

DES ACCIDENTS ORDINAIRES DE L'ESPACE-TEMPS : LES TROUS NOIRS

Trous noirs

Jean-Pierre Luminet
astrophysicien à
l'Observatoire de Paris,
directeur de recherche
au C.N.R.S.

→ *Le bestiaire de l'astrophysique regorge de créatures étranges, mais les plus mystérieuses sont sans conteste les trous noirs, d'une compacité extrême, invisibles et pourtant, selon les physiciens, accidents ordinaires de notre espace-temps.*

1. FORMATION DES TROUS NOIRS

Par suite de l'effondrement gravitationnel du cœur des étoiles lorsque tout leur combustible thermonucléaire (hydrogène, hélium...) est épuisé, l'évolution stellaire aboutit à l'expulsion plus ou moins violente de l'atmosphère gazeuse (nébuleuse planétaire ou supernova) et à la formation d'astres résiduels extrêmement condensés. Les naines blanches et les étoiles à neutrons appartiennent à cette variété étrange de corps compacts, mais leurs masses ne peuvent être supérieures à 3 masses solaires (M_{\odot}).

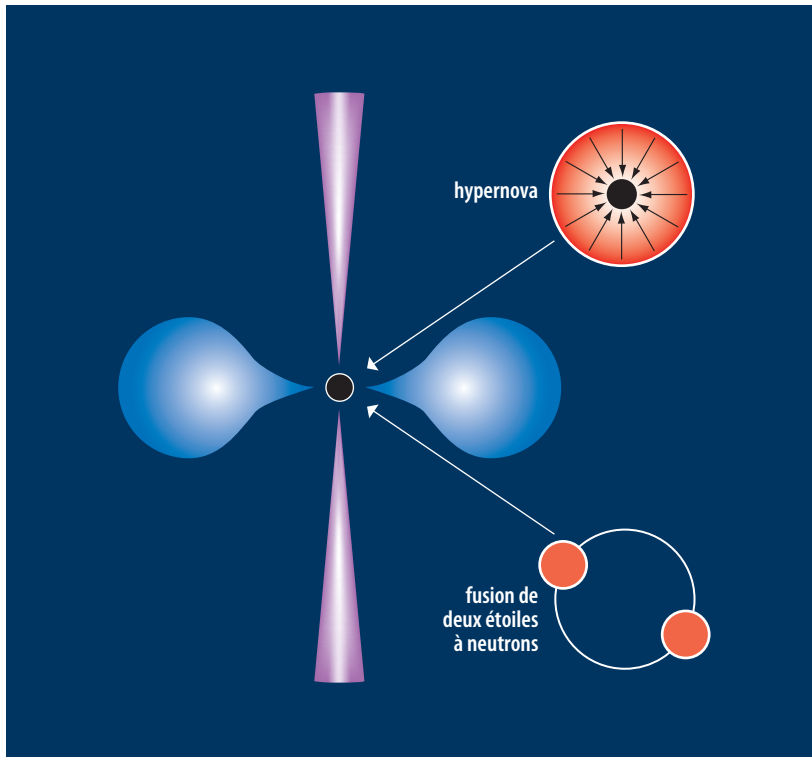
Il existe un autre type d'étoile, extrêmement rare (au mieux une étoile sur dix mille), dont la masse initiale est supérieure à $40 M_{\odot}$. On en voit un bel exemple dans notre Voie lactée avec Éta Carinae, qui « pèse » plus de 100 masses solaires. Ces étoiles brûlent leurs réserves de « carburant » à un rythme effréné et meurent au bout de quelques millions d'années, dans une explosion colossale appelée hypernova, libérant cent fois plus d'énergie qu'une supernova. Les modèles d'évolution indiquent qu'une telle étoile développe un cœur de matière dégénérée dépassant $3 M_{\odot}$. Dès lors, la compression gravitationnelle ne peut plus être compensée par les forces de répulsion des électrons ou des neutrons dégénérés, et l'effondrement continue à écraser la matière sur elle-même sans plus rencontrer de résistance : un trou noir dit « stellaire » se forme.

