

PREMIÈRE MONDIALE DE L'OPTIQUE ADAPTATIVE EN ASTRONOMIE EN 1989

Jean-Claude FONTANELLA¹, Pascal JAGOUREL², Pierre KERN³, Pierre LENA⁴, Gérard ROUSSET⁵

¹ Retraité THALES ; en 1989, Chef de la Division Optique de l'ONERA

² GEPI, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS ; en 1989, Ingénieur de Recherche aux Laboratoires de Marcoussis, CGE

³ Université Grenoble Alpes, CNRS, IPAG ; en 1989, Doctorant CIFRE à l'Observatoire de Paris/Laboratoires de Marcoussis, CGE

⁴ Observatoire de Paris & Université de Paris, membre de l'Académie des Sciences ; en 1989, Professeur, Université Paris-VII

⁵ LESIA, Observatoire de Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, Université de Paris ; en 1989 Ingénieur de recherche à l'ONERA

*jfontanella@outlook.fr

Credit: ESO/F. Kamphues



La première démonstration mondiale du potentiel de l'optique adaptative pour l'astronomie a été effectuée en 1989. Ces travaux ont démontré qu'il était possible de compenser les effets de la turbulence atmosphérique et d'atteindre la limite de diffraction des grands télescopes, au moins dans le proche infrarouge.

Couplée éventuellement à l'utilisation d'étoiles artificielles créées par laser, cette technologie est devenue une composante incontournable de tous les grands télescopes optiques terrestres. Les observations ayant conduit au Prix Nobel de Physique 2020 ont reposé sur les premiers développements de l'imagerie des tavelures, puis rapidement sur ceux de l'optique adaptative et de son application à l'interférométrie multi-télescopes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202111133>

EN CE TEMPS-LÀ...

La turbulence atmosphérique, et les déformations de phase qu'elle induit dans la propagation des ondes lumineuses, sont la cause majeure de la limitation de la résolution angulaire des grands télescopes au sol. Aux longueurs d'onde de la lumière visible, ceux-ci n'ont guère plus de résolution qu'une lunette de 10 cm de diamètre (c'est-à-dire 1", limite appelée *seeing* par les astronomes). Les grands télescopes construits jusqu'aux années 1990 n'avaient pour but que de collecter plus de photons et donc de

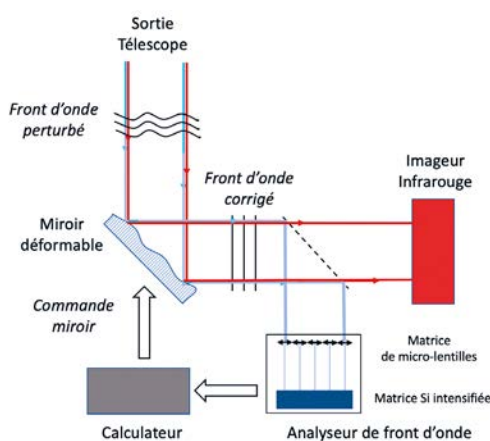


Figure 1. Principe de l'optique adaptative

distinguer des sources plus faibles. L'idée de compenser les effets de la turbulence par une optique adaptative a été proposée par Babcock (1953) [1] et indépendamment par Linnick (1957) [2], mais il a fallu attendre les années 1980 pour que la technologie soit disponible, pour que les effets de la turbulence atmosphérique en astronomie soient mieux compris grâce aux travaux de François Roddier, et pour que l'idée soit enfin prise au sérieux ! On pourra lire, sur les débats agitant la communauté à cette époque, le chapitre 3 « *Trop beau pour être vrai !* » ●●●

