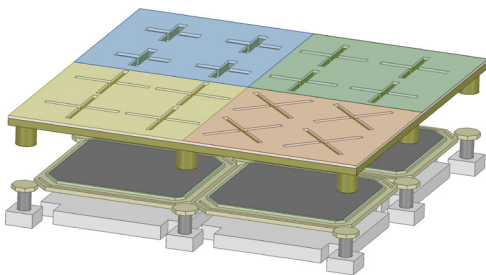


MATRICES DE MICROBOLOMÈTRES POUR L'IMAGERIE INFRAROUGE MULTISPECTRALE

Laurent DUSSOPT*, Thomas PERRILLAT-BOTTONET

CEA-Léti, Grenoble, France

*laurent.dussopt@cea.fr



Les technologies matérielles et logicielles de l'imagerie infrarouge sont de plus en plus accessibles et leurs usages se diversifient à des domaines nécessitant à la fois des spécifications plus exigeantes (compacité, performance, coût) et des fonctions plus complexes. L'information spectrale fait partie de ces fonctions qui échappent encore aujourd'hui aux imageurs intégrés commerciaux mais sont au cœur d'applications industrielles à fort enjeu.

<https://doi.org/10.1051/photon/202613841>

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.

L'imagerie infrarouge s'est imposée comme une technologie clé dans de nombreux domaines : surveillance, défense, contrôle industriel, observation scientifique ou de loisir. D'autres applications sont en émergence tels que l'automobile et les drones civils. Au cœur de ces applications se trouvent les matrices de microbolomètres, des détecteurs thermiques compacts, sensibles et peu coûteux, capables de fonctionner à température ambiante. Ils fonctionnent typiquement dans la

bande thermique 8-14 μm mais dans certains cas peuvent être étendus à l'infrarouge moyen (3-5 μm) [1].

Depuis quelques années, des fonctions complémentaires sont en développement telles que l'imagerie multispectrale et l'imagerie polarimétrique afin d'extraire davantage d'informations physiques sur les scènes observées. L'imagerie multispectrale peut être utilisée pour la thermographie absolue, c'est-à-dire une mesure précise de la température et de l'émissivité des objets constituant la scène observée. Elle est aussi utilisée pour la détection

de gaz dans la surveillance de sites industriels ou la surveillance environnementale car de nombreux gaz présentent des raies d'absorption dans la gamme infrarouge. Le tri de matériaux est aussi une application envisagée. L'imagerie polarimétrique apporte également une information dans l'analyse d'une scène en aidant à qualifier la nature d'un objet ou en améliorant les contrastes, des capacités importantes dans la défense ou pour les transports.

Ces fonctions sont réalisées aujourd'hui par des dispositifs optiques (filtres, polariseurs, ●●●

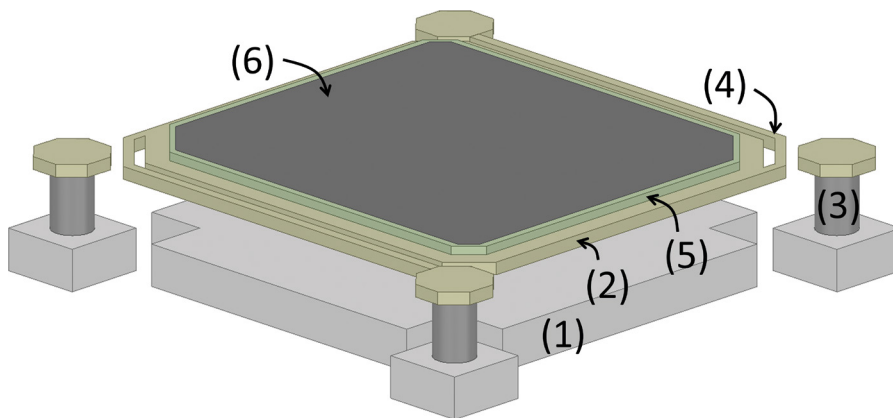


Figure 1. Vue simplifiée d'un bolomètre : (1) réflecteur, (2) planche, (3) pilier, (4) bras, (5) thermomètre, (6) absorbeur.

interféromètres, etc.) indépendant des imageurs. Leur intégration au sein du capteur d'imagerie peut ouvrir la voie à des systèmes plus compacts, plus robustes, plus économiques et peut-être plus performants par certains aspects.

