

mesures

mesures.com

LE MAGAZINE DE L'OPTIMISATION DES PROCESS INDUSTRIELS DEPUIS 1936

GUIDE D'ACHAT

LES
DÉBITMÈTRES
DE PROCESS

INFORMATIQUE INDUSTRIELLE

L'edge **prolonge**
le cloud
dans l'usine

PAGE 32

SOLUTIONS

**FACE À LA PÉNURIE
DE COMPOSANTS,
LA VISION INDUSTRIELLE
SE RELOCALISE**

ENTRETIEN Crise énergétique : « La période doit servir de leçon »

LES ANALYSES HYPERSPECTRALES ENRICHISSENT LES IMAGES

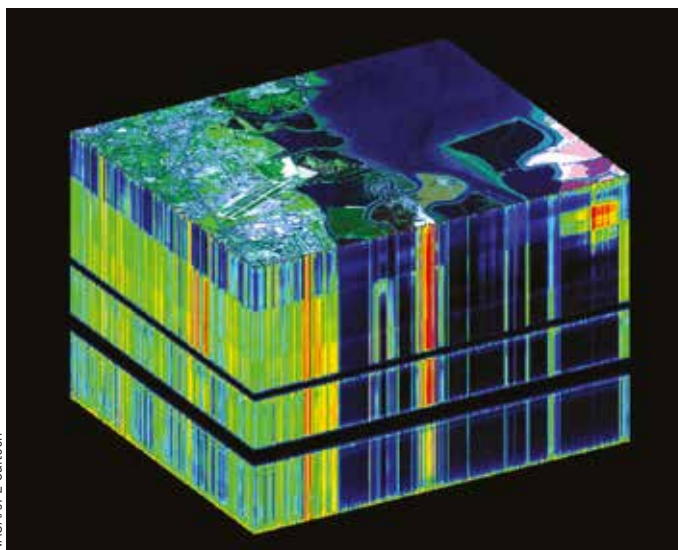
L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE COMBINE VISION ET SPECTROSCOPIE EN ASSOCIANT UN SPECTRE À CHAQUE PIXEL D'UNE IMAGE. LA TECHNOLOGIE A FAIT SES PREUVES À TRAVERS LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET LES APPLICATIONS MILITAIRES, AVANT DE GAGNER L'INDUSTRIE. ELLE PERMET D'ANALYSER ET DE CARTOGRAPHIER LA COMPOSITION CHIMIQUE D'UN OBJET OU D'UN ÉCHANTILLON : UN CHAMP D'APPLICATIONS TRÈS VASTE.

Encore peu présente dans l'industrie, la vision hyperspectrale s'est développée dans les années 1980. En décomposant la lumière visible, elle permet d'analyser de façon non destructive la composition chimique d'un objet, d'un matériau ou d'une substance, tout en fournissant une image 2D. Le champ d'application est vaste et les progrès de la technologie la rendent de mieux en mieux adaptée aux applications industrielles.

On parle de vision hyperspectrale lorsqu'une image est décomposée en plus d'une centaine de bandes de longueurs d'onde. «*La notion de spectre continu, donc de bandes spectrales étroites et contiguës, est essentielle*», note la Société française de photogrammétrie et télédétection (SFPT)⁽¹⁾. Cette définition distingue l'imagerie hyperspectrale d'autres technologies, notamment de la vision multispectrale. Si cette dernière décompose également une image en plusieurs bandes de longueurs d'onde, elle n'enregistre pas un spectre complet avec la même finesse. Les bandes détectées sont plus larges et moins nombreuses qu'en vision hyperspectrale.

DES DONNÉES ENRICHIES

Les données issues de l'imagerie hyperspectrale sont donc plus riches : à chaque pixel de l'image obtenue est associé un spectre.



Un cube de données, ou *datacube*, est une image dont chaque pixel contient un spectre complet. On peut aussi le voir comme un empilement d'images dans différentes bandes de longueurs d'onde.

