permet de générer des cartographies chimiques donnant la répartition spatiale de différentes espèces sur une surface donnée [1]. Le principe de l'imagerie LIBS repose sur la génération d'une série de plasmas à différentes positions successives de la surface analysée. Dans la configuration la plus courante, la surface est déplacée sous le faisceau à une vitesse synchronisée avec la cadence des impulsions laser (figure 3). Chaque tir laser correspond à un pixel de l'image finale et donne un spectre d'émission représentatif de la composition de la matière en ce point. Une seule image LIBS peut contenir l'information chimique issue de plusieurs millions de spectres. Le résultat d'une analyse LIBS peut être composé d'autant d'images chimiques de la surface analysée qu'il existe de raies d'émission détectées.

Pour servir la caractérisation de surface des matériaux, Ablatom a déployé son concept instrumental d'imageurs haute performance ELM-XS-1 offrant ainsi des gains de temps et d'efficacité considérables aux opérateurs et ouvrant le champ des possibles dans le domaine de l'imagerie chimique (figure 4).

En l'occurrence, la microscopie élémentaire par LIBS offre une spécificité de caractérisation multi-élémentaire directe et simultanée, compatible avec la majorité des éléments chimiques, y compris les légers tels que Li, B ou C, difficilement analysables à partir des technologies usuelles. Cette technique possède des caractéristiques adéquates pour l'imagerie chimique avec une résolution spatiale de l'ordre de la dizaine de micromètres et une vitesse d'acquisition élevée qui permet l'acquisition d'une centaine à un millier de spectres par seconde. Ces caractéristiques en font une technologie capable de s'adapter à l'état, à la nature, aussi bien qu'à la taille du matériau, compatible avec l'analyse des poudres et des solides, dont les tailles caractéristiques sont comprises entre quelques centaines de μm^2 et jusqu'à plusieurs m^2 .



Figure 4 - Performances de la technologie Ablatom ELM-XS-I.

La technologie de microscopie élémentaire par LIBS donne accès à une analyse extrêmement fine de la surface des matériaux, avec pour avantage de pouvoir échantillonner une grande surface en un minimum de temps. Cette technologie laser innovante offre de surcroît un outil performant pour l'analyse quantitative avec une excellente sensibilité de détection atteignant la ppm (partie par million), y compris pour les éléments légers. À ce jour, la caractérisation des matériaux ne dispose pas de technique usuelle qui rassemble simultanément l'ensemble de ces caractéristiques.

La diversité applicative de cette technologie est extrêmement large. Elle est capable de réaliser l'imagerie multi-élémentaire rapide de surface de matériaux évoluant tout au long de leur cycle de vie, tels que les catalyseurs hétérogènes (caractérisation de la diffusion et des transferts de matière), ou encore l'imagerie multi-élémentaire *in situ* de tissus biologiques et biomédicaux. Elle peut aider également à l'identification de la nature d'un échantillon en fournissant des informations chimiques caractéristiques d'une famille de matériaux (type de polymères, nuance d'aciers, etc.). Elle permet de localiser des défauts sur des pièces massives (ségrégation, inclusions au sein de pièces métalliques), ou de réaliser plus généralement un diagnostic de l'état de surface des matériaux. Elle offre en outre la possibilité d'estimer une composition moyenne avec précision et permet d'envisager par exemple de vérifier l'hétérogénéité d'un lot industriel.

La technologie s'adresse à une multitude de domaines tels que la catalyse, les matériaux synthétiques (plastiques, etc.), la microélectronique, la métallurgie, mais aussi la biologie et la géologie. Dans chacun de ces domaines, les possibilités d'analyse par microscopie élémentaire LIBS sont multiples. Après identification des besoins analytiques spécifiques auprès des experts matériaux, la LIBS est une technologie qui peut s'adapter à de nouveaux objectifs d'analyse.

Un potentiel unique pour l'analyse industrielle

De plus en plus, la LIBS voit son champ d'applications s'étendre au monde industriel [2] (figure 5). Depuis 2010 environ, on note une évolution exponentielle du nombre de travaux de R&D traitant de cette technique et de son application pour l'industrie.

