

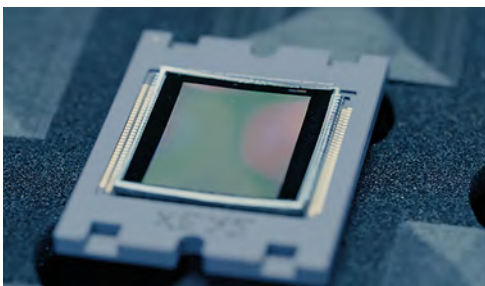
# LA COURBURE DE CAPTEURS D'IMAGE : UNE AMÉLIORATION ASTRONOMIQUE ?

**Emmanuel HUGOT<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, Aix Marseille Univ, CNRS, CNES, Marseille, France

<sup>2</sup> CURVE s.a.s., Marseille, France

\*[emmanuel.hugot@lam.fr](mailto:emmanuel.hugot@lam.fr)



<https://doi.org/10.1051/photon/202211736>

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.

## UNE APPROCHE BIO-INSPIRÉE

L'exemple le plus commun est bien entendu l'œil humain, système optique composé d'une lentille à focale variable – le cristallin – et d'une surface de réception des images sphériques – la rétine. Cette configuration permet à l'œil humain la captation d'un grand champ de vue avec un mécanisme de mise au point, sorte d'auto-focus naturel.

La surface focale d'un système optique n'a a priori aucune raison d'être plate. La courbure de champ dépend

Étudiée pour la première fois par la NASA au début des années 2000, l'idée de pouvoir modifier la forme des composants semi-conducteurs afin qu'ils épousent la surface focale d'un système optique a intéressé nombre d'acteurs mondiaux – Sony, Apple, Microsoft, Teledyne E2V pour ne citer que les plus importants – mais aussi français avec le CEA-LETI et le CNRS qui depuis plus de 10 ans ont permis des avancées grâce à la réalisation de prototypes de démonstration divers, jusqu'à l'utilisation récente de ces composants d'un nouveau genre pour l'instrumentation scientifique de pointe. Alors courber des capteurs d'image, oui, mais pourquoi ?

des paramètres des optiques acheminant les images. Les caméras grand champ utilisaient précédemment des plaques photo courbées afin de coller à cette courbure de champ et obtenir des images nettes à l'aide de lentilles simples. L'avènement des technologies de capteurs CCD dans les années 70 a changé la donne, et les jeux de lentilles des systèmes optiques ont dû être totalement repensés. La transition vers l'imagerie numérique a demandé plusieurs années et a dû suivre le rythme des évolutions des

capacités de production et des marchés, pour aujourd'hui aboutir à ce qui est dans toutes nos mains : les caméras ultra-compactes de smartphones produites par centaines de millions chaque année.

Libérer le paramètre de forme des surfaces focales en imagerie, c'est donc proposer de revenir à des optiques plus simples et de meilleure qualité, plus compactes et moins coûteuses, plus lumineuses et moins chromatiques. C'est élégant, mais est-ce aussi révolutionnaire qu'on le prétend ? Enquête.

### LES AVANTAGES TECHNIQUES

Courber les capteurs permet de supprimer entre un tiers et la moitié des optiques, par suppression des aplanisateurs de champ. Il en résulte un gain sur chacun des critères de performance d'un système optique : le champ de vue peut être augmenté, la qualité d'image et son homogénéité dans le champ sont améliorées, le vignetting peut être supprimé par conception. Le chromatisme, également, est fortement diminué sur les systèmes grand champ.

D'autres avantages apparaissent : réduction du volume et de la masse des systèmes optiques, réduction des potentielles erreurs d'alignement, réduction des temps d'intégration et tests, amélioration de la robustesse des systèmes.

En fournissant des images de meilleure qualité tant sur la distorsion, l'aberration chromatique ou l'illumination, les systèmes à capteur courbe ont un impact direct sur les analyses d'image en aval et sur la performance de leur interprétation. Ainsi, cette activité impacte tous les domaines de l'imagerie optique.