Celui-ci permet d'identifier la composition chimique des objets observés, grâce aux pics d'intensité dans certaines longueurs d'onde de la lumière réfléchie ou diffusée. On obtient ainsi un *datacube*, ou cube de données : une image en deux dimensions, enrichie par une troisième dimension spectrale.

Une caméra hyperspectrale fonctionne avec un capteur d'image classique, généralement matriciel. Souvent, les fabricants de ces caméras utilisent des capteurs existants sur le marché. Selon la plage de longueurs d'onde visée, on peut trouver des caméras utilisant des capteurs CMOS ou sCMOS, InGaAs, voire MCT. Ces différents types de capteurs peuvent être complémentaires et étendre la plage spectrale du système.

Ce qui fait la spécificité des caméras hyperspectrales, c'est le dispositif optique en amont du capteur, destiné à sélectionner une fine bande de longueurs d'onde ou à disperser la lumière en une multitude de longueurs d'onde. Il peut s'agir d'un prisme ou d'un réseau de Bragg. Selon les applications, la largeur nécessaire des bandes de longueurs d'onde est variable. Des bandes plus étroites peuvent permettre de discerner plus précisément des signatures chimiques. «*La résolution spectrale dépend de l'ensemble de la conception de la caméra : les composants optiques, le capteur et la façon dont ils sont agencés*», explique Julien Romann, responsable R&D chez Photon Lines. Les caméras du marché ont des plages



Photon Lines

Les caméras hyperspectrales peuvent trier des matériaux, détecter une contamination ou analyser la qualité d'un produit.

de longueurs d'onde souvent jusque dans l'infrarouge, décomposées en un nombre de bandes allant d'une centaine à plus de 700, selon les modèles.

Il existe ensuite plusieurs façons d'acquérir les données. L'une d'elles est le système *push-broom*, ou *line-scan*: c'est le même principe qu'une caméra linéaire, utilisée notamment pour les observations aériennes depuis les années 1980 (voir encadré ci-dessous). En déplaçant la caméra ou l'objet, on reconstitue une image complète, ligne par ligne. Mais en imagerie

hyperspectrale, le capteur linéaire est remplacé par une matrice, dont chaque ligne reçoit une bande de longueurs d'onde différente. « C'est une technologie très présente sur le marché, car elle offre le meilleur compromis entre résolution spectrale et spatiale », estime Julien Romann (Photon Lines). Elle convient bien aux applications sur les lignes de production, où les produits défilent sur un convoyeur, mais aussi à l'inspection aérienne.

Une autre méthode consiste à acquérir un *datacube* en capturant une image en deux

dimensions pour chaque bande de longueurs d'onde, une par une. On parle de « scanning spectral ». Pour cela, il est possible d'utiliser une succession de filtres ou de faire varier l'angle du système de filtrage. Il n'est ainsi pas nécessaire de déplacer l'objet ou la caméra.

On peut également obtenir une image globale en une seule acquisition : les pixels du capteur matriciel sont alors regroupés en « hyperpixels ». Les différentes longueurs d'onde de la lumière y sont réparties entre les pixels individuels de chaque hyperpixel. Cette méthode permet d'obtenir un *datacube* plus rapidement et sans éléments mobiles sur la caméra, mais au détriment de la résolution spatiale ou spectrale. « Utiliser beaucoup d'hyperpixels signifie peu de pixels dans chacun d'eux, et donc peu de bandes spectrales. À l'inverse, des hyperpixels contenant un grand nombre de pixels offrent une bonne résolution spectrale, mais une mauvaise résolution spatiale », détaille Julien Romann.