La naissance d'un trou noir stellaire en plusieurs étapes est également possible : il peut y avoir formation préalable d'une étoile à neutrons au cœur d'une supernova, suivie d'une accrétion de matière – provenant par exemple d'une étoile compagne dans un système binaire serré –, jusqu'à ce que la masse dépasse la limite critique et déclenche l'effondrement irréversible en trou noir. Il existe aussi des couples serrés d'étoiles à neutrons, dont l'énergie orbitale décroît au cours du temps au point de rapprocher les composantes et de provoquer leur collision à des vitesses de l'ordre de 100 000 kilomètres par seconde. La coalescence de deux étoiles à neutrons forme un trou noir.

Ces divers processus, schématisés dans la figure 1, conduisent à penser que notre Galaxie pourrait abriter environ cinquante millions de trous noirs d'origine stellaire.

À plus grande échelle, des amas denses et compacts d'étoiles, dits « globulaires », peuplent en grand nombre les halos galactiques. Les plus massifs d'entre eux subissent l'effondrement gravitationnel de leurs régions centrales, la fusion de nombreuses étoiles formant des trous noirs dits « intermédiaires », dont la masse est comprise entre quelques centaines et quelques milliers de masses solaires.

Par ailleurs, le centre de la plupart des galaxies abrite des trous noirs géants, rassemblant l'équivalent de millions – pour les trous noirs dits massifs – ou de milliards – pour les trous noirs dits supermassifs – de masses solaires. Le mécanisme de leur formation demeure incertain. Ils peuvent se former d'un coup, par effondrement d'un très gros



1. Formation de trous noirs stellaires et sursauts gamma. Les deux scénarios proposés au début des années 1990 pour expliquer les sursauts gamma invoquent la formation d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion (en bleu), soit lors de l'effondrement d'une étoile très massive produisant une explosion d'hypernova, soit lors de la fusion de deux étoiles à neutrons. Le sursaut gamma est concentré dans un faisceau radiatif (en violet) émis perpendiculairement au disque d'accrétion (J.-P. Luminet).

amas d'étoiles, ou bien progressivement, à partir d'un trou noir stellaire qui grossit en attirant peu à peu de la matière. Pour une galaxie dont le cœur est riche en nourriture potentielle (étoiles et gaz), les calculs théoriques faits en supposant un taux d'alimentation raisonnable du trou noir montrent que, sur une période de 10 milliards d'années (ce qui correspond à peu près à l'âge des galaxies), un trou noir initialement stellaire peut atteindre 1 milliard de masses solaires et devenir aussi volumineux que notre système planétaire.

Un tout autre processus, beaucoup plus hypothétique, en appelle à des trous noirs « primordiaux » qui se seraient formés très tôt dans l'histoire de l'Univers, non pas lors de l'effondrement d'étoiles mais dans les premières secondes suivant le big bang, en raison des pressions et des densités gigantesques qui régnaient dans le plasma primitif de l'époque. Les trous noirs primordiaux massifs pourraient constituer les germes gravitationnels autour desquels les futures galaxies se sont formées au cours du milliard d'années qui a suivi. Les observations récentes montrent en effet que les premières galaxies se sont formées plus vite qu'on ne l'imaginait, et que nombre d'entre elles, dont les quasars, ont abrité dès leur prime jeunesse des trous noirs géants.

La théorie des trous noirs primordiaux prédit également la formation de trous noirs microscopiques, ayant la taille d'une particule élémentaire mais la masse d'une montagne. À cette échelle interviendraient certains phénomènes de physique quantique, absents dans les trous noirs classiques, qui obligerait ces « mini-trous noirs » à perdre de la matière. Un mini-trou noir s'évapore en émettant des particules et de l'énergie, et cela d'autant plus rapidement que sa masse est faible : un trou noir de 1 tonne doit s'évaporer en 1 dix milliardième de seconde, un trou noir de 1 million de tonnes subsiste 3 ans et un trou noir qui pourrait vivre plus de 14 milliards d'années (condition sine qua

non pour que nous puissions l'observer aujourd'hui) doit avoir au minimum 1 milliard de tonnes. Un tel mini-trou noir équivaut à la masse d'un astéroïde de quelques kilomètres concentrée dans le volume d'un seul proton.