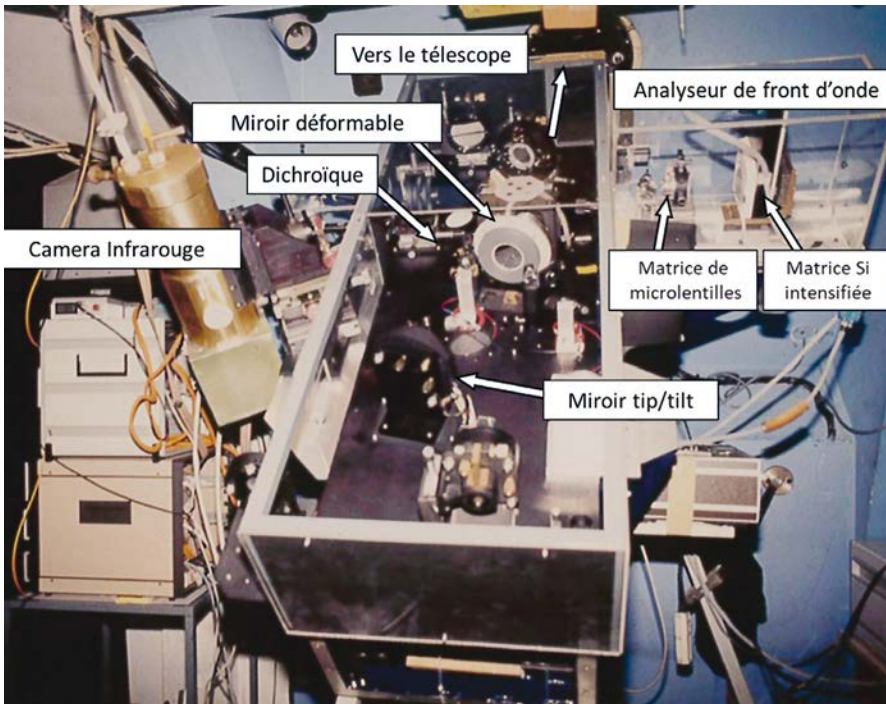


Figure 2. Photographie du dispositif expérimental de l'instrument Come-On, installé au foyer du télescope de 1,52 m de l'Observatoire de Haute-Provence

de la référence [3]. Les développements classifiés liés à l'arme laser ont permis de disposer de miroirs déformables ; les analyseurs de front d'onde ont pu bénéficier des premières matrices de photodétecteurs et la commande du miroir déformable a été rendue possible par les progrès des calculateurs. Le domaine proche infrarouge s'est imposé pour la correction des images, car l'effet de la turbulence y est moins sensible (l'effet est approximativement inversement proportionnel à la longueur d'onde) et donc l'atteinte de la limite de diffraction plus aisée. Dans le contexte de la préparation du Very Large Telescope européen (VLT), une équipe composée de chercheurs de l'ONERA, des Laboratoires de Marcoussis de la CGE (aujourd'hui CILAS), de l'Observatoire de Paris et de l'European Southern Observatory (ESO) a construit un prototype d'optique adaptative (appelé COME-ON, Cge Observatoire de MEudon ONera). L'instrument a d'abord été mis en œuvre au foyer Coudé fixe du télescope de 1,52m de l'Observatoire de Haute Provence avant son installation au télescope de 3,6m de l'ESO au Chili. Cette démonstration

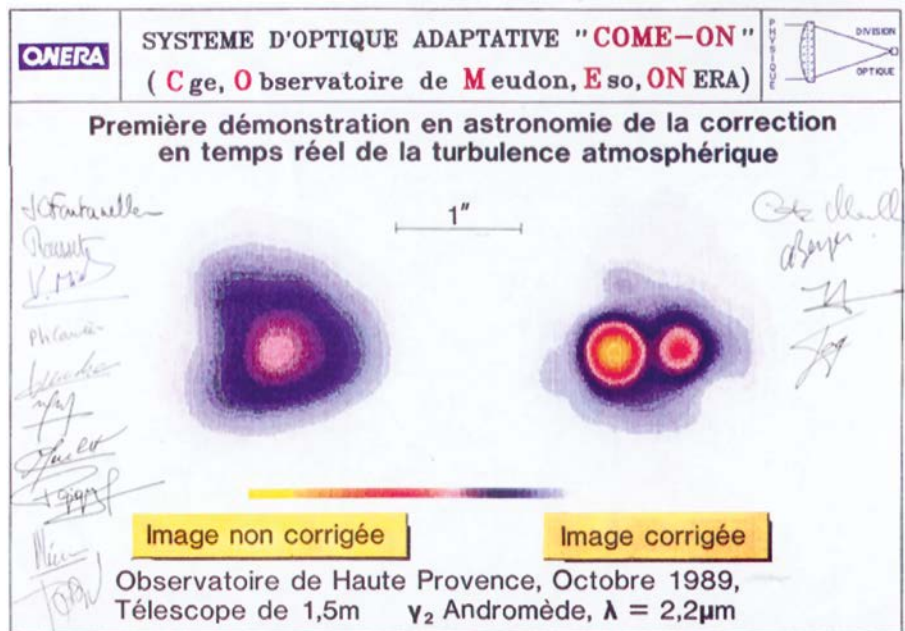
Figure 3. Démonstration du potentiel de l'optique adaptative sur l'étoile double γ_2 Andromedae, observée à $2,2\mu\text{m}$ [4]