40 ANS DE DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE

Si la vision hyperspectrale est une technique encore jeune dans l'industrie, elle a déjà quatre décennies d'histoire. Son exploitation a commencé dans des imageurs aériens : « L'obtention de cartes géologiques quantitatives a été le domaine primaire des images hyperspectrales et a établi la renommée de la technique dans les années 1980 », rappelle une synthèse sur l'imagerie hyperspectrale publiée par le CNES en 2008 (*). Elle s'est ensuite étendue aux observations terrestres par satellite et aux applications militaires. Les travaux académiques comme la recherche privée ont contribué au développement de la technologie et à l'émergence de différents fabricants de caméras, qui proposent aujourd'hui des modèles pour des applications industrielles, comme

Resonon, Headwall Photonics ou Specim. Ainsi, l'entreprise norvégienne Norsk Elektro Optikk (NEO) a commencé à travailler sur le sujet en 1995. Elle a notamment collaboré avec l'Agence spatiale européenne sur un projet d'imagerie hyperspectrale par satellite, avant de vendre ses caméras via la société HySpex. Photon etc. est fondée au Canada en 2002 pour exploiter une technologie de filtre développée au Caltech, l'université californienne. En France, à partir de 2020, Photon Lines a bénéficié de financements européens pour le développement d'une application de vision hyperspectrale à haute vitesse pour l'industrie agroalimentaire. Le projet a abouti à la commercialisation d'une nouvelle caméra en octobre 2022.

(*) https://www.sfpt.fr/hyperspectral/?page_id=23

LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Dans l'industrie, la vision hyperspectrale est adaptée à l'analyse d'échantillons en laboratoire, pour la R&D, mais aussi pour le contrôle de production. Dans le secteur minier, par exemple, elle permet l'analyse de carottes de forage. « C'est une des premières applications industrielles sur lesquelles nous avons travaillé, à partir de 2008, portés par l'explosion du secteur », rapporte Laura-Isabelle Dion-Bertrand, directrice des ventes et du marketing chez Photon etc. L'entreprise commercialise aujourd'hui la plate-forme nCore, spécialisée

dans ce domaine. Certaines sociétés se consacrent entièrement à la géotechnique et au secteur minier, comme Corescan, qui propose notamment des machines associant la profilométrie 3D à l'imagerie hyperspectrale.

La fabrication d'équipements spécialisés pour certains types d'échantillons permet de simplifier l'utilisation de l'imagerie hyperspectrale. C'est la démarche qui a motivé le développement de l'HypeReal par Indatech, une entreprise du groupe Chauvin-Arnoux. La solution, commercialisée depuis fin 2020, s'adresse à l'industrie pharmaceutique. « Elle analyse les poudres, comme celles utilisées pour la fabrication de comprimés, ou les lyophilisats, explique Fabien Chauchard, le directeur technique. L'imagerie hyperspectrale permet de contrôler l'humidité des échantillons, leur composition ou encore la taille des particules. » Contrairement à la spectrométrie, qui ne donne qu'un résultat moyen sur l'échantillon étudié, l'imagerie permet de cartographier ces différents paramètres et de mettre en évidence des hétérogénéités.

L'HypeReal est conçu pour être simple d'utilisation : les échantillons sont placés dans un tiroir et scannés par le dessous, à travers leur flacon. Le système contourne les difficultés liées aux reliefs de la surface ainsi que les risques de contamination du produit et d'exposition des utilisateurs. La capture de plusieurs échantillons simultanément permet de visualiser sur une même image les effets d'un changement de composition ou de différents paramétrages d'une machine de production. « On peut voir apparaître un gradient lié à ces variations. L'interprétation d'une image est immédiate, alors que celle d'un spectre est plus difficile, argumente Fabien Chauchard. Pour faciliter cette étape, les longueurs d'onde importantes sont colorisées artificiellement, afin d'être immédiatement visibles. Ainsi, même des non-spécialistes peuvent comprendre les résultats. »

DES CAMÉRAS ADAPTÉES AU CONTRÔLE EN LIGNE

Dans l'industrie du recyclage, le tri des matières plastique est un cas d'usage courant. Bien sûr, des systèmes automatisés existent sans cette technologie, basés par exemple sur la vision des couleurs, voire sur la spectrométrie infrarouge. Mais la vision hyperspectrale donne des informations plus complètes, utiles pour localiser et différencier les matériaux.

