

➤ La révolution des missiles hypersoniques

Dans la course aux missiles hypersoniques, Russes et Chinois semblent avoir pris une sérieuse longueur d'avance sur leurs concurrents ce qui ne laisse pas d'inquiéter les états-majors des pays occidentaux dans un contexte géopolitique inquiétant. La réaction s'organise dans le camp des États-Unis et de leurs alliés mais bien tardivement.

En 2018, Vladimir Poutine annonçait devant la Douma que la Russie se réengageait dans la course aux armements et il révélait qu'entre autres systèmes, la Russie développait des missiles hypersoniques. Rappelons que les vitesses comprises entre Mach 1 et Mach 5 sont supersoniques, tandis que celles qui dépassent Mach 5 sont hypersoniques. Les missiles hypersoniques sont donc capables de franchir de longues distances à travers l'atmosphère à plus de Mach 5, en d'autres termes à plus de cinq fois la vitesse du son. Ces armes sont devenues une préoccupation des états-majors occidentaux car à ces vitesses les armements ne laissent à leurs adversaires au mieux que quelques dizaines de secondes pour réagir. Une course technologique est donc engagée et on en oublie presque qu'elle a commencé bien avant la deuxième guerre mondiale.

Développement des missiles

Depuis près d'un siècle, les armées cherchent à mettre au point des engins hypersoniques, mais elles se sont heurtées à des difficultés techniques qui ont limité jusqu'à présent leurs succès opérationnels. À la fin des années 1930, l'ingénieur autrichien Eugen Sänger et la physicienne allemande Irene Bredt ont conçu le premier avion hypersonique, lancé d'une fusée. Il était conçu pour voler surtout dans l'atmosphère où il devait se maintenir grâce à la portance à la manière d'un planeur. Toutefois, les planificateurs nazis décidèrent que la mise au point du *Silbervogel* serait trop difficile et coûteuse ; mais ces recherches vont inspirer le programme Agregat qui donnera naissance aux programmes des engins V1 et V2. En effet dans le cadre de ces expérimentations pendant la Seconde Guerre mondiale, les ingénieurs allemands mirent au point les moteurs-fusées brûlant du propergol, mélange de comburant oxydant et de combustible, capable de produire une combustion et une poussée importante. Les V1 et V2 pouvaient atteindre une vitesse de 5720 km/h.

Au cours des décennies suivantes, des avions expérimentaux propulsés par ces moteurs ont battu records de vitesse sur records de vitesse. En octobre 1947, le X-1, propulsé par un mo-

teur-fusée, devint le premier avion piloté à franchir le mur du son à Mach 1. Dans les années 1960, le X-15 atteignit Mach 6,7 lors de tests à plus de 30 km d'altitude. Par la suite, grâce aux technologies de propulsion des fusées, les États-Unis et l'Union soviétique ont pu construire des arsenaux de missiles balistiques à charges nucléaires, capables de se déplacer à plus de Mach 20 d'un continent à l'autre. Cependant les fortes accélérations produites par les moteurs-fusées, extrêmement contraignantes pour la physiologie humaine, ont fait que les avions pilotés utilisant ces moteurs sont restés expérimentaux.

C'est le moteur à réaction, une autre technologie développée après la guerre qui est à la base de l'aviation militaire et civile. Puisant dans l'oxygène atmosphérique pour brûler continuellement du carburant, un moteur à réaction n'emporte pas du comburant oxydant. En ne produisant pas les accélérations extrêmes des moteurs-fusées, il rend possible les manœuvres en vol et le transport sur de longues distances. Les moteurs à réaction propulsent aussi des missiles de croisière, engins sans pilote manœuvrables, dont les plus rapides atteignent des vitesses supersoniques.

En parallèle avec le X-15, Boeing obtint un contrat en 1957 pour expérimenter un autre prototype piloté, le X-20, qui mis en orbite par une fusée Titan et doté de capacité de manœuvre, planait à une vitesse hypersonique avant d'atterrir. En 1963, après avoir dépensé plus de 5 milliards de dollars (dollars actuels) pour développer le X-20, les États-Unis abandonnèrent le projet. Ronald Reagan dans les années 80 lancera un projet, le X-30 bombardier nucléaire en orbite capable de descendre sur sa cible à Mach 25 mais ce projet sera également annulé. Après les attaques d'Al-Qaïda du 11 septembre 2001, le président George W. Bush ordonna le développement de missiles hypersoniques emportant des ogives conventionnelles et capables de frapper très vite les camps terroristes sur tous les continents.

