

> premier identifié comme tel. D'une masse proche de dix masses solaires, il est situé à 5 000 années-lumière du Soleil. Son diamètre angulaire est donc de... 3×10^{-15} radians, soit, pour parler en des unités plus pratiquées dans la communauté astronomique, 0,6 nanoseconde d'angle (rappelons qu'on subdivise un degré en 60 minutes d'angle, elles-mêmes subdivisées en 60 secondes d'angle). Précisons que l'œil humain à une résolution qui au mieux approche 1 minute d'angle, soit 100 milliards de fois trop. Aussi, quelle que soit l'analogie que l'on puisse considérer, un tel diamètre angulaire est ridiculement petit. Il correspond à un unique proton à 25 cm de distance, ou à une molécule d'eau à 30 kilomètres. Inaccessible!

Faute de voir des petits trous noirs, tournons-nous vers les gros, les trous noirs supermassifs. Ils sont beaucoup plus rares, puisqu'on n'en compte qu'un seul par galaxie au sein de laquelle il se trouve invariablement au centre. Mais même de ce côté, le choix reste limité. Il y a certes Sgr A* au cœur de notre propre Galaxie. Sa masse est connue précisément, car on peut suivre mois après mois la trajectoire des étoiles qui orbitent autour. L'une d'elles notamment, baptisée S-2, boucle une révolution autour de lui en une quinzaine d'années. Elle fait l'objet d'un suivi depuis les années 1990, et les astronomes ont pu scruter précisément son orbite, qui permet, *via* des lois établies il y a quatre siècles par Johannes Kepler, de déterminer la masse de ce trou noir à 4,1 millions de masses solaires, un chiffre hélas assez modeste pour un trou noir supermassif.

Placé à environ 26 000 années-lumière, ce trou noir occupe une taille bien plus grande que Cygnus X-1, quoiqu'encore très petite: environ 50 microsecondes d'angle, soit la taille apparente d'un objet de 10 centimètres qui se trouverait... sur la Lune. Autrement dit, vous pourriez peut-être voir la silhouette de Sgr A* si vous pouviez discerner les traces de pas de Neil Armstrong depuis la Terre.

Pour se rendre compte de la difficulté de l'entreprise, il est nécessaire de faire un détour par les lois de l'optique. Quand une onde lumineuse traverse une ouverture, l'effet est le même que pour la houle contournant la jetée d'un port: l'onde se déforme. Ce phénomène de diffraction est inévitable, même pour un télescope de très grande taille.

Vous pouvez faire l'expérience de ces déformations chez vous si vous avez des rideaux en tissu fin à vos fenêtres. Une source de lumière quasi ponctuelle située à l'extérieur de la pièce produit un motif en croix à la traversée du voilage, une réminiscence du tissage carré ou rectangulaire. De telles croix apparaissent également dans les clichés

astronomiques (voir la figure page ci-contre): dans un télescope, le miroir secondaire est en général maintenu au-dessus du miroir primaire par quatre supports métalliques qui déforment le front d'onde et favorisent la formation de ces croix caractéristiques sur les images dès que l'objet est brillant.

UN MIROIR DE DEUX KILOMÈTRES DE DIAMÈTRE

Un instrument optique a donc inévitablement une résolution finie. Plus précisément, elle est déterminée par le rapport de la longueur d'onde d'observation au diamètre du télescope. C'est là que le bât blesse. Ce rapport doit être plus petit que la taille angulaire de l'objet dans le ciel. Pour observer Sgr A* dans le domaine visible, la finesse de détail nécessaire serait seulement atteignable par un miroir unique de 2 kilomètres de diamètre. Et plus grand encore, car le centre galactique est opaque à la lumière visible. L'infrarouge proche serait pertinent, mais avec des longueurs d'onde au minimum deux ou trois fois plus grandes que celles de la lumière visible, un miroir devrait être deux à trois fois plus étendu...

Pour contourner cet écueil tout autant technique que financier, les astronomes peuvent compter sur une méthode envisagée dès le début du xx^e siècle par les physiciens américains Albert Michelson et Edward Morley: l'interférométrie. L'idée est de remplacer un unique appareil de (très) grand dia-

**Voir le trou noir
Sgr A* équivaut
à discerner les
traces de pas de Neil
Armstrong sur
la Lune... depuis
la Terre**

mètre par une collection d'instruments plus petits, puis de combiner leur lumière d'une façon astucieuse, afin de créer virtuellement un instrument bien plus grand, dont la taille sera de l'ordre de celle de la zone sur laquelle est réparti le réseau de télescopes.