En agroalimentaire, la technique permet de détecter des défauts ou des contaminations invisibles en vision traditionnelle. La technologie peut aussi évaluer la maturité de fruits



Il est possible d'utiliser la vision hyperspectrale pour effectuer des analyses microscopiques.

Photon etc.

et légumes ou la qualité de certains mélanges ou aliments selon leur composition chimique et leur homogénéité.

Pour le contrôle en ligne, les caméras hyperspectrales du marché peuvent être limitées face aux cadences les plus élevées. En effet, leur fréquence d'acquisition est le plus souvent de quelques centaines d'images par seconde en pleine résolution, jusqu'à 500 pour les plus rapides. Le modèle Baldur V-1024 N de Hypsux peut même atteindre 1 000 images par seconde, pour 1 024 pixels. Mais, historiquement, dans les applications aériennes ou spatiales, les cibles étaient très distantes. La vitesse d'acquisition n'était donc pas un paramètre critique.

« Le projet qui a mené au développement de notre nouvelle caméra était dès le départ motivé par un constat : un grand nombre d'applications industrielles ne permettaient pas l'utilisation des caméras push-broom existantes, en raison de leur cadence d'acquisition limitée par

rapport au défilement des éléments à contrôler, explique Julien Romann (Photon Lines). Les modèles les plus haut de gamme étaient très coûteux et ne correspondaient pas toujours aux besoins spécifiques des applications. Tout l'enjeu pour nous était donc de développer une caméra présentant des résolutions spatiale et spectrale équivalentes aux caméras existantes, mais offrant une cadence d'acquisition largement supérieure. » Spécialisée en imagerie à haute vitesse, Photon Lines a donc mis au point l'eyeSpid, atteignant 3 000 lignes par seconde en pleine résolution, disponible depuis cette fin d'année.

Les caméras hyperspectrales peuvent aussi être embarquées sur des robots ou véhicules automatisés. « Nous avons développé un système pour le milieu viticole, à partir d'une caméra du marché embarquée sur un engin circulant à travers les vignes, illustre Julien Romann. Il est couplé à un algorithme capable de reconnaître en temps réel des

DES OBJECTIFS POUR LA MICROSCOPIE

Comme une caméra classique, une caméra hyperspectrale peut être équipée de différents objectifs, en fonction de la taille de l'objet à analyser et de sa distance. «*La résolution spatiale de l'image dépend de ces différents paramètres*», précise Laura-Isabelle Dion-Bertrand, directrice des ventes et du marketing chez Photon etc. Les caméras hyperspectrales peuvent

être embarquées pour des observations aériennes à grande distance ou pour observer des objets proches, sur une chaîne de montage. Certains objectifs permettent d'appliquer l'imagerie hyperspectrale à la microscopie. Il existe d'ailleurs des systèmes de vision combinant plusieurs objectifs, comme le GRAND-EOS de Photon etc., qui associe imagerie micro et macroscopique.

Selon les applications et les logiciels, les données traitées peuvent être utilisées pour la création de rapports d'analyse, comme pour le déclenchement d'alarmes à des fins de tri automatisé.

L'exploitation de l'imagerie hyperspectrale dans l'industrie est récente et encore peu répandue. Cela peut s'expliquer par une méconnaissance de cette technologie, mais aussi par son coût, supérieur à celui de la vision classique ou de la spectroscopie. «*Mais pour beaucoup d'applications, l'investissement est vite rentabilisé*, estime Julien Romann (Photon Lines). *Dans l'agroalimentaire, par exemple, les problèmes tels que la présence de corps étrangers ou la détérioration des produits frais coûtent très cher aux entreprises.*» Pour l'analyste de marché MMR, les avancées technologiques et la baisse des coûts devraient contribuer à la croissance du secteur.