Les missiles de croisière hypersoniques

Les États-Unis et d'autres pays travaillaient en même temps à la mise au point de moteurs afin d'obtenir des missiles de croisière hypersoniques. D'une manière générale, les missiles de croisière sont des missiles propulsés pendant toute la durée de leur trajectoire. Ils sont hypersoniques lorsque leur vitesse maximale dépasse 1,5 km/s. Le moyen d'arriver à ces performances est actuellement de disposer d'un type de propulsion par superstatoréacteur. Les vitesses recherchées s'échelonnent entre 1,5 et 2,6 km/s, soit Mach 5 à Mach 8. Elles sont atteignables à des altitudes comprises entre 20 et 35 km, ce qui permet à l'engin de manœuvrer sur l'ensemble de la trajectoire. Les engins hypersoniques sont en effet confrontés à une contrainte dimensionnante qui est la traînée, c'est-à-dire la résistance qu'oppose tout fluide au



Figure 1 : Missile Kinjal emporté par un MiG-31.

déplacement d'un objet. La résistance du fluide sur un objet augmente proportionnellement au carré de la vitesse de ce dernier, elle devient donc problématique à des vitesses hypersoniques. Ces difficultés expliquent que les missiles propulsés par superstatoréacteurs sont encore largement en phase de développement. A ce jour, l'engin le plus proche du déploiement opérationnel est le missile Zyrkon, développé par la Russie.

Les statoréacteurs

Le principe du statoréacteur remonte au début de l'aéronautique. Ce sont en effet les premiers moteurs à réaction. Leur inventeur est un Français, René Lorin, qui en définit le principe dès 1907. La forme de l'entrée du réacteur comprime l'air déjà en mouvement dans lequel on vaporise un carburant pour l'enflammer. En se détendant dans la tuyère, le mélange augmente la pression et l'énergie thermique est alors transformée en énergie cinétique. Il existe toutefois une contrainte, l'air doit pénétrer à une vitesse d'au moins Mach 0,5 et y être maintenu à cette valeur pour assurer une combustion stable, chose qui n'était pas possible à l'époque. L'invention est alors oubliée puis redécouverte en 1936 par René Leduc qui obtient des contrats d'études mais il faut attendre l'après-guerre en 1949 pour assister au premier vol du Leduc 01 qui étonne le public par ses formes futuristes et son cockpit qui s'insère dans le prolongement du moteur. Mais les développements sont difficiles au-delà de Mach 5, le mélange air carburant n'a pas le temps de brûler et il faudra recourir aux superstatoréacteurs, alimentés par des carburants à combustion extrêmement rapides comme l'hydrogène. On devra disposer aussi de composants résistant aux températures et aux contraintes extrêmes qui règnent dans la chambre de combustion.

Les missiles russes

Les premières études de conception du Kinjal auraient débuté vers la fin des années 1990 avec le vol du premier aéronef doté d'un statoréacteur, le Holod qui avait atteint Mach 5,8. Les

Russes allaient ensuite faire évoluer cette plate-forme au début des années 2000, avec une phase de développement dans les années 2010. Le centre d'essai de Joukovski hébergeait l'institut de dynamique des fluides qui possédait un tunnel d'essai spécialisé dans les contraintes de vols hypersoniques. Ceux-ci commencèrent le développement de systèmes de propulsion hypersoniques avec le missile Iskander dont le maître d'œuvre industriel était la société russe KBM située à Kolomna. Déployé en 2006, ce missile avait un profil de trajectoire et une vitesse qui le rendait difficile à détecter par les radars. Il était destiné à percer le bouclier antimissile de l'Otan et fut déployé dans l'enclave russe de Kaliningrad. Le même maître d'œuvre de l'Iskander, fort de son expérience, développait dans les années 2010 le KH-47 Kinjal en association avec la société RSC MiG pour le porteur. Le missile était monté sur le MiG-31K (figure 1) et pouvait être adapté au bombardier Tu-22M3 ainsi qu'au bombardier stratégique Tu-160. Les essais en vol sur MiG-31K auraient commencé en décembre 2017. L'existence du Kinjal a été révélée officiellement par Vladimir Poutine dans son discours du 1er mars 2018, discours au cours duquel il avait présenté six nouveaux systèmes d'armes, dont le Kinjal.