Dans ce contexte, Ablatom a la capacité au travers de son expertise de développer et d'adapter les instruments de mesure LIBS à des applications dédiées en tenant compte des contraintes relatives à l'environnement et à la sécurité industriels. Les analyseurs LIBS ainsi que les interfaces logicielles peuvent être ainsi réalisés sur mesure pour répondre à un besoin spécifique, puis directement intégrés au cœur de l'environnement industriel concerné. La versatilité des

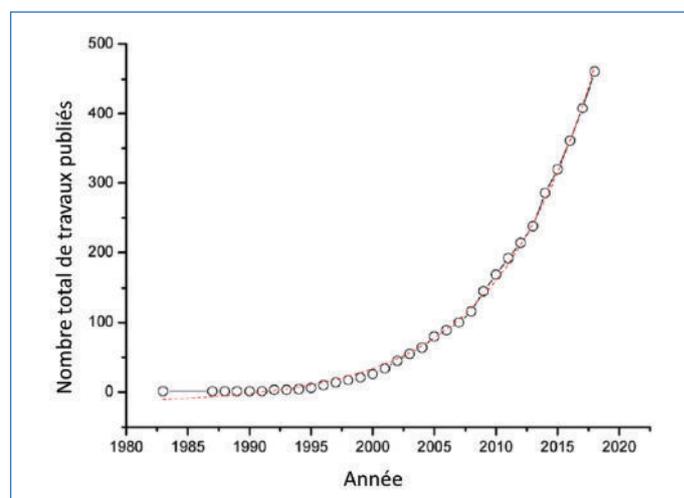


Figure 5 - Évolution du nombre de publications concernant les applications industrielles de la LIBS [3].

solutions LIBS proposées permet d'envisager la mesure chimique sur tous types de matière, homogène ou hétérogène, sous forme de solide, de poudre ou de liquide, aussi bien humide que sèche.

Les possibilités d'application de la LIBS à l'analyse industrielle permettent de couvrir une large palette de besoins tels que le contrôle en ligne de l'état de surface de matériaux issus d'une production, l'identification de la matière par analyse chimique qu'on peut appliquer par exemple au tri des matériaux, la détection en ligne de contaminants au sein de produits certifiés, l'analyse en temps réel de la composition d'un matériau au cours de sa fabrication, ou encore le contrôle de la composition chimique dans les matières premières, les produits intermédiaires ou finis (incluant l'identification de polluants, les contrôles libératoires, etc.).

En outre, cette technologie possède une capacité incroyable pour œuvrer en environnements hostiles, par exemple dans le cadre de l'analyse chimique de la matière nucléaire, de par son caractère peu destructif et sa capacité de mesure à distance sans contact. Les potentialités technologiques et instrumentales intrinsèques à la LIBS permettent d'envisager de multiples configurations, par exemple un système LIBS avec un rayon d'action de plusieurs mètres, ou encore un instrument LIBS embarqué sur un robot d'inspection pour le contrôle continu de grosses unités industrielles.

Les domaines applicatifs dans le milieu industriel concernent aussi bien le tri des déchets, l'analyse des semi-conducteurs et des batteries, l'analyse des matières synthétiques et plastiques, la catalyse hétérogène, ou encore la métallurgie avec la détection du carbone dans les aciers par exemple.

Quelle que soit l'application, le but final est l'élaboration d'analyseurs LIBS partiellement ou entièrement automatisés

associés à des logiciels et des IHM dédiés et simplifiés. Destinés également à des opérateurs sans expertise LIBS, ces appareils peuvent donner accès à des résultats en temps réel compatibles avec des procédés automatisés à cadence élevée pour garantir un suivi fiable et durable des lignes industrielles.

Exemples d'applications, du laboratoire à l'industrie

Zoom sur le domaine de la catalyse hétérogène

L'imageur LIBS ELM-XS-I est capable de fournir la répartition multi-élémentaire sur l'ensemble de la surface d'un grain de catalyseur millimétrique en moins d'une minute. Cette spécificité le rend adapté au contrôle rapide de l'homogénéité de lots de catalyseurs produits en grande quantité.

La distribution des espèces métalliques actives déposées sur le support catalytique ainsi que leur concentration locale peuvent être déterminées pour le contrôle post-fabrication, pour l'étude de mise au point de nouvelles synthèses ; ou encore pour le suivi de procédés d'imprégnation en cartographiant de manière inédite les systèmes catalytiques imprégnés à des temps très courts, de l'ordre de la minute.