«*Comme les applications industrielles sont très variées, il est difficile de proposer une solution clés en main*, ajoute Laura-Isabelle

signes de mildiou ou d'oïdium sur les plantes et de différencier ces maladies.» L'agriculture est donc un débouché important pour cette technologie, qui permet aussi de détecter le stress hydrique, d'analyser la maturité d'une culture ou encore d'estimer les propriétés organoleptiques de fruits ou légumes.

La tendance est de proposer des solutions intuitives. En fonction de ce que l'on cherche à mettre en évidence, il faut établir des spectres de référence des différents éléments. Par exemple, identifier les longueurs d'onde permettant de reconnaître un raisin sec d'un morceau de caoutchouc, indiscernables visuellement. Pour cela, perCLASS MIRA propose à

LE TRAITEMENT DES DONNÉES

Plus complexes qu'une simple image, les *datacubes* nécessitent des logiciels spécialisés. Si des photos colorisées permettent de rendre facilement intelligibles les résultats hyperspectraux, celles-ci nécessitent un travail de paramétrage en amont, plus ou moins complexe selon les logiciels. Mais, en fonction des applications, les besoins peuvent être très différents: «*Nos clients dans le domaine de la physique des matériaux veulent des données les plus brutes possible*, rapporte Laura-Isabelle Dion-Bertrand (Photon etc.). *Mais, plus généralement, la tendance dans l'industrie est de rechercher des données simplifiées, afin de ne pas dépendre d'un seul spécialiste de la technologie pour utiliser l'application.*»

«*Un datacube est très riche et peut être exploité de plusieurs façons*, décrit Julien Romann (Photon Lines). *Il est possible d'extraire des images à certaines longueurs d'onde mais, le plus souvent, on travaille sur les spectres.*» Les *datacubes* sont standardisés et peuvent être traités par des logiciels généralistes comme MATLAB. Mais beaucoup de fabricants de systèmes de vision hyperspectrale ont également développé leur propre logiciel, comme eyeSPICE pour Photon Lines. Parfois, l'offre compte plusieurs logiciels, plus spécialisés, comme chez Photon etc., pour répondre à la diversité des besoins. Il existe également des logiciels indépendants des fabricants de caméras comme Prediktera, Perception Studio, ou encore perCLASS MIRA.



Certains logiciels et équipements simplifient la prise en main des analyses hyperspectrales. Une fois le système paramétré, il peut être utilisé par des non-spécialistes et fournir des résultats faciles à interpréter.

l'utilisateur de les sélectionner directement sur des images de référence. À partir de l'échantillon de données ainsi constitué, un système d'apprentissage automatique crée un modèle de reconnaissance et de classification de ces éléments.

Indatech a fait le choix d'utiliser Prediktera, intégré à son système HypeReal via un écran tactile. «*Le logiciel possède un mode expert permettant de configurer les longueurs d'onde recherchées*, décrit Fabien Chauchard (Indatech). *Puis les routines créées sont appliquées très simplement par les opérateurs.*»

Dion-Bertrand (Photon etc.). *Il est donc utile de travailler avec des intégrateurs spécialistes pour définir la faisabilité d'une application et évaluer son retour sur investissement.*» Selon elle, l'évolution des réglementations, en termes de recyclage ou dans l'agroalimentaire, pourraient à l'avenir contribuer à développer les besoins en vision hyperspectrale. Mais «*les applications possibles sont très ouvertes à l'imagination*»!