d'obtention de la limite de diffraction se révélait indispensable pour que les futurs télescopes de 8 m du VLT puissent être efficacement couplés en mode interférométrique, selon la méthode proposée par Albert Fizeau (1868), mise en œuvre par Albert Michelson (1891-1920), puis renouvelée dès 1975 par Antoine Labeyrie.

L'INSTRUMENT COME-ON

L'instrument [4] était composé de cinq sous-ensembles majeurs (figures 1 et 2) :

- Un analyseur de surface d'onde développé par l'ONERA en collaboration avec l'ESO, fonctionnant à $\lambda = 0,6\mu\text{m}$, utilisant le principe de Shack-Hartmann et constitué d'une matrice de 5×5 microlentilles focalisant les images des sous-pupilles sur un intensificateur d'images à deux étages de Proxitronic et Philips, suivi d'une matrice de 100×100 photodiodes Reticon ;
- Un miroir à deux axes compensant le basculement de l'onde, construit par l'Observatoire de Paris ;
- Un miroir déformable fabriqué par les Laboratoires de Marcoussis avec 19 actionneurs piézoélectriques de course $\pm 7,5 \mu\text{m}$ et de diamètre utile 65 mm ;



- Un ordinateur à deux étages, réalisés par l'ONERA et les Laboratoires de Marcoussis, pilotant la boucle d'asservissement à 100Hz ;
- Une caméra infrarouge fournie par l'Observatoire de Paris, utilisant une matrice InSb 32x32, produite par la SAT (Société Anonyme de Télécommunications), permettant des temps de pose minimaux de 16ms, à la sensibilité limitée par son bruit de lecture pour les longueurs d'onde inférieures à 2,2 µm.

L'instrument ainsi constitué avait une bande passante effective de 9 Hz à 0 dB, satisfaisante pour les conditions de turbulence attendues.

OBSERVATIONS

L'instrument a été testé au foyer Coudé du télescope de 1,5m de l'Observatoire de Haute-Provence et les premières observations ont été effectuées durant les nuits du 12 au 23 octobre 1989 [4]. Le nombre de miroirs relais et la sensibilité de l'analyseur de surface d'onde limitaient le fonctionnement de la boucle d'asservissement à des étoiles de magnitude visible plus brillantes que 5. L'analyseur de surface d'onde a permis d'évaluer les conditions de turbulence (« seeing ») qui ont évolué de mauvaises (2,4 ") à bonnes (<1"). L'observation emblématique de cette expérimentation est présentée sur la figure 3. Elle a été effectuée le 22 octobre 1989. Il s'agit de l'étoile γ₂ Andromedae observée à 2,2 µm (fenêtre photométrique K), cette étoile est double avec deux composantes de magnitude 5,3 et 6,1; l'optique adaptative a permis de séparer clairement ces deux composantes (séparation estimée à 0,50"±0,06"). Les conditions de turbulence étaient relativement bonnes, environ 1".

L'analyseur de surface d'onde fonctionnait en utilisant γ₁ Andromedae, étoile très brillante de magnitude 2,3, séparée de 9,6" de γ₂ Andromedae et donc située dans son domaine isoplanétique, estimé à 20" dans ces conditions. La limite de diffraction a été atteinte, démontrant que l'on

pouvait compenser les effets de la turbulence. Le gain de l'optique adaptative en résolution et sensibilité est illustré sur la figure 4 montrant des profils d'image d'une étoile ; on peut noter la présence d'anneaux d'Airy.

L'instrument COME-ON a ensuite été installé début 1990 sur le télescope de 3,6 m de l'ESO (La Silla, Chili) et a produit dans ses versions progressivement améliorées un nombre impressionnant de résultats durant toute la décennie [5]. Cette expérience a également été la démonstration d'une approche système, assez empirique certes, combinant efficacement des briques technologiques existantes.