En outre, la caractérisation multi-élémentaire obtenue en une seule analyse LIBS rend possible le suivi des différentes espèces mobiles au sein d'un même grain en réalisant l'analyse simultanée des espèces majeures et des espèces en traces présentes à des concentrations de l'ordre de la ppm [4]. Dans ce cadre, les images élémentaires peuvent être traduites en profils moyens de concentration qui représentent les phénomènes de transferts de matière intra-granulaire des molécules, par exemple dans le cas du suivi de l'empoisonnement des catalyseurs par les molécules de coke ou d'asphalènes [5] (figure 6). L'analyse LIBS fournit alors un format de

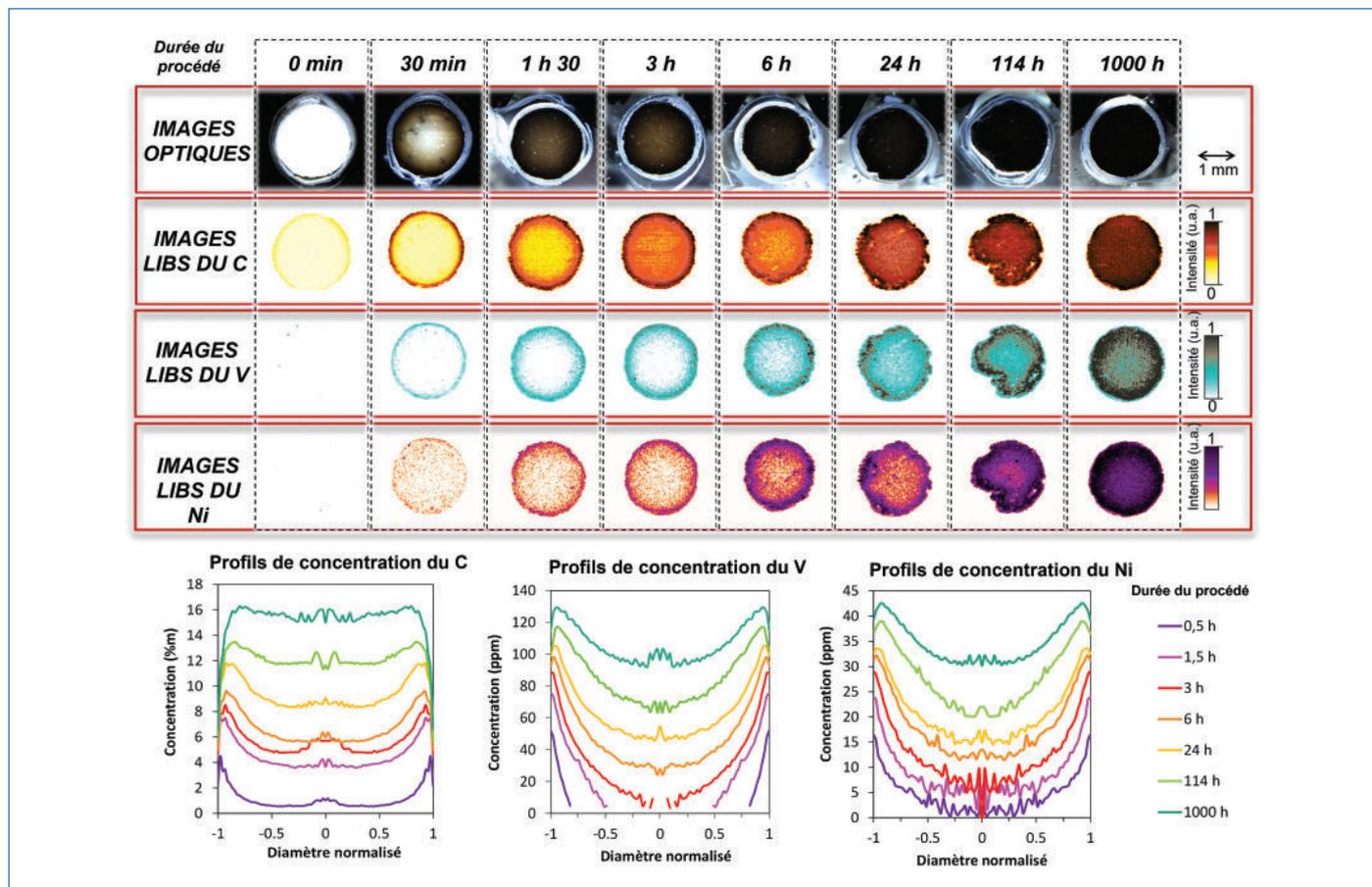


Figure 6 - Imagerie et profils LIBS extraits des images de la diffusion du coke (C) et d'impuretés métalliques en traces dans des supports de catalyseurs d'hydrotraitement [5].