Antoine Cappelle ◆

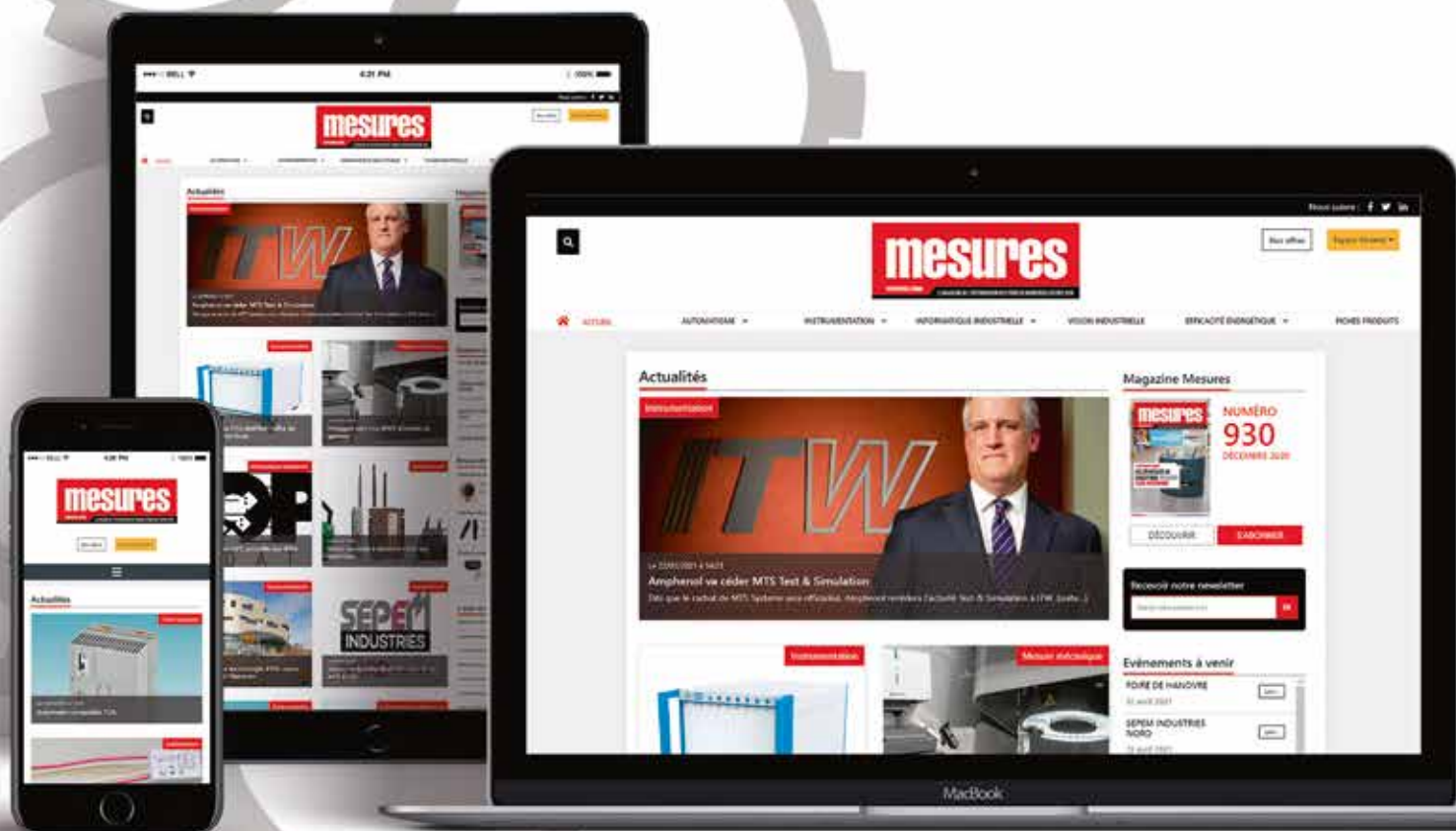
(1) http://www.sfpt.fr/hyperspectral/?page_id=20

À DÉCOUVRIR !

mesures

mesures.com

LE MAGAZINE DE L'OPTIMISATION DES PROCESS INDUSTRIELS DEPUIS 1938



Le site de **référence** dans l'univers
de l'**optimisation des process industriels**

www.mesures.com

OPTIMISATION DES PROCESS INDUSTRIELS