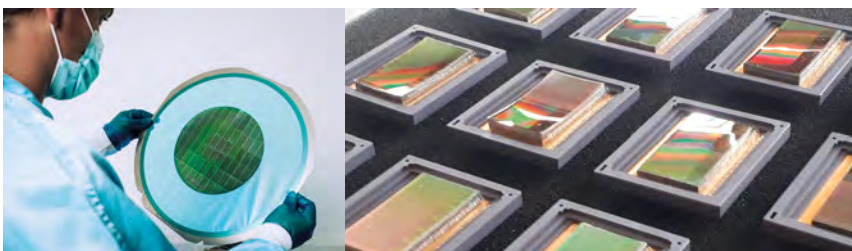
### IMPACT SOCIÉTAL ET ÉCONOMIQUE

Le bénéfice touche des domaines d'application comme l'imagerie embarquée, où le gain en masse et volume est primordial. On pourra citer l'imagerie depuis les drones pour la surveillance des cultures, où contrôler l'aberration chromatique est fondamental, puisque la réponse spectrale du système est au cœur de la détection de la maturité des champs survolés.

A l'aube du New Space, la course aux imageurs compacts et grand champ

s'intensifie. Les imageurs à capteurs courbes embarqués sur nanosatellites combinent qualité d'image, compacité, stabilité mécanique et lancement bas coût. L'Agence Spatiale Européenne (ESA) s'intéresse au sujet depuis plusieurs années, notamment à travers les études de son programme de surveillance des aurores boréales par nanosatellites pour la prévention des orages géomagnétiques depuis les pôles. Les imageurs embarqués devront viser un champ de 60 degrés dans l'Ultra-Violet. Dans ce cas, réduire le nombre d'optiques d'imagerie devient primordial pour maximiser le flux transmis.

Dans le cas de grands volumes de production, on peut citer le domaine des véhicules autonomes, des caméras de smartphone, des casques à vision nocturne et de la réalité virtuelle et augmentée. Dans le cas des véhicules autonomes, les systèmes fish-eye (180 degrés de champ) embarqués souffrent des problématiques de vignetting ainsi que de chromatisme dans les bords de champ. Dans une logique de minimisation des risques liés aux accidents potentiels des véhicules autonomes, l'amélioration de la qualité des images va permettre de réduire les incertitudes lors des analyses d'image temps réel. Dans le cas des smartphones, les enjeux s'articulent autour des imageurs grand champ, ultrafins et à fort volume de production. La courbure de capteurs permettant de réduire le nombre d'optique devient incontournable. Il en va de même pour les aspects de captation d'image pour la réalité virtuelle, où les dimensions des systèmes limitent encore leurs conditions d'utilisation.



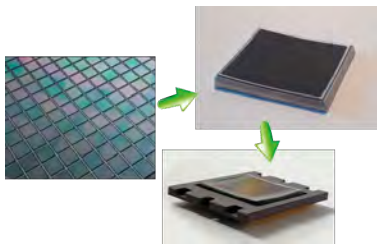
**Figure 1.** Capteurs courbes produits au Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, basés sur la technologie de capteurs HDPYX de la société Pyxalis. Ces capteurs ont servi de démonstrateurs pour la mission de surveillance des aurores polaires depuis l'espace qui doit être opérationnelle en 2027.

# YOUR PARTNER TO BUILD ULTIMATE LiDAR SYSTEMS

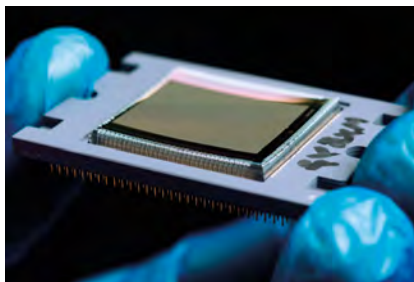
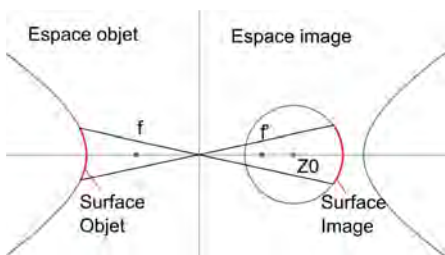


Avalanche  
Photodiodes

Discover at  
[lasercomponents.com](http://lasercomponents.com)