MATRICES DE MICROBOLOMÈTRES MULTISPECTRALES

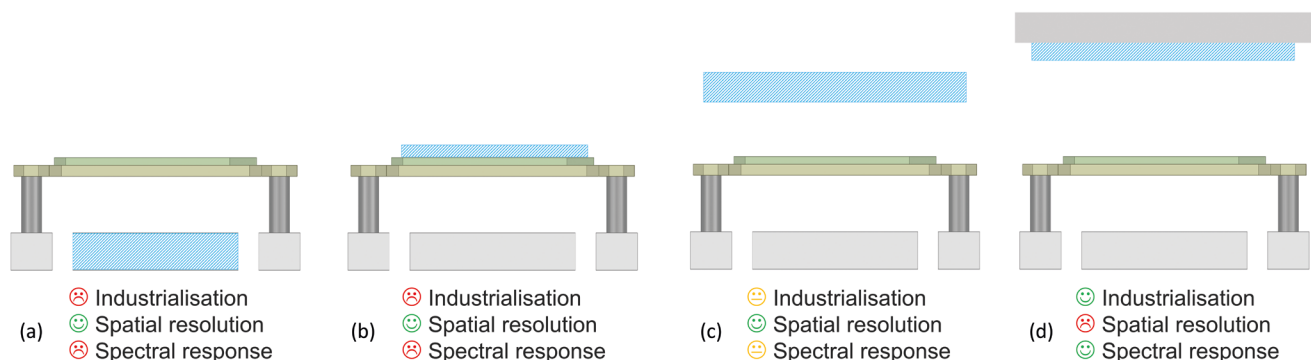
Un microbolomètre est un détecteur de la famille des systèmes micro-électro-mécaniques (MEMS) (Fig. 1). Il est généralement constitué d'une planche centrale comprenant un absorbeur optique, typiquement un film métallique résistif, et un transducteur électro-thermique, typiquement un matériau thermo-résistif tel que l'oxyde de vanadium. La planche est suspendue à 1-2 μm au-dessus d'un réflecteur grâce à deux bras très fins qui ont une triple

fonction : maintien mécanique de la planche, isolation thermique de la planche et connexion électrique entre le transducteur et l'électronique de lecture. Le principe de fonctionnement peut se résumer simplement : le flux optique incident est converti en échauffement par l'absorbeur et cet échauffement est mesuré électriquement grâce au transducteur. Les imageurs actuels comprennent jusqu'à plus d'1 million de pixels, chacun de taille entre 8 et 17 μm .

Pour un imageur multispectral, l'enjeu consiste à intégrer au plus près ou au sein du bolomètre un dispositif capable d'imposer une réponse spectrale sélective et différenciée

en différentes zones de la matrice, idéalement différente pixel à pixel. Plusieurs approches ont été envisagées et peuvent être comparées au regard de plusieurs critères que sont i) la réponse spectrale obtenue et sa compatibilité avec l'application visée, ii) la résolution spatiale de l'image dans chaque bande spectrale, iii) et enfin l'industrialisation ou la capacité à fabriquer des imageurs en grande série à un coût compétitif (Fig. 2). Ainsi, une première solution pour rendre le dispositif spectralement sélectif est de modifier le réflecteur qui détermine la longueur d'onde de résonance de la cavité optique sous le bolomètre. Une seconde option est de placer une structure absorbante résonante sur la planche bolométrique en lieu et place de l'absorbeur large bande habituel. Ces deux options n'ont pas permis des réponses spectrales intéressantes dans l'état de l'art actuel et sont difficiles à industrialiser car elles remettent en cause la structure même du bolomètre. La troisième option, que nous retenons, sera décrite plus en détails dans la section 3. Une quatrième option consiste à placer une matrice de filtres sous la fenêtre de boîtier du capteur. Cette dernière option ne permet pas de varier la réponse spectrale pixel à pixel pour des raisons optiques car la fenêtre est placée à une distance nécessairement grande

Figure 2. Quatre stratégies de réalisation de matrices bolométriques multispectrales consistant à intégrer un dispositif de sélection spectrale sous le bolomètre (a), sur le bolomètre (b), au-dessus du bolomètre à courte distance (c), ou sous la fenêtre du boîtier sous vide (d).



devant la taille des pixels. Elle a fait l'objet néanmoins d'une démonstration industrielle récente par la NASA et Leonardo DRS [2].