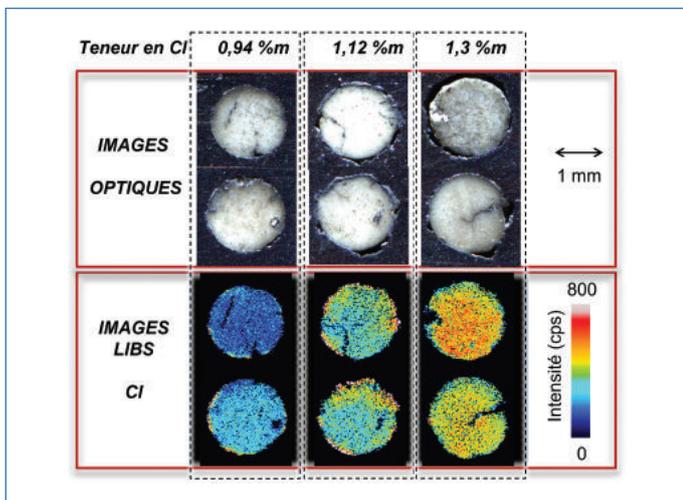


Figure 7 - Imagerie LIBS de la répartition du chlore dans des catalyseurs de reformage catalytique.

données compatibles avec les modèles numériques et offre une solution fiable pour contribuer à l'amélioration de la modélisation des procédés catalytiques. Plus précisément, les capacités de quantification de la LIBS couvrent une large gamme dynamique, allant de la ppm à plusieurs dizaines de %m/m, pour permettre l'estimation de l'épaisseur de la croûte d'éléments actifs dans les catalyseurs (liée à leur activité apparente).

L'imagerie LIBS a par ailleurs démontré une capacité pour l'analyse de certains halogènes tels que le chlore (mais aussi F, Br et I). Notamment, elle a permis de cartographier la répartition spatiale du chlore sur des surfaces de catalyseurs hétérogènes à des teneurs avoisinant le % m/m (figure 7).

Zoom sur le domaine de la matière synthétique et des plastiques

La caractérisation des matériaux synthétiques et des matrices plastiques est liée à des exigences grandissantes du fait d'un contexte actuel marqué par les nécessités de revalorisation de la matière. En ce sens, l'intérêt de la LIBS est l'analyse fine des impuretés en traces dans les produits plastiques, résultant d'additifs, de pigments colorés, ou de résidus métalliques apportés durant leur usage (figure 8). Dans ce secteur, c'est donc non seulement la sensibilité de la LIBS qui en fait sa force, mais également sa capacité de caractérisation multi-élémentaire puisque la matière plastique dissimule une immense richesse chimique d'éléments présents à l'état de traces tels que Cu, Pb, Fe, Cd, Zn, Al, Mn, Cr, Ni, Ca, Ti, Mo, Sr, V, S, combinés à d'autres éléments potentiellement toxiques pour la santé ou l'environnement tels que Cd, Cr, Pb, Hg, Sb, F, Cl, B, I, etc., qui peuvent être détectés en LIBS dans des gammes spectrales et des conditions bien spécifiques. Il est ainsi possible de qualifier chimiquement les matériaux en amont des procédés de recyclage et également d'accompagner le diagnostic de conformité (et de respect des spécifications) en aval du recyclage.