2. PHYSIQUE DES TROUS NOIRS

L'existence de trous noirs géants a été imaginée dès la fin du XVIII^e siècle par le Britannique John Michell (1724-1793) et par le Français Pierre-Simon de Laplace (1749-1827) dans le cadre de la théorie de la gravitation de Newton. Par quelques calculs simples, ils montraient qu'il pourrait exister dans l'Univers des astres tellement massifs que même la lumière ne pourrait pas s'en échapper. Ils en concluaient que ces astres hypothétiques seraient invisibles. Cette brillante hypothèse, qui n'a pas suscité d'intérêt à l'époque, a resurgi 150 ans plus tard dans le cadre d'une autre théorie de la gravitation, la relativité générale.

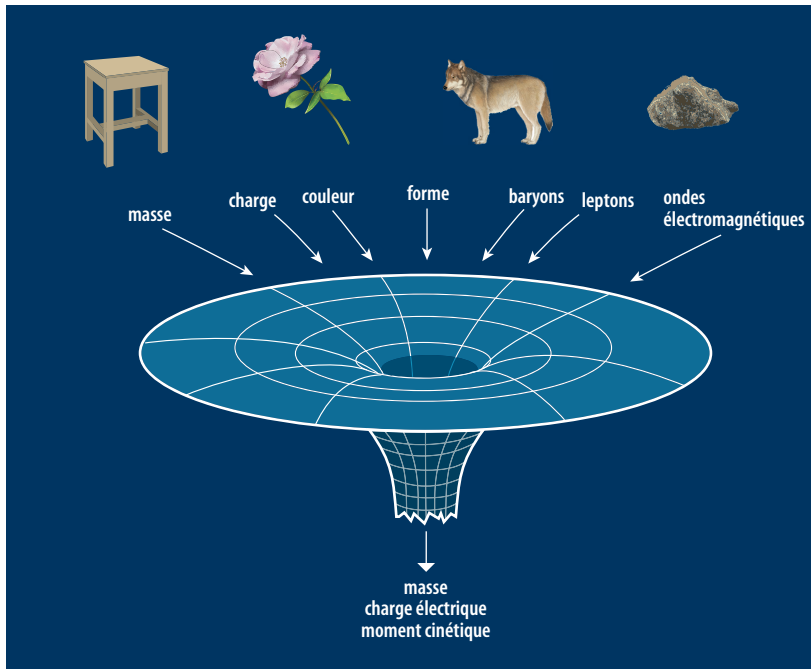
Ce qu'on entend aujourd'hui par trou noir (le terme ne date que de 1968) possède en effet des propriétés non newtoniennes « exotiques » que seule la gravitation relativiste d'Einstein permet de comprendre. Le trou noir doit se comprendre non pas comme une masse qui attire avec une force irrésistible, mais comme une déformation extrême de l'espace-temps. Il a été conceptualisé dès les années 1930, mais sa théorie s'est surtout développée dans les années 1970.

Depuis la publication de la relativité générale par Einstein, en 1915, on sait que la gravitation déforme l'espace et dévie les trajectoires des rayons lumineux. Il est possible de visualiser cette déformation par un puits gravitationnel creusé par les corps dans la trame même de l'espace-temps, qui serait « tissée » par les rayons lumineux. Plus un corps est massif, plus son puits gravitationnel est profond. Le trou noir, stade ultime de l'effondrement gravitationnel, est caractérisé par un puits tellement profond que rien ne peut s'en échapper. Si on y lance un projectile, il sera, quelle que soit sa vitesse, d'office capturé et ne sortira plus jamais. Qu'il s'agisse d'une fusée, d'une particule élémentaire ou d'un rayon lumineux, il tombera au fond du puits.