Le Kh-47 Kinjal

Le Kinjal est un missile balistique mono-étage à propulsion solide. Il reprend sans doute l'étage propulsif du SS-26 Iskander-M, sa longueur totale est estimée entre 7,70 m et 8 m, pour un diamètre de 0,92 m. Sa masse est supérieure à 4 t alors que celle de l'Iskander-M est de 4,6 t, pour une charge utile estimée entre 500 et 700 kg. L'autodirecteur est intégré à l'ensemble, ce qui fait que le missile reste entier jusqu'à l'impact. Il est équipé d'un système de guidage inertiel avec un recalage satellitaire du système de géolocalisation russe Glonass. Il est équipé d'un système de guidage terminal soit électro-optique soit radar qui lui confère une précision théorique qui pourrait osciller entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres, en fonction du mode de guidage.

Larguer un missile balistique depuis un chasseur présente plusieurs avantages. Le premier est le gain de portée obtenu, en effet, allumer l'étage propulsif du Kinjal à une altitude de 15 à 20 km équivaut à avoir un missile bi-étage tiré du sol. En choisissant le MiG-31K comme plate-forme d'emport, les Russes ont opté pour un porteur à très haute altitude et la masse du Kinjal représente approximativement la moitié de la charge utile maximale de l'appareil. L'altitude de largage du missile est relativement élevée et pourrait se situer entre 10 km et 15 km. Dans la meilleure des hypothèses, le Kinjal initierait alors sa phase propulsée à l'altitude où l'Iskander achève ordinairement la sienne, lui donnant des caractéristiques de portée, de vitesse, de trajectoire et de manœuvre très supérieures. Un autre

- avantage est de pouvoir bénéficier de la mobilité du porteur et de son rayon d'action, ce qui donne au système ainsi obtenu une plus grande souplesse d'utilisation en particulier dans l'adaptation aux défenses adverses. D'autre part, le Kinjal capitalise sur les développements accomplis sur le SS-26, à travers des solutions technologiques éprouvées, ce qui lui offre un niveau de fiabilité potentiellement élevé.

Retard occidental ?

Les missiles hypersoniques une fois opérationnels mettent en difficulté de manière nette les capacités de dissuasion et de commandement occidentales. Le Pentagone a tardé semble-t-il à saisir la menace malgré un rapport de 2016 qui avertissait que Russes et Chinois disposaient d'armes supersoniques et hypersoniques suivant des trajectoires différentes des missiles balistiques classiques à des vitesses dépassant les capacités de détection des systèmes sol-air des Etats-Unis. Depuis, les Etats-Unis ont réagi avec le développement de quelques programmes. La Darpa en particulier mène deux projets, la Navy également. En France les études hypersoniques sont effectuées par l'ONERA. La guerre en Ukraine montre l'utilisation opérationnelle du Kinjal et il est clair que sa doctrine d'emploi et ses performances seront analysées de près par les agences d'armement occidentales. ■ ML

Sources

Air & Cosmos n°2652 2 août 2019

Fondation pour la recherche stratégique : Missiles hypersoniques : le cas du Kh-47M2 Kinjal.

► Un nouveau vitrage intelligent pour le bâtiment

Des chercheurs d'Oxford ont mis au point un nouveau revêtement de fenêtre intelligent dont les caractéristiques peuvent être ajustées pour émettre ou réfléchir la chaleur du soleil dans des proportions variables. Cette technologie permettrait selon les auteurs de réduire jusqu'à un tiers les coûts énergétiques de chauffage et de climatisation dans le bâtiment.

Les technologies du verre « intelligent »

Les verres dits « intelligents » ou « actifs » ont tous pour objet de procurer un meilleur confort aux utilisateurs par une modification automatique ou contrôlée de leurs caractéristiques physiques (émissivité, couleur, transparence, etc.). Les préoccupations environnementales croissantes, d'une part, et le souci du bien-être des occupants du bâtiment de l'autre amènent en particulier à résoudre la double question de la déperdition de chaleur artificielle vers l'extérieur pendant l'hiver et *a contrario*

une transmission excessive de chaleur dans la pièce du fait du rayonnement infrarouge émis par le soleil en période estivale. Réaliser automatiquement ce comportement variable en fonction des saisons n'est pas chose facile.