Sur ce cliché des Pléiades, le phénomène de diffraction (les croix lumineuses) est important. D'autant plus important que l'objet est brillant, il est dû aux limitations inhérentes à tout télescope. On doit en tenir compte pour photographier un trou noir.



Cependant, pour fonctionner, les télescopes doivent être combinés comme s'ils étaient des éléments d'un même miroir, c'est-à-dire comme s'ils recevaient en même temps le même front d'onde. Ce n'est pas le cas pour des instruments dispersés à la surface de la Terre. Pour exploiter leur synergie, il est nécessaire d'introduire des mécanismes de retard afin de parfaitement synchroniser les signaux reçus.

Dans le domaine optique, la solution est particulièrement complexe. Les signaux de chaque télescope sont envoyés sur un dispositif (un banc optique) contenant au moins un miroir mobile qui à chaque instant doit se positionner en un endroit donné, avec une précision comparable à celle de la longueur d'onde, soit ici moins de 1 micromètre...

UN TÉLESCOPE DE LA TAILLE DE LA TERRE

En pratique, cette technique n'est utilisable qu'avec des télescopes séparés au plus d'une ou deux centaines de mètres, soit la distance qui sépare les télescopes du VLT européen au Chili. Au-delà, la technique ne fonctionne plus, rendant l'interférométrie optique inopérante pour ce genre d'observation. C'est encore plus le cas dans le domaine infrarouge, puisque avec des longueurs d'onde plus grandes, la séparation des télescopes

devrait être augmentée en proportion elle aussi afin de conserver la même résolution. C'est un peu inextricable.

Heureusement, les limitations de l'interférométrie peuvent être surmontées en observant à de bien plus grandes longueurs d'onde, pour lesquelles la combinaison des signaux reçus par les différents instruments est plus simple. Mais l'augmentation de la longueur d'onde doit s'accompagner de celle, en proportion, de la distance séparant les instruments. Le projet de l'EHT est né de cette idée, avec l'objectif de photographier Sgr A* avec le plus grand instrument astronomique jamais construit, puisque les instruments utilisés seraient éparpillés... sur toute la surface de la Terre, soit près de 10000 kilomètres (voir la figure page suivante).

Sur de telles distances, la longueur d'onde d'observation peut être 5000 fois plus grande que dans le domaine optique, c'est-à-dire 3 millimètres, soit dans le domaine des ondes radio. Le concept de l'EHT est d'utiliser des radiotélescopes déjà existants, et les faire travailler de concert à une longueur d'onde encore plus petite (1,3 millimètre), indispensable pour distinguer des détails du pourtour de la silhouette du trou noir.

Mais le défi restait considérable : avec des instruments situés sur différents continents, >

> pas question de faire interférer en direct les signaux reçus. L'idée consista à enregistrer le signal reçu par chaque instrument, et de les combiner numériquement une fois tous les supports physiques des enregistrements récupérés sur chaque site.

Dès lors, le défi ne relevait plus tant de l'optique que des performances du matériel informatique. À la longueur d'onde d'observation de 1,3 millimètre correspond une fréquence de 230 GHz, et c'est à un débit comparable que le signal doit être enregistré. Il y a une vingtaine d'années, quand les radioastronomes ont sérieusement envisagé un tel défi, les vitesses d'écriture des matériels informatiques alors disponibles étaient environ cent fois trop faibles, rendant l'observation impossible, mais on était en droit d'espérer que la technologie rendrait la chose possible dans dix, quinze, vingt ou trente ans, ce qui fut effectivement le cas.

Mais pour quel résultat envisageable? Avec seulement quelques instruments, l'imagerie est impossible. Disons pour simplifier que les observations interférométriques ne permettent d'acquérir qu'un certain nombre d'éléments d'information sur l'image, un nombre croissant avec le nombre de paires de télescopes du réseau: un s'il y a deux télescopes, trois avec trois télescopes (on peut faire trois paires avec trois éléments pris deux à deux), six avec quatre et ainsi de suite. Pour des étoiles dont on connaît la forme (sphérique, éventuellement aplatie par leur rotation), on peut déterminer le diamètre et éventuellement l'aplatissement, mais guère plus.