Plus précisément, la relativité générale associe à tout corps sphérique un rayon critique – appelé rayon de Schwarzschild, du nom de l'astrophysicien allemand Karl Schwarzschild (1873-1916) –, tel que si le corps est confiné dans une sphère de ce rayon, aucune particule ni aucun rayonnement ne peuvent en sortir, d'où le nom de trou noir. Bien entendu, la grande majorité des astres sont très éloignés de cet état de trou noir : ainsi, le rayon critique du Soleil n'est que de 3 kilomètres, alors que son rayon réel est de 700 000 kilomètres; de même, le rayon critique de la Terre est de 1 centimètre. Cela montre que, pour qu'un astre de masse stellaire soit un trou noir, il faut que sa densité moyenne soit extrêmement élevée; en revanche, un trou noir géant n'est pas forcément dense.

Les propriétés physiques des trous noirs sont si extraordinaires qu'elles ont longtemps nui à la crédibilité de la théorie. La surface d'un trou noir n'est pas une frontière physique qu'on pourrait toucher, mais une frontière géométrique de l'espace-temps qui divise l'Univers en deux domaines : matière et lumière peuvent passer du domaine extérieur au domaine intérieur, mais non l'inverse. Véritable surface de démarcation entourant une région de non-retour, cette frontière porte le nom d'horizon des événements, pour la bonne raison qu'on ne peut plus rien observer au-delà.

À proximité d'un trou noir, l'espace est fortement déformé. Un astronaute qui s'y aventurerait verrait son corps étiré comme un spaghetti, parce que ses pieds subiraient une force de gravité beaucoup plus forte que sa tête. On appelle « forces de marée » cette différence gravitationnelle.



2. Théorème de calvitie. Le trou noir oublie pratiquement tout de la complexité de la matière qui a participé à sa formation : il ne mémorise que la masse, la charge électrique et le moment cinétique de la matière qui y tombe. Tout le reste de l'information – couleur, forme, nature (lepton, baryon, onde électromagnétique...) – disparaît

(J.-P. Luminet)

De même, le temps est fortement dilaté. Un observateur extérieur au trou noir qui regarderait l'astronaute au télescope ne le verrait jamais plonger dans le trou noir mais aurait l'impression qu'il ralentit de plus en plus – alors que c'est précisément le contraire : il accélère frénétiquement. Pour l'astronaute (qui aurait résisté aux forces de marée, en choisissant d'explorer un trou noir supermassif plutôt qu'un trou noir stellaire), le temps s'écoulerait normalement et il se verrait tomber vers l'horizon en un temps fini. Mais il y plongerait tellement vite que sa vitesse tendrait vers celle de la lumière, de sorte que, en vertu des lois de la relativité, chaque image de son voyage mettrait un temps de plus en plus long pour parvenir à l'extérieur. À la limite, lorsqu'il atteindrait la surface du trou noir, sa vitesse atteindrait celle de la lumière, et son image mettrait un temps infini à sortir. L'astronaute paraîtrait gelé à jamais dans son mouvement au moment où il sortirait du rayon de visibilité.

La naissance d'un trou noir est marquée par l'émission de rayonnements électromagnétique et gravitationnel. Les mathématiciens ont pu démontrer que la géométrie de l'espace-temps extérieur à l'astre en effondrement atteint un état d'équilibre assez simple autour de l'horizon des événements, toutes les irrégularités étant dissipées par le rayonnement gravitationnel. Il s'ensuit que le trou noir isolé le plus général est entièrement décrit par trois paramètres seulement : sa masse M , son moment cinétique J et sa charge électrique Q . Contrairement à toute autre configuration matérielle – qui possède généralement une forme, une composition chimique, une couleur... –, un trou noir est presque totalement dépourvu d'attributs ; cette pénurie d'informations sur ses états internes a été exprimée par le physicien américain John Archibald Wheeler par la formule pittoresque : « un trou noir n'a pas de poils ». La démonstration mathématique de ce résultat s'est donc naturellement appelée « théorème de calvitie » (« No hair theorem » en anglais, fig. 2). Une des conséquences de ce théorème est qu'il n'existe pas de possibilité de distinguer un trou noir fait de matière ordinaire d'un trou noir constitué d'antimatière.