Traditionnellement les verres intelligents proposés par les fabricants de verre font appel à des revêtements :

- *électrochromes* (variation de couleur induite par un signal électrique) ;

- *photochromes* (variation induite par la lumière incidente), plutôt réservés aux lunettes ;

- plus récemment, des verres *thermochromes* dont les caractéristiques sont modifiées par un apport local de chaleur ;

- photovoltaïques, encore peu utilisés à ce jour (hublot chauffant).

Mais peut-on sans altérer la couleur du verre et sa transparence relever le défi du comportement saisonnier idéal décrit ci-dessus ? En effet Il est important que la lumière visible soit transmise de manière quasi identique dans les deux modes, cette condition esthétique étant jugée essentielle pour l'adoption de technologies vertes.

Une avancée britannique ?

Des chercheurs de l'Université d'Oxford ont collaboré avec des experts de l'industrie pour développer une technologie de fenêtre intelligente adaptable ¹ qui constitue une variante des vitrages thermochromes habituels. Celle-ci pourrait, selon eux, réduire la consommation d'énergie d'une maison de taille moyenne de 30 % environ par rapport aux fenêtres à double vitrage classiques. Ce nouveau verre est doté d'un revêtement à faible émissivité *réglable spectralement* qui est constitué d'un matériau à changement de phase pour contrôler la quantité de chaleur qui pénètre dans la pièce par la fenêtre, sans affecter la qualité de la lumière transmise. L'énergie thermique du rayonnement solaire est absorbée par le verre et réémise sous forme de chaleur pour réchauffer la pièce en période froide à l'aide de radiateurs électriques transparents incorporés dans le substrat de verre, ou au contraire réfléchi en partie, pendant l'été, afin de refroidir la pièce et éviter de recourir à la climatisation.

Le prototype construit par l'équipe de chercheurs dans le cadre du projet WAFT (Wearable and Flexible Technologies

¹ Youngblood N, Talagrand C, Porter B, Galante CG, Kneepkens S, Triggs G, Sarwat SG, Yarmolich D, Bonilla RS, Hosseini P, Taylor R, Bhaskaran H " Reconfigurable low-emissivity optical coating using ultrathin phase change materials", ACS Photonics, 9,1, pp. 90-100 (décembre 2021).



Figure 1 : Des échantillons du nouveau verre dans les deux modes, montrant que la lumière les traverse de manière à peu près identique. Source: Université d'Oxford.

Collaboration) qui associe les universités d'Oxford, du Sussex et de Southampton ainsi qu'une quinzaine d'industriels, utilise un matériau à changement de phase actif à base de chalcogénure ($\text{Ge}_{0,2}\text{Te}_{0,8}$). En période chaude, sous l'effet de la chaleur, ce matériau dépasse la température de transition (probablement une transition de type amorphe-cristal) et réfléchit une partie importante du rayonnement infrarouge tout en laissant passer la lumière sans modification sensible de la transparence.

La figure 1 illustre la faible variation de transparence obtenue dans les deux états du vitrage.

Les auteurs affirment que la proportion de chaleur transmise est réglable en fonction des conditions climatiques et peut être aisément asservie localement sans intervention manuelle.

Toutefois ils estiment que d'importantes recherches sont encore nécessaires avant d'envisager une commercialisation de cette technologie, même si le concept mis en œuvre dans ce nouveau vitrage permettra sans doute d'atteindre de très bons rendements. ■ AB

➤ Enfin une image du trou noir de notre galaxie

Ces astres qui retiennent la lumière et absorbent la matière environnante dans un disque d'accrétion qui permet de confirmer leurs existence, sont les objets les plus extraordinaires du cosmos. De nouvelles techniques d'observation permettent d'en obtenir une image.