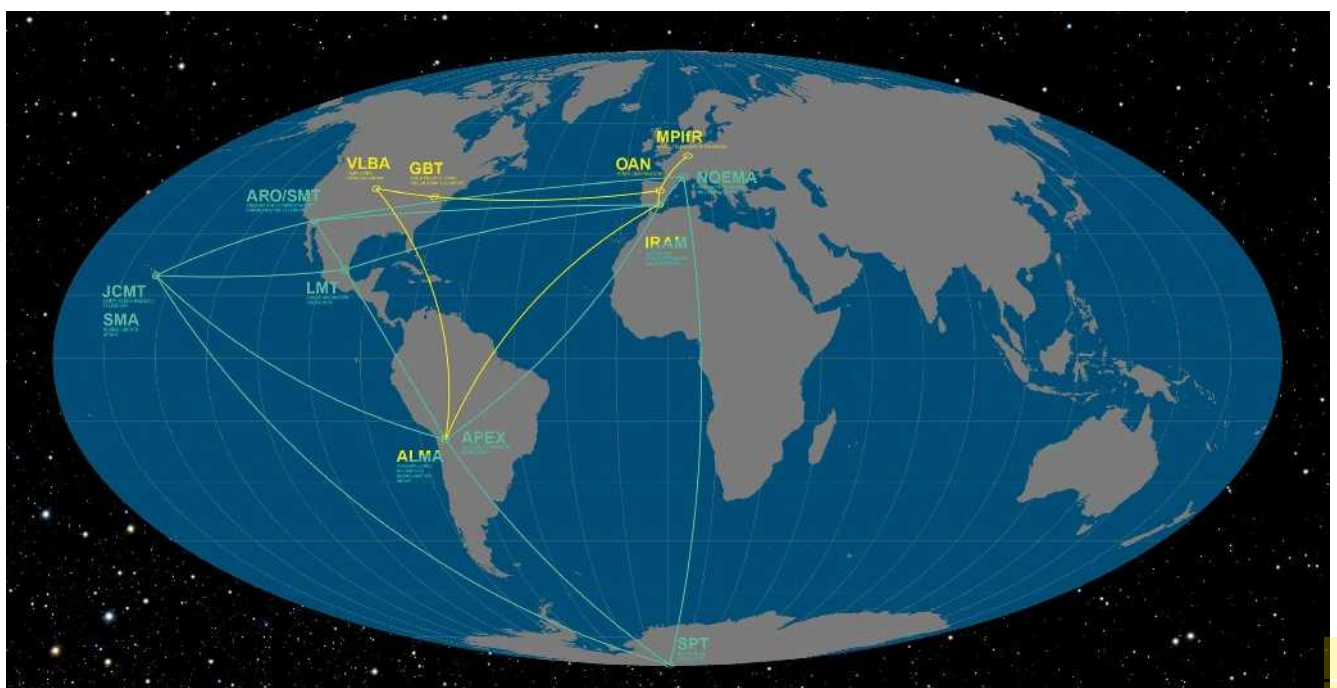
Les télescopes des projets d'interférométrie *Global mm-VLBI Array* (en jaune) et *Event Horizon Telescope* (en bleu) sont répartis sur toute la planète.

Des informations supplémentaires peuvent aussi être obtenues en utilisant la rotation de la Terre: du fait que les instruments, fixes, pointent vers une source dont la position dans le ciel varie revient à imaginer que ce sont des télescopes dont la position varie vus depuis la source. À un instant donné, le nombre d'éléments d'information recueillis est le même, mais ils diffèrent d'un instant à l'autre, permettant de faire de l'imagerie.

LE PÔLE SUD EN RENFORT

Pour autant, l'image que l'on peut espérer fabriquer par cette technique restera bruitée, et ce d'autant plus que le nombre d'instruments utilisés est faible. C'est pourquoi les réseaux interférométriques ont toujours besoin du plus grand nombre d'instruments possibles: 27 pour le *Very Large Array* américain, et 66 pour le réseau *Alma*, au Chili. L'EHT est à un niveau plus modeste, utilisant moins d'une dizaine de sites: en Europe, l'antenne de l'Institut de radioastronomie millimétrique au Pico Veleta, dans le sud de l'Espagne, en Amérique du Sud, notamment le grand observatoire radio *Alma*, au Mexique le *Large Millimeter Telescope*, et plusieurs antennes étatsuniennes, sans oublier le *James Clerk Maxwell Telescope* sur les îles Hawaii.

Il manquait à ce réseau une meilleure couverture dans l'hémisphère Sud, c'est pourquoi fut décidé d'y adjoindre celle du *South Pole Telescope*, situé au pôle Sud. Lors de la campagne d'observations de 2017, huit sites furent impliqués, avec une difficulté organisationnelle (il fallait pouvoir bénéficier des mêmes nuits



d'observation sur chaque site, fortement sollicités par ailleurs), et, surtout, météorologique puisque étaient indispensables des conditions clémentes en la matière simultanément sur chaque site. Certes chaque installation astronomique avait été choisie entre autres pour sa situation avantageuse, mais bénéficier d'une fenêtre météo favorable partout en même temps résulte d'une coïncidence plutôt heureuse... qui du reste ne fut pas complètement répétée lors de la campagne d'observation de l'année suivante.