Le trou noir ne se réduit pas à un corps passif qui distord l'espace-temps sans que rien ne l'affecte lui-même; il constitue au contraire une entité dynamique, capable de subir ou d'exercer des forces, d'absorber ou de fournir de l'énergie, de se transformer au cours du temps. En particulier, un trou noir en rotation dispose d'une énergie rotationnelle qui peut être extraite; les physiciens ont imaginé un processus au cours duquel un projectile à la trajectoire bien calculée pourrait se disloquer au voisinage d'un trou noir, de telle sorte qu'une partie des fragments soit capturée mais que l'autre revienne à l'envoyeur avec une énergie plus grande, le gain provenant de l'énergie rotationnelle du trou noir. Par un processus naturel similaire, un trou noir en rotation ancré dans des lignes de champ magnétique pourrait se comporter comme une « dynamo astrophysique » et alimenter les jets de particules observés dans les radiogalaxies.

On appelle « trou noir » non pas l'objet qui se trouve au fond du puits, mais toute la zone à l'intérieur de la frontière de non-retour. Mais qu'y a-t-il au fond d'un trou noir ? La théorie de la relativité générale prédit que dans les configurations les plus simples, par exemple si on postule un trou noir sphérique qui ne tourne pas sur lui-même, l'effondrement gravitationnel engendre un nœud qui « étrangle » l'espace-temps. La matière s'accumule indéfiniment et irréversiblement dans ce nœud.

En mathématiques, une valeur infinie apparaissant dans un continuum s'appelle une « singularité ». Mais l'idée de voir de la matière s'entasser dans un volume nul constitue une absurdité pour les physiciens. C'est pourquoi ils étudient des scénarios plus plausibles. On peut supposer, par exemple, qu'au voisinage du nœud la gravité deviendrait répulsive et permettrait à la matière de rebondir au lieu de créer une singularité – on aurait alors une sorte de pulsation de matière à l'intérieur du trou noir. Ce qui était il y a quelques années encore pure spéculation prend aujourd'hui consistance avec les tout nouveaux calculs effectués dans le cadre de la théorie de la gravitation quantique – l'une des voies d'approche pour unifier la relativité générale et la mécanique quantique. Dans cette théorie, l'espace serait formé de grains minuscules mais pas infiniment petits, en conséquence de quoi sa courbure ne pourrait pas devenir infiniment grande; dans un trou noir, l'écrasement de la matière et de l'espace se heurterait à une valeur finie, quoique très élevée, de la courbure, et s'inverserait pour donner lieu à un rebond.

Cependant, toutes les étoiles tournent sur elles-mêmes, les étoiles à neutrons tournent même très vite; comment donc les trous noirs, du moins ceux qui se sont formés à partir d'étoiles effondrées, ne tourneraient-ils pas sur eux-mêmes ? De fait, la relativité générale calcule que l'intérieur d'un trou noir en rotation n'est pas bouché par une singularité en forme de nœud, mais en forme d'anneau couché dans le plan équatorial. Du coup, il existe des trajectoires au sein du trou noir qui peuvent éviter le « crash », soit en survolant l'anneau singulier, soit en passant carrément au milieu (en évitant soigneusement de toucher le bord).