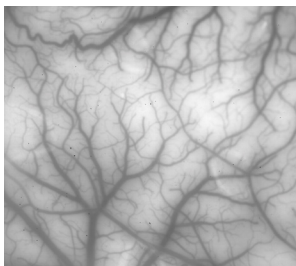
Après amincissement pour les rendre flexibles, les puces sont extraites de leurs wafers et assemblées sur des substrats ayant la forme voulue. L'étape finale consiste à procéder au câblage des puces courbes dans les céramiques standard, pouvant directement être utilisées avec des électroniques de lecture existantes.



comme un démonstrateur technologique par les instruments du VLT et de l'ELT qui ont déjà sélectionné cette solution comme baseline.

Dans le domaine de la surveillance de l'espace depuis la terre, le département de la défense américain DARPA a déjà mis en service le Space Surveillance Telescope (SST) il y a une dizaine d'années, muni de capteurs convexes installés sur un système d'ajustement actif permettant d'assurer la continuité entre les matrices de pixels, une sorte de co-phasage en plan focal.

Domaine totalement différent, les neurosciences. L'institut de Neurosciences de la Timone (INT) s'emploie à étudier le comportement des stimuli à la surface du cerveau, ceci à l'échelle mésoscopique. On parle alors d'un besoin d'imager une surface de cerveau assez large pour être représentative. Or, la surface du cerveau est elle-même convexe. Sous la coupe du programme européen MESO CORTEX, l'INT et le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille se sont associés en 2020 à la PME Curve s.a.s.



**Figure 2.** Représentation de la surface objet d'un capteur courbe concave selon les lois de l'optique paraxiale. Dans le cas de l'imagerie de la surface du cerveau pour applications bio-médicales, l'Institut de Neurosciences de la Timone exploite une caméra à capteur sphérique pour le suivi de l'activité surfacique du cortex.

© C. Gaschet, C. Fresillon-CNRS photothèque, I. Racicot, Curve s.a.s.

## SYSTÈMES EXISTANTS

A ce jour, très peu de systèmes ont jugé que cette technologie puisse servir leurs intérêts. Dans le domaine de l'astronomie, on citera le télescope Kepler et le télescope « Zwicky Transient Facility », deux télescopes de Schmidt dont la surface focale est naturellement convexe. Cependant, le module focal convexe est composé d'un tuilage de capteurs plans, la technologie de courbure n'étant pas encore suffisamment développée à l'époque de leur conception et réalisation.

Aujourd'hui en cours d'installation sur le site astronomique de Calar Alto au sud de l'Espagne, le télescope CASTLE (Calar Alto Schmidt Lemaître Explorer) sera la première démonstration d'utilisation d'un capteur courbe convexe pour l'astronomie. Piloté par le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille et l'Observatoire Astronomique de Strasbourg, il utilise une combinaison optique de Schmidt dont la courbure de champ

naturellement convexe se prête à l'utilisation d'un capteur courbe afin de se passer des lentilles d'aplanissement de champ qui dégradent la qualité optique. Le télescope sera dédié à l'observation de l'environnement des galaxies à faible brillance de surface, domaine d'observation très exigeant en termes de qualité optique. Prévu pour fin 2023, CASTLE est considéré



Le projet de télescope CASTLE (Calar Alto Schmidt Lemaître Explorer), en cours de construction au sommet de l'observatoire de Calar Alto au sud de l'Espagne, sera le premier télescope utilisant un capteur courbe pour observations astronomiques. Le concept optique, utilisant une cavité de Schmidt repliée, permet de placer le module focal en dehors du faisceau optique évitant ainsi l'obstruction centrale et les effets diffractifs des supports mécaniques. Le capteur CMOS convexe épouse la courbure naturelle de la surface focale d'un télescope de Schmidt. Cette innovation permettra d'explorer l'environnement des galaxies à faible brillance de surface.