Au final, les chiffres relatifs à la prise de données donnent un peu le vertige : chaque nuit, pendant plusieurs heures, chaque site enregistra des données à raison de plusieurs gigaoctets par seconde, chaque bit enregistré devant, pour pouvoir être traité ultérieurement, être accompagné de l'heure précise d'enregistrement calée sur des horloges atomiques. En tout, 4 pétaoctets de données (soit 4 millions de gigaoctets) furent précieusement sauvegardées, puis rapatriées au même endroit. La campagne d'observation de 2017 s'intéressa à deux cibles : Sgr A*, dans notre Galaxie et le trou noir géant de la galaxie M87, une des plus grosses galaxies de l'univers local. Situé à 50 millions d'années-lumière du Soleil, soit 2000 fois plus loin que Sgr A*, il est aussi 1 500 fois plus massif, donc 1 500 fois plus gros.

De ces deux trous noirs, seul celui de M87 donna des résultats exploitables, car ceux de Sgr A* étaient brouillés par la variabilité de l'aspect du disque, fruit de celle du flux de matière sur le trou noir. Ces écarts dépendent de la masse du trou noir. Étant 1 500 fois moins massif, Sgr A* est une source qui peut varier sur des échelles de temps de quelques minutes, contre plusieurs jours au pire pour le trou noir de M87 (désormais baptisé M87*).

UN AN DE TRAITEMENT

Au bout de près d'un an de traitement, les données rendirent leur verdict : la silhouette du trou noir se découpe effectivement sur le fond lumineux du disque d'accrétion, légèrement plus brillant d'un côté que de l'autre, comme on s'y attendait, puisque la lumière émise par la partie du disque qui s'approche de nous sera plus intense que celle du côté opposé. En fait, la mesure de ce contraste renseigne sur l'inclinaison sous laquelle est vu ce disque, à savoir une vingtaine de degrés.

Alors bien sûr, puisqu'on se trouve à la limite de résolution des instruments, l'image peut paraître un peu floue pour qui a en tête les images du télescope spatial *Hubble*, mais c'est aussi ce qui fait sa beauté. Elle est belle non pas malgré le fait qu'elle soit floue, mais précisément parce qu'elle est floue, signe des efforts extraordinaires qui ont été consentis pour atteindre un objectif jugé inaccessible il y a seulement quelques décennies.

L'exploit désormais accompli, que peut-on espérer de plus dans le futur ? Tout d'abord étoffer le réseau d'observation, en ajoutant d'autres antennes comme celles du plateau de Bure, en France, et une autre au Groenland,

Les futures campagnes d'observation de M87* devraient permettre de passer de la première image... au premier film

afin d'obtenir une image moins bruitée. Des observations à des longueurs d'onde encore plus basse, en l'occurrence 0,8 millimètre, sont aussi possibles, mais sans garantie de succès, car l'atmosphère terrestre est de moins en moins transparente à mesure que l'on s'enfonce dans le domaine submillimétrique.

DE L'IMAGE AU FILM

Une autre piste concerne la dimension temporelle. Pour l'heure, la physique des disques d'accrétion n'est qu'imparfaitement connue, et si la variabilité du disque est un fait établi, nous l'avons vu, on ne sait pas encore à quelle échelle de temps elle se produit. Les campagnes d'observation futures de M87* devraient permettre d'en savoir plus et de passer de la première image... au premier film.

Enfin, sur le très long terme, on peut imaginer agrandir encore la taille du réseau, en envoyant des radiotélescopes en orbite. C'est dans ce contexte que s'ébauche l'*Event Horizon Imager*, version spatiale de l'EHT. Avec seulement trois radiotélescopes orbitant autour de la Terre à des distances différentes, les instruments bougeront naturellement les uns par rapport aux autres par le jeu de la mécanique céleste. Et l'on espère une résolution de quelques microsecondes d'arc à peine, un chiffre qui fait rêver... à condition de résoudre un nombre considérable de nouveaux problèmes, à commencer par le volume de données à rapatrier depuis l'espace. Impossible ? L'histoire des trous noirs a déjà montré que l'impossible d'un jour ne le reste pas toujours. ■

BIBLIOGRAPHIE

THE EHT COLLABORATION ET AL., First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, *ApJL*, vol. 875, p. 1. 2019.

A. BRODERICK ET A. LOEB, Portrait d'un trou noir, *Pour la Science*, n° 389, mars 2010.