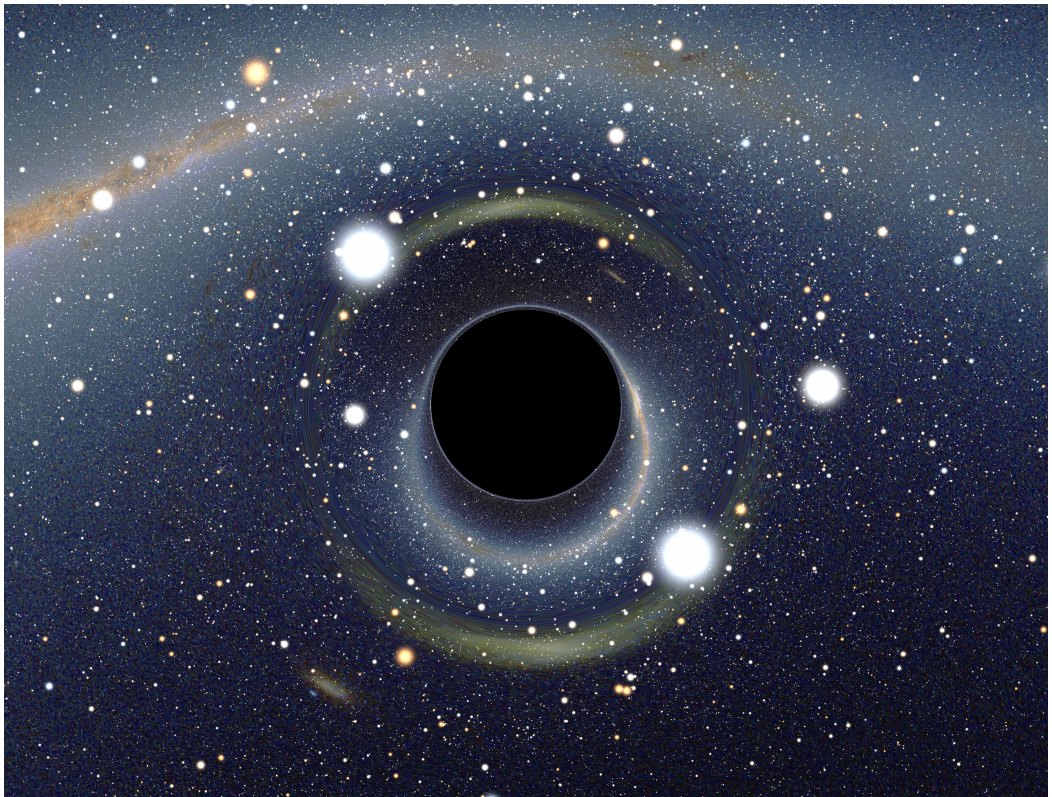
L'idée que le fond du trou noir en rotation n'est pas bouché mais ouvre un passage vers une autre région de l'Univers a engendré la notion fascinante de « trous de ver ». Ces véritables raccourcis de l'espace-temps pourraient déboucher quelque part dans notre Univers, voire, selon d'autres théories, dans d'autres univers. On peut ainsi imaginer des structures inverses des trous noirs, des « fontaines blanches » d'où jaillirait l'énergie engloutie par les trous noirs, et dans ce cas le big bang pourrait être une immense fontaine blanche. Celle-ci serait connectée à un trou noir colossal d'un autre univers qui aurait déversé une partie de sa matière dans le nôtre, et nous alimentons peut-être à notre tour d'autres « big bang » avec nos trous noirs. De trous noirs en fontaines blanches reliés par des trous de ver, on en viendrait ainsi à fabriquer des univers en cascade.

3. DÉTECTION DES TROUS NOIRS

Le trou noir n'est plus l'objet purement théorique qu'il demeura durant des décennies. Certes, un trou noir est par définition invisible, puisqu'il ne laisse échapper ni matière ni lumière (entendu par là l'ensemble des longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique, et pas seulement la lumière visible). Mais les divers processus de formation des trous noirs suggèrent que nombre d'entre eux ne se trouvent pas isolés dans le vide; ils doivent être entourés de particules, de nuées de gaz ou d'étoiles qui, soumises à un fort champ gravitationnel, rayonneraient de façon caractéristique. Le trou noir reste invisible, il allume cependant la matière qui tombe vers lui. Par ailleurs, au voisi-