Zoom sur les éléments légers : l'exemple du lithium, de l'extraction à la revalorisation

Dans le contexte de transition énergétique, il est essentiel de proposer des solutions de caractérisations chimiques qui savent s'adapter aux nouvelles technologies de l'énergie, et en l'occurrence au développement sans précédent du stockage électrochimique de l'électricité fondée sur des batteries dont le lithium est l'un des composants principaux. Dans la nature, il n'est jamais présent dans sa forme native mais toujours sous

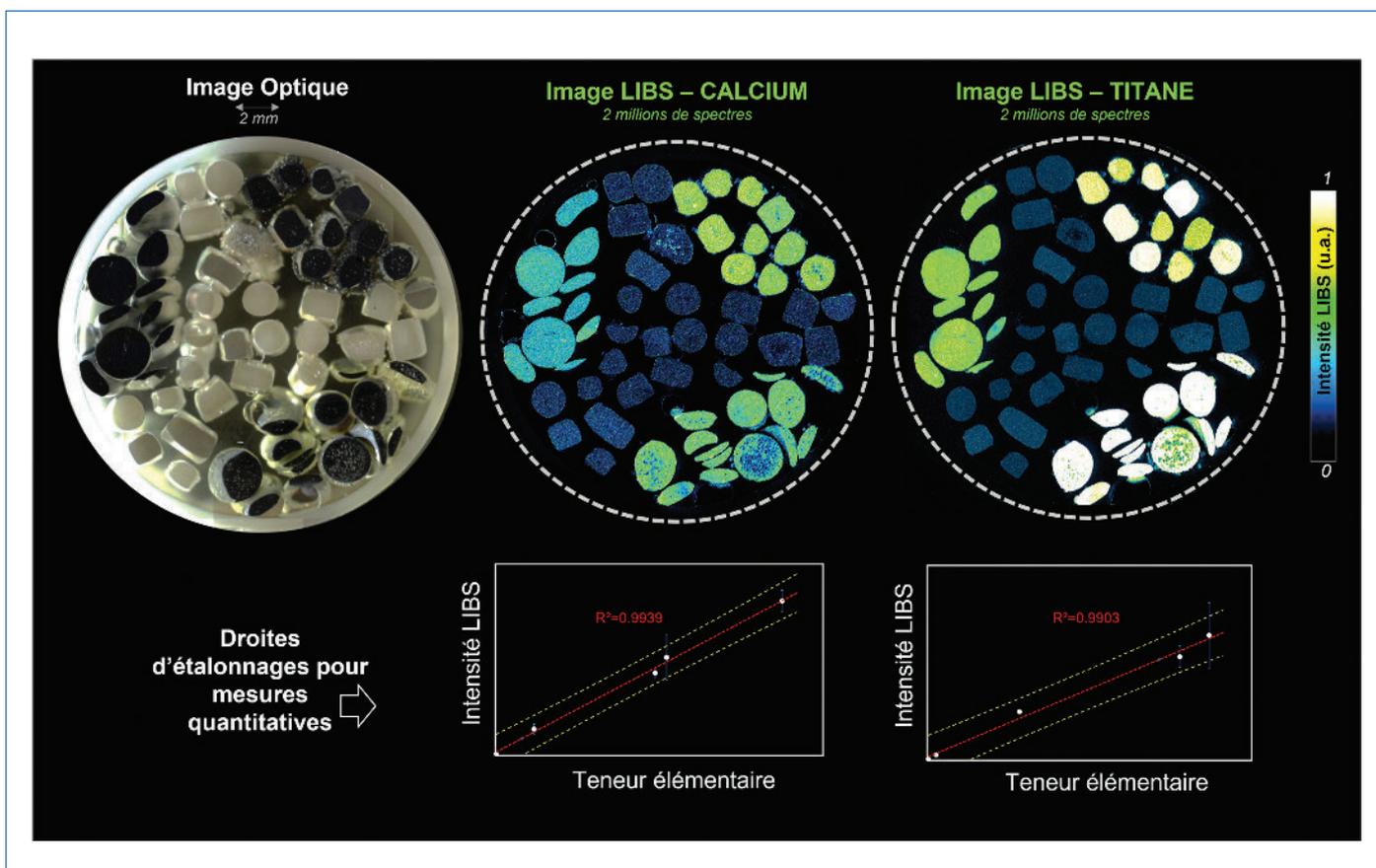


Figure 8 - Exemple de réalisation commune Ablatom-IFPEN : imagerie LIBS du calcium et du titane en traces dans les mélanges de granulés de plastiques.