© ESA

Septembre 1859. L'astronome Richard Carrington observe d'immenses taches à la surface du Soleil, signes d'activité intense et d'éjections de masse coronales en direction de la Terre. L'interaction avec la magnétosphère terrestre a créé un orage géomagnétique dont

l'impact fut tel que les aurores polaires se voyaient depuis les tropiques, et surtout, la communication par télégraphe s'en est retrouvée affectée durant plusieurs jours. Un tel événement aujourd'hui ferait tomber les communications mondiales et demanderait 5 à 10 années d'effort pour un retour à la normale pour un montant estimé à quelques... trillions d'euros. L'Agence spatiale européenne (ESA), à travers son département de surveillance du climat spatial, prévoit d'envoyer une flotte de nanosatellites chargés de surveiller l'activité des aurores polaires pour anticiper de tels événements. Ils imageront un champ de vue de 60×60 degrés carrés dans l'ultraviolet. Dans ce cadre l'ESA souhaite utiliser des capteurs courbes voire freeforms, afin de réduire le nombre d'optiques nécessaires et ainsi augmenter le flux récupéré par les caméras. Ces études sont aujourd'hui menées par le Centre Spatial de Liège, les PME Pyxalis et Curve, le Centre Spatial de l'Université de Grenoble et le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille.

et à l'ONERA pour développer, réaliser et mettre en fonction un imageur dédié, muni d'un capteur concave.

### ALORS QUEL AVENIR POUR LA COURBURE ?

Un grand nombre d'études optiques ont été menées et publiées, voire brevetées pour certaines afin d'évaluer l'apport de l'utilisation de tels composants. Les quelques prototypes et systèmes développés ces dernières années ont permis de mettre en évidence la faisabilité et la performance apportée par cette technologie. Cependant, la route reste longue avant d'arriver à un produit industriel et intégré à des systèmes existants et utilisés. La première étape consiste à

développer la production de masse, ce qui sous-entend, au-delà de la courbure collective que certains industriels développent, un aspect d'automatisation, répétabilité et industrialisation qui représente un développement lourd en termes financiers dans un domaine où tout coûte extrêmement cher.

Ce développement devra être pris en main par les acteurs les plus solides, et cela demandera surtout un changement de mentalité pour imposer ces solutions comme le nouveau standard. En attendant une validation pour simplifier les systèmes d'imagerie satellitaires, la science et l'astronomie seront les premiers à explorer le champ des possibles offert par ces composants d'un nouveau genre. ●

## RÉFÉRENCES

- [1] E. Muslimov, E. Hugot, W. Jahn *et al.*, Opt. Express **25**, 13 (2017)
- [2] "CURVE-ONE courbe ses capteurs afin d'améliorer les clichés," La Recherche, 549 (2019)
- [3] "A wider-eyed watchdog of the clutter surrounding Earth," The New York Times (2016)
- [4] C. Gaschet *et al.*, Appl. Opt. **58**, 973-978 (2019)
- [5] I. Racicot *et al.*, Journal of Neural Engineering, 19 (2022)

2BLightingTechnologies  
www.2blighting.fr

## 2B Lighting Technologies s'offre un nouvel écrin



Afin de fêter les 20 ans de la création de la société, 2B Lighting Technologies, entreprise de distribution de solutions de hautes performances dans le domaine de la Fibre Optique et de la Photonique, s'est engagée dans la construction d'un nouveau bâtiment pour accueillir ses équipes commerciales et techniques. Ce nouveau siège social, d'une superficie de 700m<sup>2</sup>, sera situé sur la commune de Limours (91). Tout comme l'annexe commerciale et technique située à Pessac (33), il sera partagé avec la société dB & Degrees (www.db-degrees.com), entreprise experte en conception, prototypage, modélisation et fabrication toutes séries de solutions pour la Compatibilité Électromagnétique (CEM) et la Gestion Thermique et partenaire de 2B Lighting Technologies. Ce rapprochement permettra de mutualiser certaines ressources nécessaires aux activités des 2 sociétés. La réception de ce nouvel écrin est prévue sur le 2<sup>ème</sup> semestre 2023. ●

### PLUS D'INFORMATIONS :

#### 2B Lighting Technologies

Tony BARTHELEMY  
tbarthelemy@2blighting.com  
[www.2blighting.com](http://www.2blighting.com)

**dB & DEGREES**  
Frédéric MOUTAILLER  
moutailler@db-degrees.com  
[www.db-degrees.com](http://www.db-degrees.com)