3. Mirage gravitationnel produit par un trou noir stellaire. Au voisinage d'un trou noir, la déviation des rayons lumineux est très forte. C'est pourquoi il peut s'y créer des illusions d'optique extrêmes. Cette simulation numérique présente les distorsions qui seraient causées par un trou noir stellaire situé à quelques dizaines de kilomètres d'un observateur et dont l'image se dessine sur la voûte céleste dans la direction du Grand Nuage de Magellan, une galaxie satellite de la notre. Celui-ci apparaît dédoublé sous la forme de deux arcs de cercle. La Voie lactée, qui apparaît en haut de l'image, est également fortement distordue, au point que certaines constellations sont difficiles à reconnaître, comme la Croix du Sud (au niveau de l'étoile orange, Gamma Crucis, en haut à gauche). Une étoile relativement peu lumineuse (HD 49359, de magnitude apparente 7,5) est située presque exactement derrière le trou noir; elle apparaît sous la forme d'une image double, dont la luminosité apparente est considérablement amplifiée (d'un facteur 4 500 environ), pour atteindre une magnitude apparente de $-1,7$. Les deux images de cette étoile ainsi que les deux images du Grand Nuage de Magellan sont situées sur une zone circulaire entourant le trou noir, appelée anneau d'Einstein. Une copie de la sphère céleste tout entière est contenue à l'intérieur de cet anneau.

(A. Riazuelo/ IAP)



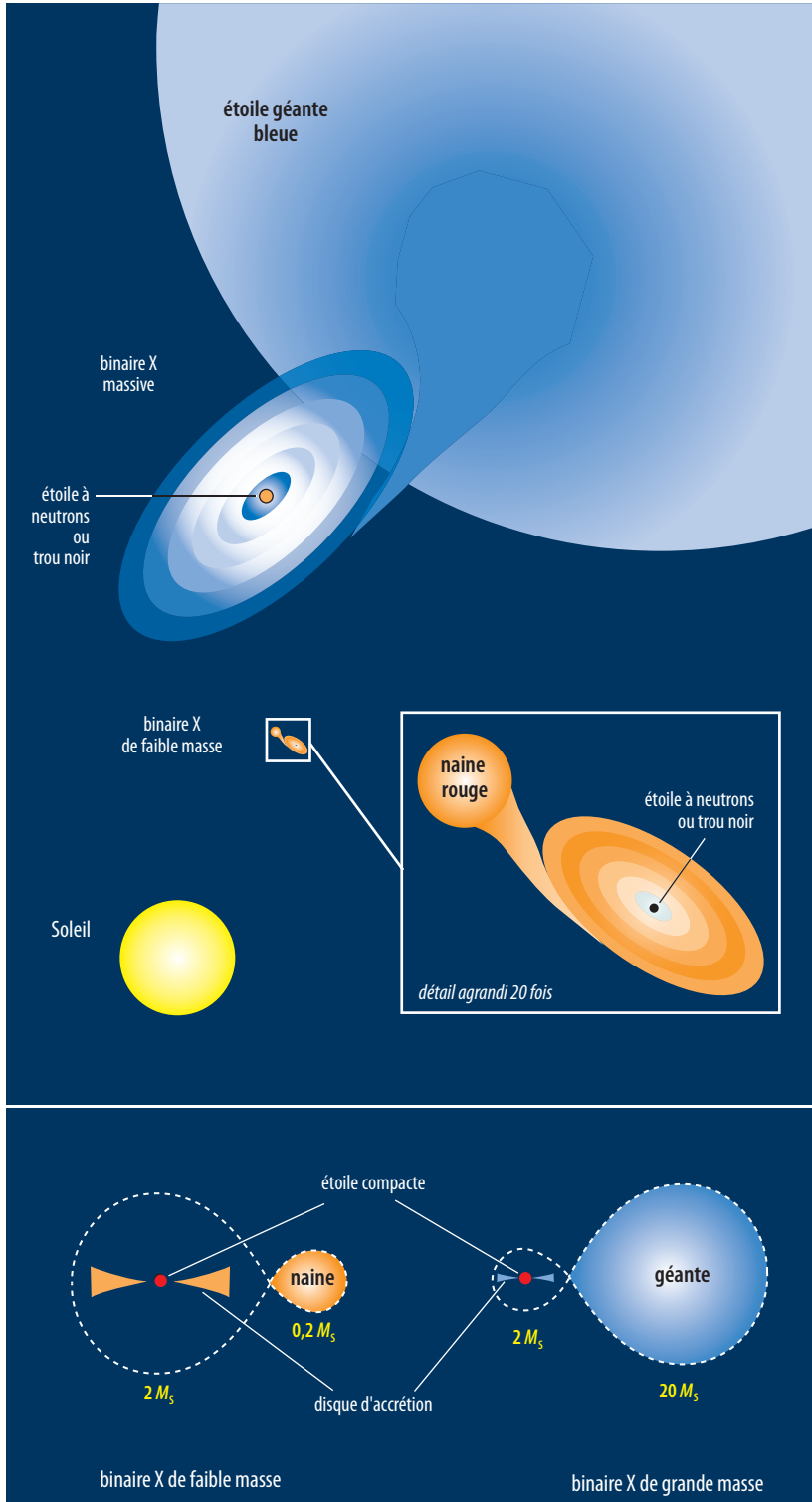
nage d'un trou noir, la déviation des rayons lumineux est très forte; c'est pourquoi il peut s'y créer des illusions d'optique extrêmes (fig. 3).