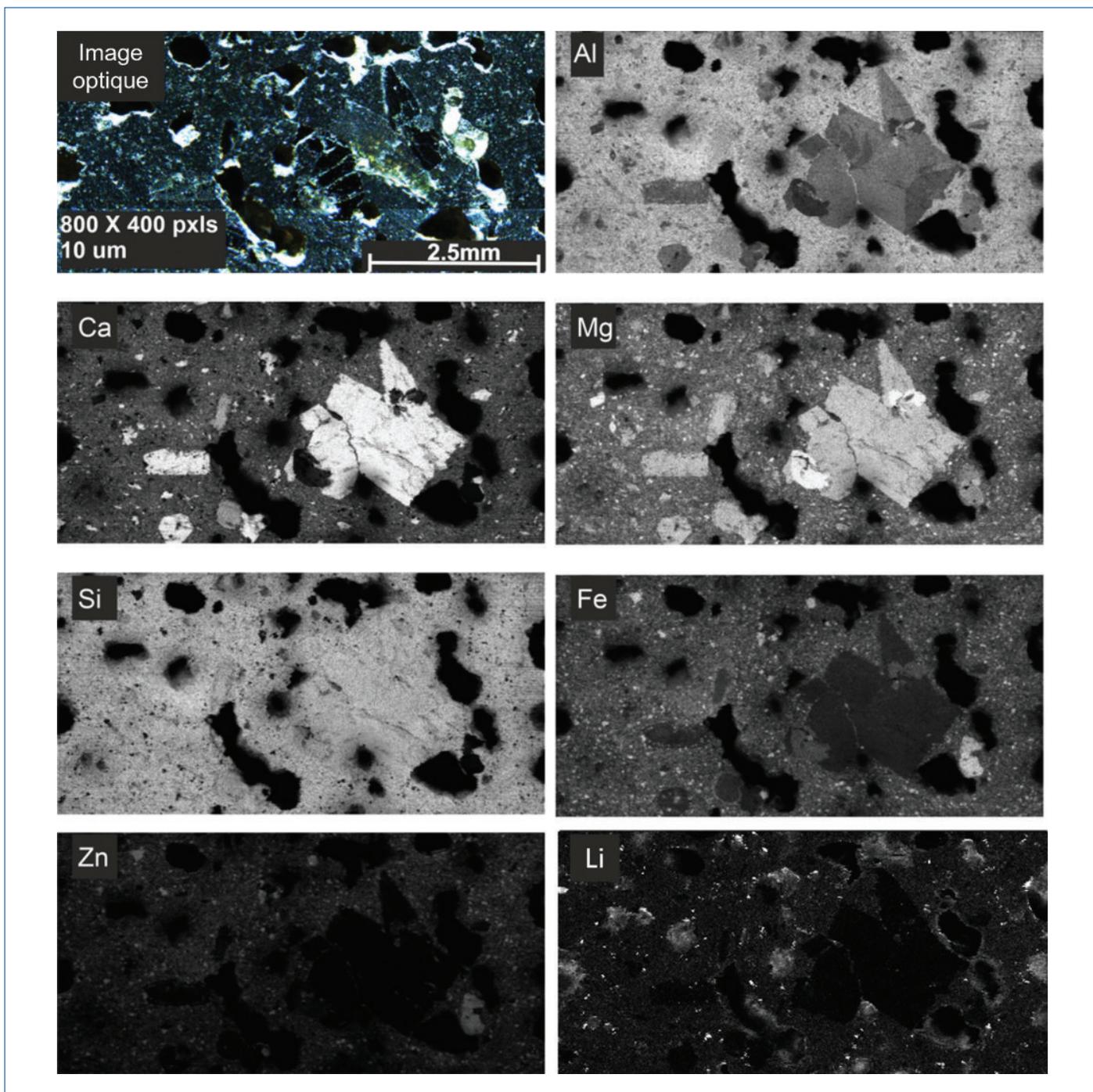


Figure 9 - Exemple de réalisation Ablatom : caractérisation multi-élémentaire d'un échantillon géologique.

forme de sels ou d'oxydes, dans des minéraux, et présent à des teneurs variant entre le % m/m et la ppm. La description fine de la composition élémentaire au sein des textures micro-métriques sur des matériaux géologiques ou minéralogiques peut être réalisée par la technologie LIBS qui permet une analyse simultanée des éléments majeurs et en traces, et en l'occurrence la détection du lithium avec une sensibilité sub-ppm (figure 9). La LIBS permet de caractériser aussi bien des sections polies de roches, de minéraux, que des carottes minières ou encore des spéléothèmes et des coraux, pour ne citer que les exemples les plus courants [6]. Dans le domaine de l'industrie minière par exemple, ce type de caractérisations fournit des indications précieuses sur les sources ou les processus de dépôt des minerais, pouvant conduire à la prise de décision stratégique concernant l'évaluation économique de l'extraction de nouvelles matières premières.