FILTRES INTÉGRÉS SUR PLAN FOCAL

La solution technique en développement au CEA-Léti consiste à suspendre un filtre métallique fin au-dessus de chaque bolomètre (Figure 2c). Les filtres appartiennent à la famille des surfaces sélectives en fréquences (acronyme FSS en anglais) bien connue dans le domaine micro-onde pour les radars

et les communications hertziennes. Des ouvertures résonantes quasi-périodiques dans un film métallique constituent un filtre passe-bande à la longueur d'onde de résonance (Figure 3). Dans notre cas, ces ouvertures sont des croix dont la longueur et la période sont dans la gamme de la demi-longueur d'onde (4-6 μm). Ces motifs ont été choisis car ils sont non polarisés optiquement et ils permettent de définir une bande passante de l'ordre de 2-3 μm dans la gamme LWIR (8-16 μm). Ils sont définis avec une lithographie standard et peuvent varier pixel à pixel. ●●●

LUMINANCE ET THERMOGRAPHIE

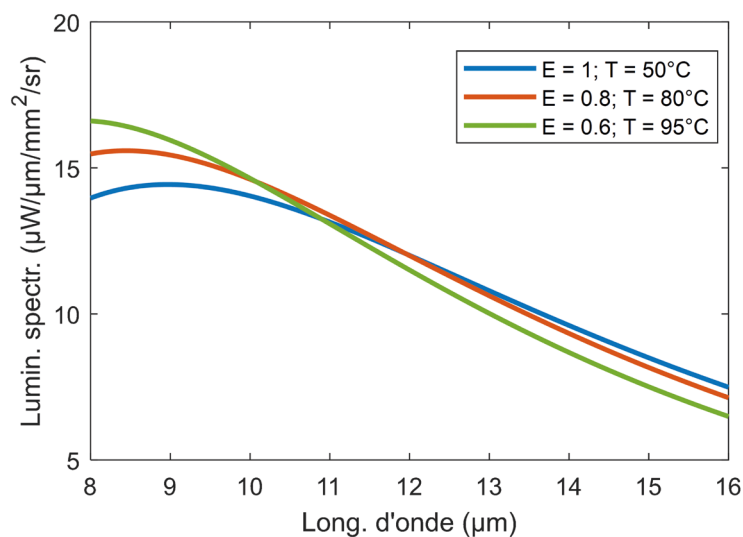


Figure. Luminance spectrale de trois objets de températures et émissivités différentes mais présentant une luminance totale identique sur la bande 8-14 μm .

La luminance propre d'un objet à une température T est le produit de son émissivité ϵ et de la luminance du corps noir à la température T . Le corps noir est un objet théorique dont la luminance est donnée par la loi de Planck. L'objet est donc caractérisé par deux grandeurs (T, ϵ). La Figure 5 présente la luminance spectrale de plusieurs objets d'émissivité et de température très différentes. Une caméra infrarouge classique ne sera pas capable de distinguer ces objets car ils ont la même luminance totale sur la gamme 8-14 μm . En revanche, une caméra multispectrale mesurant la luminance en plusieurs sous-parties de ce spectre permettra d'estimer les paramètres (T, ϵ) de chaque objet, donc de fournir une mesure plus précise de la température et d'estimer la nature du matériau. On parle alors de thermographie absolue et de séparation température-émissivité.



Lasers
pour applications
scientifiques, spatiales,
médicales, industrielles
et de défense