VERS LE PRIX NOBEL DE PHYSIQUE 2020

Ce prix concerne les trous noirs. Il a été attribué d'une part au théoricien britannique Roger Penrose pour *Theoretical Foundations for Black Holes...*, d'autre part conjointement à Andrea Ghez (UCLA) et Reinhard Genzel (Garching), for *The super-massive compact object at the galactic centre* [6]. Leurs deux équipes ont débuté, lors des années 1990, en affinant leurs images de la région du centre (SgrA*) de notre Galaxie, observable dans le proche infrarouge, grâce à des techniques inspirées de l'interférométrie des tavelures ●●●

LES PROGRÈS IMPRESSIONNANTS DE L'OPTIQUE ADAPTATIVE (OA)

De 19 (Come-On, 1989) à 5352 actionneurs (M4 de l'ELT, 2027). Tableau de comparaison de Come-On avec les futures OA de l'ELT en construction : à souligner l'évolution majeure des technologies avec le miroir « secondaire adaptatif » intégré dans le télescope, l'analyse de front d'onde à pyramide (plus sensible que le Shack-Hartmann mais au prix d'une forte non linéarité), les systèmes d'OA à plus grand champ de correction et les étoiles lasers pour assurer la couverture du ciel.

PARAMÈTRES	COME-ON (1989)	ELT (2027 ET APRÈS)
Télescope	1,52 m OHP puis 3,6 m ESO	39 m ESO
Miroir déformable	19 actionneurs de maillage hexagonal, diamètre 65 mm,	Miroir M4 du télescope, elliptique 2,4x2,5 m en 6 pétales, 5352 actionneurs (+ miroirs déformables complémentaires dans les instruments)
Miroir de pointage	Miroir 2 axes, diamètre 65 mm	Miroir M5 du télescope, elliptique 2,7x2,2 m, 2 axes
Analyseur de front d'onde	Shack-Hartmann, 5x5 sous pupilles, matrice Si intensifiée	Pyramide / Shack-Hartmann 90x90 sous pupilles, EM-CCD, CMOS & NIR e-APD array
Fréquence boucle et bande passante	100 Hz, 9 Hz à 0 dB	0,5-1 kHz, 50-100 Hz à 0 dB
Lois de commande	Linéaire, intégrateur	Non linéaire, intégrateur & prédicteur / Kalman
Calculateur	En partie câblé et Motorola 68020	FPGA, Multi-core Xeon Phi et GPU
Etoile guide	Etoile naturelle	Multi étoiles lasers + multi étoiles naturelles
Champ	Isoplanétique sur 10-20"	OA multi-conjuguée sur 1', OA multi-objet sur 5'

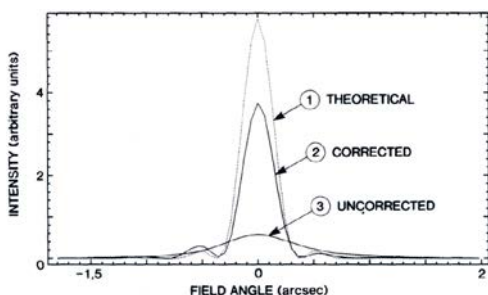


Figure 4. Gain en résolution et en sensibilité de l'optique adaptative du système Come-On [4]. L'intensité de l'image non corrigée est une moyenne temporelle, faisant disparaître les tavelures présentes dans une image courte pose.

proposée par Labeyrie en 1970. L'étude du mouvement des étoiles présentes dans les quelques secondes d'arc autour de SgrA* plaide fortement pour la présence d'un trou noir supermassif. L'optique adaptative, devenant disponible sur le télescope Keck pour l'une, sur le VLT pour l'autre équipe, fit progresser de près d'un facteur 10 la résolution obtenue jusqu'alors. Les mesures confortèrent l'hypothèse et affinèrent lors d'un passage d'une étoile (S2) en 2002 au péricentre de son orbite, à 17 heures-lumière du trou noir, la détermination de la masse de l'objet, soit $4,26 \pm 0,14 \cdot 10^6 M_{\text{Soleil}}$.