De même que dans les roches et minerais, la technologie LIBS représente un choix pertinent pour la caractérisation des batteries Li-ion puisqu'elle permet d'envisager l'analyse qualitative ou quantitative de la cinétique de diffusion du lithium. On peut ainsi envisager de renforcer la modélisation multi-échelle des systèmes de stockage électrochimique, en l'occurrence la modélisation des phénomènes de vieillissement des batteries, en ayant la possibilité d'observer les variations en lithium en fonction du vieillissement du graphite (figure 10). Ce type d'analyses chimiques combinées aux futurs développements instrumentaux (résolutions spatiales optimisées à l'échelle du μm) pourra fournir de très précieuses informations pour étudier les phénomènes intrinsèques à la croissance de la SEI (« solid electrolyte interface ») au sein des batteries. La technologie LIBS peut également s'adresser à d'autres architectures de batteries du futur, en caractérisant simultanément

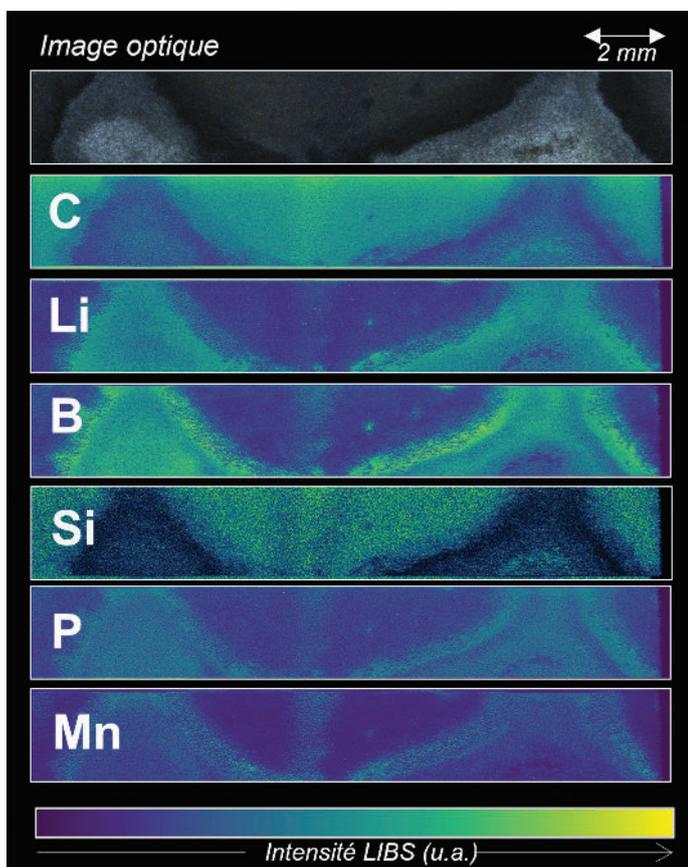


Figure 10 - Exemple de réalisation commune Ablatom-IFPEN : imagerie LIBS multi-élémentaire de la surface d'une électrode négative composite Si-C de batterie Li-ion après vieillissement.

les rapports atomiques d'éléments majeurs et mineurs dans des électrolytes solides pour le diagnostic de la présence d'impuretés, des changements de composition et gradients chimiques.

Quelques exemples de réalisation issus d'autres domaines

Dans le domaine biomédical, le concept de microscopie élémentaire par LIBS offre des résultats innovants pour l'évaluation préclinique des nanoparticules à base de métaux (tels que Au, Gd, Cd, Pt, W, Ti, Al, Cu) et la caractérisation des biopsies cutanées ou organes (rein, foie, muscle, cerveau, tumeur) pour l'aide au diagnostic médical [7].

Dans le domaine de l'énergie solaire, la caractérisation spatiale multi-élémentaire mène à l'évaluation des performances des composants semi-conducteurs et à l'amélioration des processus de production. En ce sens, la microscopie élémentaire par LIBS permet d'analyser les impuretés élémentaires dans différents substrats, par exemple à base de silicium solide, ou de rapporter la distribution d'un dopant pour une meilleure compréhension des procédés de fabrication de cellules photovoltaïques.