Il y a trois ans l'équipe de l'*Event Horizon Telescope* (EHT) dévoilait la première image d'un trou noir. Il s'agissait alors du trou noir situé au centre de la galaxie M87 dans la constellation de la Vierge. La REE 2019-2 avait alors consacré quelques pages d'actualité à cet événement. Cette image était très attendue car elle était issue d'une campagne d'observations qui avait été effectuée en mars 2017 grâce à un réseau de télescopes dont les informations couplées entre ●●●

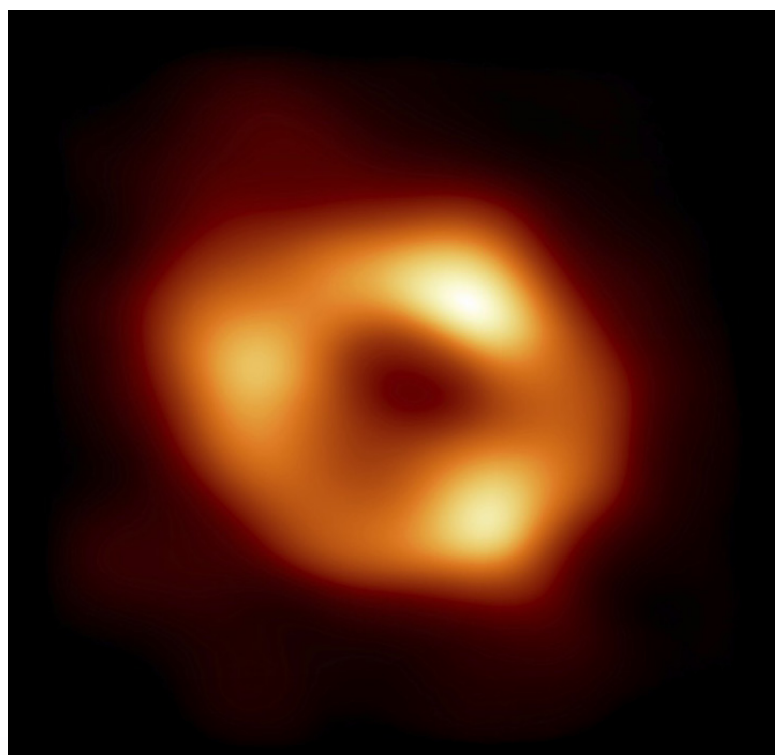


Figure 1 : Image de Sagittarius A*.

- elles pouvaient, par interférométrie, simuler un télescope équivalent de la taille de la Terre permettant des observations qu'il était impossible de réaliser jusque-là. Le résultat de l'EHT faisait entrer l'astrophysique des trous noirs dans une nouvelle ère où il était possible de visualiser directement l'environnement réel du trou noir.

Mais cette première image était publiée deux années après la campagne d'observations et en réalité deux objets au cours de cette campagne avaient été enregistrés, le trou noir de M87 mais aussi le trou noir de la Voie lactée appelé Sagittarius A*. Or il n'était question que de M87 dans le rapport et la question avait été posée aux astrophysiciens de savoir pourquoi le trou noir de la Voie lactée n'était pas dévoilé. Il faut donc revenir sur les caractéristiques de Sagittarius A* (figure 1).

Un trou noir au centre de la Voie lactée.

Pour le rappel de la théorie des trous noirs le lecteur peut se reporter au numéro 2019-2 de la REE.

Le centre de la galaxie se situe dans la constellation du Sagittaire et les astronomes l'observent depuis longtemps. Mais il se dissimule derrière de gigantesques amas de gaz et de poussière cosmique ce qui fait que son observation par des télescopes optiques est impossible. Heureusement les

radiations ont un large spectre s'étendant des ondes radio aux rayons gamma et certaines longueurs d'onde peuvent franchir l'obstacle des poussières et des amas, c'est le cas des rayonnements radio infrarouge X et gamma. Il est donc possible d'étudier le centre galactique au moyen des radiotélescopes et des satellites artificiels. On a donc découvert dans cette région une source Sagittarius A* qui est la plus puissante de toutes les sources radio de la galaxie, avec une luminosité dix fois supérieure à la luminosité optique du soleil.