L'étape suivante, réalisée en Europe seulement, était extrêmement ambitieuse et n'aurait pu aboutir sans des optiques adaptatives performantes. Le couplage interférométrique, donc cohérent, des quatre télescopes de 8,2 m, chacun corrigé par optique adaptative, permettait d'atteindre une résolution angulaire donnée par la dimension de la base interférométrique maximale (130 m) (soit un gain de $130/8,2 \sim 16$). Un instrument dédié *Gravity*, refroidi et ultra-stable, utilisant une optique fibrée et intégrée, fut conçu en 2006. *Gravity* reçoit les faisceaux issus des quatre télescopes, en raffine la correction adaptative, les recombine par paires et mesure les figures d'interférence, obtenant la

résolution de 2 millisecondes d'arc. En outre, il est capable de mesures astrométriques différentielles, avec une précision cent fois meilleure. *Gravity* a observé le second passage de l'étoile S2 au péricentre en 2018, et a pu mettre en évidence plusieurs effets, jamais encore observés, de relativité générale en champ très intense, comme la précession relativiste de cette orbite, et la trajectoire d'un nuage de gaz frôlant l'horizon du trou noir.

Le comité Nobel a ainsi couronné des découvertes qui reposent sur la maîtrise de techniques optiques, acquises lors de ce dernier demi-siècle et dans lesquelles l'optique française fut remarquablement créative.

CONCLUSION

Même si les conditions expérimentales étaient relativement favorables (étoile de référence très brillante...) au regard des performances de l'optique adaptative d'aujourd'hui, cette première expérience a eu un grand retentissement. Elle a convaincu la communauté astronomique mondiale du potentiel de l'optique adaptative, qui a été pleinement intégrée au projet du VLT pour aboutir avec les instruments NACO (2001) puis SPHERE (2014). Elle sera également opérationnelle en 2000 sur les deux télescopes Keck du California

Institute of Technology à Hawaii. Depuis, il n'est pas au monde de projet de grand télescope optique qui n'en soit désormais équipé, tel le Extremely Large Telescope (ELT) de l'ESO, qui sera mis en service au Chili en 2027 (voir annexe 1).

Cette réussite initiale a bénéficié de plusieurs facteurs favorables, maturité technologique des matrices de détecteurs, progrès de l'informatique temps réel, accès à certains travaux militaires, mais surtout de l'entente remarquable et de la synergie des quatre équipes concernées.

En outre, dès les années 1990 et en filiation directe, des applications médicales de l'optique adaptative sont explorées avec succès, notamment à l'Observatoire de Paris avec l'Hôpital des Quinze-Vingts [7], puis par la société Imagine-Eyes [8]. ●

REMERCIEMENTS

De nombreux collègues ont contribué à COME-ON. Citons ici Pierre Gigan, François Rigaut, Corinne Boyer, Jean-Paul Gaffard, Fritz Merkle. À une époque où l'on doutait de la faisabilité de l'optique adaptative, la bienveillance de la DGA et les soutiens des Directions de l'ONERA (André Girard), des Laboratoires de Marcoussis - CGE (Michel Gaillard) et de l'ESO (Lodewijk Woltjer) ont été décisifs.

RÉFÉRENCES

- [1] H.W. Babcock, "The possibility of compensating astronomical seeing," *Publ. Astron. Soc. Pac.* **65**,229 (1953)
- [2] V.P. Linnick, *Opt. Spectrosc.* **3**, 401-402 (1957)
- [3] P. Léna, *Une histoire de flou, Miroirs, trous noirs et autres mondes*, Le Pommier éd. (2019). Traduit en anglais, *Astronomy's Quest for Sharp Images*, Springer (2020)
- [4] G. Rousset, J.C. Fontanella, P. Kern *et al.*, *Astron. Astrophys.* **230**, L29-L32 (1990)
- [5] P. Léna, O. Lai, *Astronomical results*, in *Adaptive Optics in Astronomy* (Roddier F., Ed.), Cambridge University Press (1999)
- [6] The Nobel Committee for Physics. Theoretical foundations for black holes and the supermassive compact object at the galactic center. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/advanced-information/> (2020)
- [7] M. Glanc, E. Gendron et P. Léna, *C. R. Acad. Sci.* **2**, 1131-1138 (2001)
- [8] <https://www.imagine-eyes.com/>