Dans le domaine de la métallurgie, l'imagerie LIBS présente des atouts essentiels pour l'identification ou le contrôle rapide de la composition de pièces métalliques grâce à ses capacités d'analyse sans contact qui n'engagent aucune nécessité de préparation des échantillons. S'adaptant à l'échantillon, la LIBS permet aussi l'analyse de petits composants métalliques, présents par exemple sur les cartes de circuits imprimés tels que Al, Au, Ba, Ca, Co, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Sb, Si, Sn, Ti et Zn.

Dans le domaine plus général de la science des matériaux, cette technologie peut conduire au diagnostic de l'état d'usure, à la localisation de défauts structuraux, ou encore à la caractérisation de revêtements et d'état de surface en croisant deux modes d'analyse : imagerie 2D et profilage de profondeur.

Repousser les limites et les performances pour répondre aux nouveaux besoins

La philosophie d'Ablatom et de l'Institut Lumière Matière est d'ores et déjà de développer les systèmes pour repousser les limites de performance et anticiper les besoins de demain : rapidité, résolution spatiale latérale et sensibilité. Aujourd'hui, les progrès technologiques relatifs à la technologie LIBS permettent d'envisager les mille mesures par seconde (1 000 Hz). Une telle fréquence d'acquisition ouvrira le champ des possibles de la LIBS pour envisager la caractérisation d'échantillons à une toute nouvelle échelle. Cette caractéristique de rapidité d'analyse, associée à des critères de compacité et de coût modéré, font de l'imagerie LIBS multi-élémentaire une technologie facile d'accès pour les nouveaux utilisateurs tant au laboratoire qu'en industrie. La société Ablatom, aujourd'hui composée d'ingénieurs et de docteurs aux compétences pluridisciplinaires, continue d'œuvrer collectivement pour proposer aujourd'hui et demain un concept de mesure chimique doté à la fois d'une grande simplicité de mise en œuvre et d'un caractère extrêmement polyvalent. Réceptif à l'apparition de nouveaux besoins et aujourd'hui riche de sa collaboration avec de nombreux experts matériaux, Ablatom est en mesure de proposer des solutions spécifiques, dédiées, performantes et optimisées pour les besoins actuels et à venir.

- [1] L. Jolivet, M. Leprince, S. Moncayo, L. Sorbier, C.P. Lienemann, V. Motto-Ros, Review of the recent advances and applications of LIBS-based imaging, *Spectrosc. Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **2019**, 151, p. 41-53.
- [2] R. Noll, C. Fricke-Begemann, S. Connemann, C. Meinhardt, V. Sturm, LIBS analyses for industrial applications – an overview of developments from 2014 to 2018, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2018**, 33(6), p. 945-956.
- [3] S. Legnaioli *et al.*, Industrial applications of laser-induced breakdown spectroscopy, *Anal. Methods*, **2020**, 12, p. 1014-29.
- [4] L. Jolivet, L. Catita, O. Delpoux, C.P. Lienemann, L. Sorbier, V. Motto-Ros, Direct multi-elemental imaging of freshly impregnated catalyst by laser-induced breakdown spectroscopy, *J. Catal.*, **2021**, 401, p. 183-187.
- [5] F. Trichard *et al.*, Imaging of alumina supports by laser-induced breakdown spectroscopy: a new tool to understand the diffusion of trace metal impurities, *J. Catal.*, **2018**, 363, p. 183-190.
- [6] S. Moncayo *et al.*, Exploration of megapixel hyperspectral LIBS images using principal component analysis, *J. Anal. At. Spectrom.*, **2018**, 33(2), p. 210-220.
- [7] B. Busser, S. Moncayo, J.L. Coll, L. Sancey, V. Motto-Ros, Elemental imaging using laser-induced breakdown spectroscopy: a new and promising approach for biological and medical applications, *Coord. Chem. Rev.*, **2018**, 358, p. 70-79.

Florian TRICHARD*, cofondateur et président d'Ablatom, et **Lina JOLIVET**, ingénieure R&D.

Ablatom, Cité Lyonnaise de l'environnement et de l'analyse, Villeurbanne.

* f.trichard@ablatom.com