Ce qui était plus étonnant encore c'est que l'émission provenait d'une région plus « réduite » de 3 milliards de kilomètres c'est à dire de la taille de l'orbite de Saturne ou de celle d'une géante rouge ; or il était impossible qu'il puisse exister un amas d'étoiles dans un volume aussi faible et l'émission radio était donc due à un astre unique. Après avoir éliminé l'hypothèse d'un pulsar ou d'une source X binaire ou du reste d'une supernova, les astronomes ont conclu qu'il devait s'agir d'un trou noir géant de 4 millions de masses solaires. Le diamètre d'un trou noir possédant une telle masse est de vingt millions de km, or lors des premières constations de 2017, les résolutions angulaires des instruments étaient insuffisantes pour examiner plus en détail cet objet extraordinaire. Depuis, les astrophysiciens ont perfectionné leurs instruments et, grâce à un réseau de radiotélescopes (EHT), ils ont à leur disposition une résolution compatible avec l'observation de Sagittarius A*.

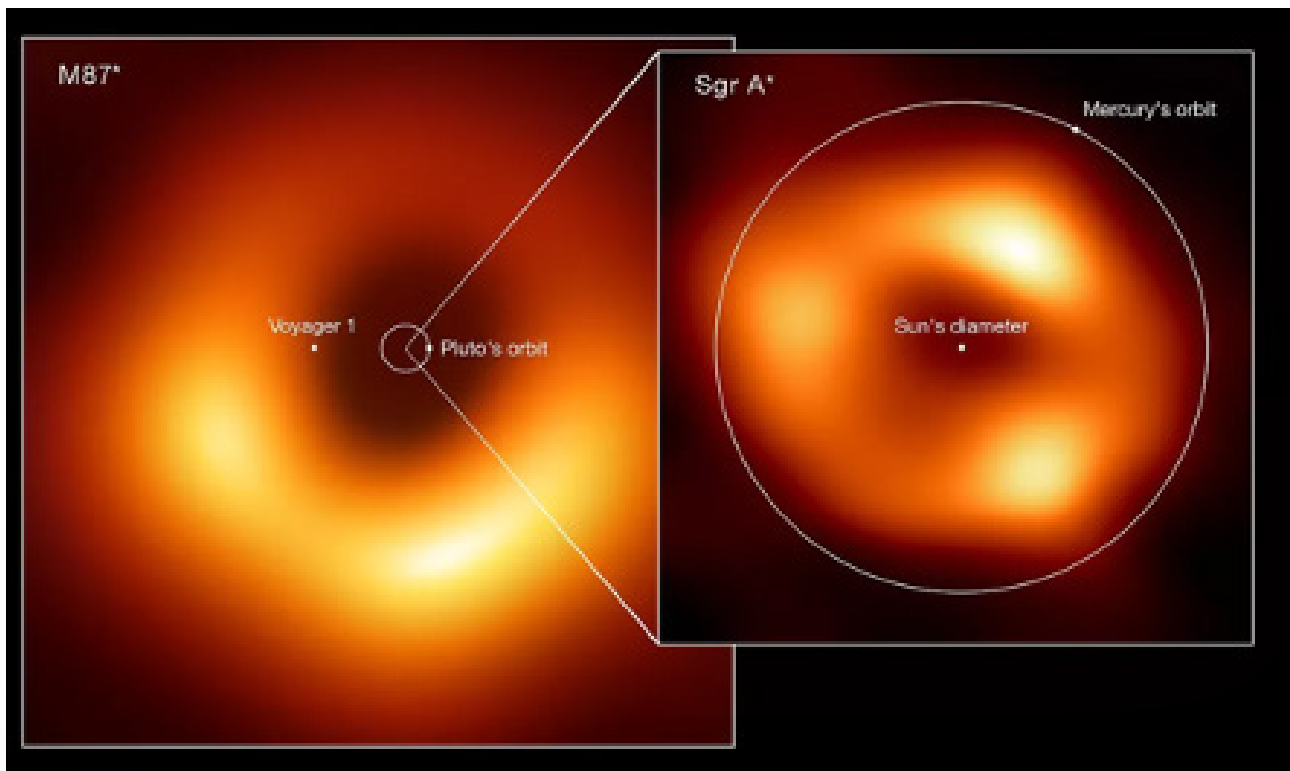


Figure 2 : Comparaison de M87 et Sagittarius A* qui montre que leurs diamètres apparents depuis la Terre sont équivalents. Source : EHT Collaboration.