LE SPÉCIALISTE
DES TECHNOLOGIES
LASER

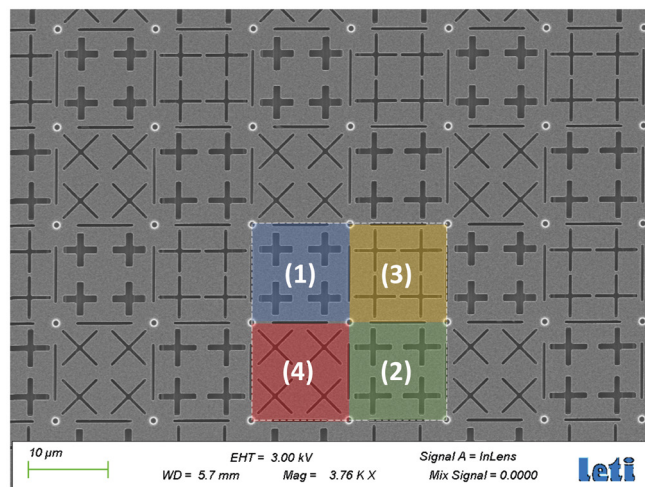
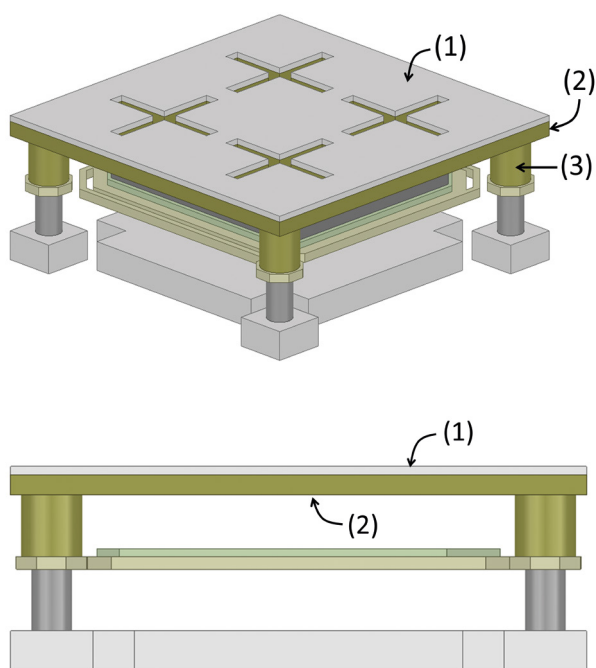


Figure 3. Vues simplifiées d'un bolomètre avec filtre : (1) filtre FSS, (2) couche de support, (3) piliers. Vue de dessus au microscope électronique à balayage (MEB) d'une partie de matrice multispectrale ; (1) à (4) désignent 4 pixels de bandes différentes constituant le motif périodique de la matrice.

Le film métallique est constitué d'aluminium et il est déposé sur une couche de silicium amorphe qui n'a pas de fonction optique mais contribue à la rigidité mécanique. La structure est en appui sur les piliers des bolomètres, ce qui permet à la fois d'avoir une grande densité de points d'appuis et de ne pas imposer un encombrement supplémentaire sur la puce. Ce type d'appui est un savoir-faire relativement unique dans le domaine et le fruit de plusieurs années de développement, les verrous en sont la tenue mécanique de la structure et l'intégrité des bolomètres situés en-dessous.

Cette solution présente deux avantages importants : elle repose sur des matériaux et procédés standards dans le monde industriel et elle permet de réaliser les différents filtres de la matrice avec un seul niveau de lithographie. La figure 3 présente un exemple de matrice dans laquelle quatre filtres différents sont intégrés et distribués en macro-pixels ($24 \times 24 \mu\text{m}^2$) de 4 pixels élémentaires ($12 \times 12 \mu\text{m}^2$ chacun).

Cette solution a été conçue pour la bande LWIR (8-16 μm) et mise en œuvre sur des matrices VGA (640×480 pixels) au pas de 12 μm , une taille de

pixel qui représente aujourd'hui une part significative du marché de l'imagerie IR. Nos premiers prototypes nous ont permis de démontrer des réponses spectrales et des performances électro-optiques en très bon accord avec nos modèles (Fig. 4) [3]. Une perspective possible est de la décliner sur une gamme spectrale

plus large, par exemple pour inclure la bande MWIR (3-5 μm).

APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

Le prototype présenté ci-dessus est une preuve de concept de la technologie, il va permettre de tester son fonctionnement sur différents cas

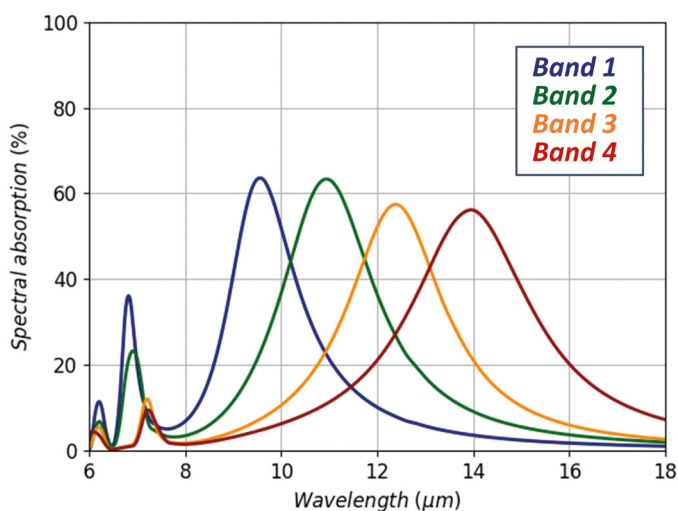


Figure 4. Réponses spectrales en absorption de bolomètres avec filtres FSS intégrés.

d'usages intéressant les partenaires du projet Brighter [4] dans le domaine de la thermographie absolue (Encart 1) avec un travail important sur les algorithmes associés. Ce nouveau type de capteur nécessite également des algorithmes dédiés de dématricage pour restituer une image de résolution et qualité optimales dans chaque bande spectrale.

La technologie d'intégration présentée ici est relativement versatile : elle offre de multiples perspectives d'évolutions, notamment sur l'élargissement de la gamme spectrale au moyen infrarouge et sur la conception de filtres dédiés à la détection de gaz. L'imagerie polarimétrique, utilisant des filtres polarisants, suscite également un grand intérêt pour l'analyse de scène.

Enfin, à ces technologies matérielles et ces modalités d'imagerie sont associées des technologies logicielles, dont l'intelligence artificielle, capables d'une grande capacité d'analyse automatique et de compréhension d'une scène [5].

CONCLUSION

L'imagerie multispectrale en gamme IR comprend de nombreuses applications dans les domaines de la thermographie, de la détection de gaz, de la surveillance ou des futurs véhicules autonomes. Nous avons développé et démontré une nouvelle technologie d'imageur holométrique multispectral en rupture avec les solutions commerciales existantes et qui peut conduire à des compromis de performance, compacité et coût très intéressants. Ces prototypes sont maintenant en phase de tests applicatifs au CEA et chez nos partenaires afin de qualifier leurs performances opérationnelles dans différents cas d'usage applicatifs. ●

REMERCIEMENTS

Ces activités sont co-financées par la société Lynred et le projet Brighter (KDT Joint Undertaking et Programme d'Investissement d'Avenir) [4].

RÉFÉRENCES

- [1] Jobert *et al.*, "Broadband uncooled microbolometers array unlocks new applications for midinfrared thermal imaging", Vol. 13904. SPIE, 2026
- [2] Schimert *et al.*, "Uncooled 2100×2048 focal plane array for NASA sustainable land imaging technology sensor", Vol. 13469. SPIE, 2025
- [3] Perrillat-Bottonet *et al.*, "12- μ m micro-bolometer Focal Plane Array with on-chip filters for multispectral LWIR imaging", Vol. 14023, SPIE, 2026
- [4] www.project-brighter.eu
- [5] Bao *et al.*, Nature **619.7971**, 743 (2023)



CHINA INTERNATIONAL
OPTOELECTRONIC EXPO

CIOE 2026

THE 27TH CHINA INTERNATIONAL OPTOELECTRONIC EXPOSITION

Powering Optical Innovations

September 9-11, 2026

Shenzhen World Exhibition & Convention Center

260,000M² Exhibition Area

150,000+ Visitors

4,000+ Exhibitors

Exhibit Profile

Optical Material
Optical Component
Optical Processing Equipment
Sapphire Processing & Application
Optical Film Component
Optical Coating Material
Optical Coating Equipment
Optical Lens
Camera Module
Camera
Camera Accessory
Camera Module Processing Equipment
Optical Measuring Instrument
Optical Imaging System
Machine Vision & Industrial Automation
Endoscope & Accessories
Telescope & Astronomical Photography

Colocated with



IICIE

INTERNATIONAL
INTEGRATED CIRCUIT
INNOVATION EXPO

elexcon



Contact Us on WhatsApp



Sign-up to Visit

#CIOE2026