Sagittarius enfin dévoilé

En mars 2017, en quelques jours, l'EHT avait enregistré un énorme volume de données pour pouvoir synthétiser une image reconstituée de deux trous noirs, M87 dans la constellation de la Vierge et Sagittarius A* dans notre propre galaxie. Le trou noir supermassif M87 est 2000 fois plus grand et 2000 fois plus lointain que Sagittarius A* de sorte que la résolution angulaire nécessaire pour les observer est la même (figure 2). Il y a deux ans, l'équipe de l'EHT avait publié l'image de M87 mais rien sur Sagittarius A*. Au cours de la conférence de presse, l'équipe de l'EHT avait indiqué que ce dernier posait des difficultés techniques. Qu'est-ce qui peut expliquer la difficulté à observer l'objet le plus proche ?

En premier lieu nous observons à l'intérieur de la Voie lactée à 27000 années-lumière du centre mais notre vision jusqu'à Sagittarius A* est encombrée par des nuages de gaz et de poussière. Il faut donc traiter ces obstacles perturbateurs. Mais le plus grand problème est lié à la dynamique du gaz dans l'environnement proche de Sagittarius A*. Ce problème est lié à la taille du trou noir car sa période de rotation est de l'ordre de l'heure alors que celle de M87 dure deux mois. Or, l'EHT met environ une journée pour collecter les données nécessaires pour réaliser une image. Dans le cas de M87, le long temps de pose n'est donc pas un problème.

Pour Sagittarius A*, il a donc fallu décompenser par calcul les mouvements du gaz autour du trou noir afin d'en avoir une image nette. Pour cela les chercheurs ont développé de nouveaux outils, grâce auxquels ils ont créé des millions d'images, qu'ils ont recoupées afin d'en tirer le cliché définitif et cela a pris près de trois années (Covid compris !). On rappelle que les données utilisées ont été enregistrées principalement le 7 avril 2017 et représentent un volume total de 6 000 téraoctets. Elles ont été analysées sur deux corrélateurs, l'un à Munich et l'autre au MIT. L'image obtenue est donc une image reconstituée car les longueurs d'onde utilisées sont de 1,3 mm qui sont des ondes radios mais qui donnent de précieuses informations sur le trou noir. Les astrophysiciens ont ainsi pu mesurer le diamètre de l'horizon du trou noir de taille angulaire évaluée à 52 secondes d'arc. La masse se déduit de cette mesure et est évaluée à 4 millions de masses solaire. Cette masse confirme ce qui avait été observé par d'autres moyens dans l'infrarouge par Andrea Ghez qui avait étudié les trajectoires de l'étoile S2 autour de Sagittarius A* ce qui lui avait valu le prix Nobel de physique en 2020 (voir REE 2020-3 sur la précession de Schwarzschild).

Deux autres caractéristiques astrophysiques du trou noir ont également été évaluées. Si la masse de Sagittarius A* était déjà connue, ce n'était pas le cas de son spin, c'est-



Figure 3 : Première image du trou noir de la galaxie M87.

à-dire son sens de rotation par rapport à l'écoulement du gaz qui l'entoure, ni de son axe de rotation. Ces deux facteurs influent sur l'aspect de l'image obtenue. Dès lors, les astrophysiciens ont réalisé des millions de simulations en faisant varier ces deux paramètres. La résolution actuelle de l'image permet de conclure que l'axe du trou noir n'est pas fortement incliné et que le trou noir est bien en rotation et n'a pas un mouvement rétrograde.

Début de la nouvelle astronomie des trous noirs

Les astrophysiciens ont aussi testé la compatibilité de ces observations avec la relativité générale et ils ne constatent pas d'anomalie avec la théorie, à 10 % près compte tenu de l'instrumentation. L'amélioration des observations peut beaucoup progresser et fait partie des futurs objectifs de la collaboration. Les astrophysiciens espèrent aussi améliorer la technique d'interférométrie avec les onze radiotélescopes dont trois nouveaux qui ont rejoint la collaboration, afin de pouvoir étudier les champs magnétiques et les jets de trous noirs comme Sagittarius A* ou M87. Ces mesures sont complétées par un autre programme d'observation appelé *Gravity* qui opère à une fréquence située dans l'infrarouge donnant des informations complémentaires.

Avec la détection des ondes gravitationnelles l'astronomie des trous noirs a fait un bond important en quelques années caractérisant une nouvelle astronomie. Une nouvelle phase d'observations a été effectuée en mars de cette année et il faut espérer que l'expérience déjà acquise permettra une publication plus rapide. ■ ML