De fait, c'est à partir des années 1960 que les trous noirs sont devenus crédibles aux yeux des astronomes. L'observation des radiosources ainsi que la découverte des quasars ont lancé l'idée selon laquelle des trous noirs supermassifs, situés au centre de certaines galaxies, pouvaient susciter dans leur environnement immédiat une importante libération d'énergie. Peu après, l'avènement de détecteurs de rayonnements de hautes énergies embarqués sur satellites a révélé les sources X binaires, systèmes d'étoiles doubles dont une composante, optiquement invisible et très compacte, émet un flux important de rayons X.

Tous ces phénomènes se classent parmi les plus énergétiques de l'Univers. Il est facile de comprendre pourquoi. Un objet quelconque qui tombe en chute libre à la surface de la Terre dégage de la chaleur; s'il tombe à la surface d'une naine blanche ou d'une étoile à neutrons, dont les champs gravitationnels sont beaucoup plus intenses, il délivre beaucoup plus d'énergie, sous forme de rayonnement visible ou même de rayons X; si enfin l'objet tombe dans un trou noir, le champ gravitationnel de ce dernier est tellement grand qu'il provoque la libération d'une fraction importante de toute l'énergie que l'objet est capable de céder, c'est-à-dire son énergie de masse au repos, donnée par la célèbre relation d'Einstein : $E = mc^2$ (rappelons toutefois que l'horizon, frontière du trou noir, est une surface géométrique sans consistance matérielle, contrairement aux croûtes solides des naines blanches et des étoiles à neutrons). C'est la raison pour laquelle un trou noir est le moteur le plus efficace pour convertir la masse-énergie de la matière en rayonnement électromagnétique. Baignant dans un environnement riche en gaz et en étoiles, un trou noir draine la matière ambiante et s'en nourrit. Dans le cas des sources X binaires (fig. 4), l'étoile compacte avale l'atmosphère de son compagnon par « aspiration » gravitationnelle. Le gaz arraché est lentement entraîné par les forces centrifuges en un mouvement de spirale tourbillonnante et forme un disque d'accrétion. C'est dans ce disque plus ou moins épais que la matière gazeuse, tombant peu à peu dans le puits central, transforme une partie de sa masse en lumière, de façon analogue au principe des centrales hydroélectriques, qui convertissent l'énergie potentielle gravitationnelle d'une chute d'eau en énergie électrique. Certaines sources X binaires émettent un rayonnement parfaitement périodique, attestant la présence d'étoiles à neutrons en rotation. D'autres sont transitoires, agitées de brutales variations de leur luminosité en quelques millièmes de seconde. Ces fluctuations proviennent vraisemblablement des régions internes du disque d'accrétion, qui sont très chaudes et agitées de turbulences. Le disque forme épisodiquement des bulles de gaz chauffées à plusieurs centaines de millions de degrés qui exhalent de copieuses bouffées de rayonnement X.

Pour déceler sans ambiguïté la présence d'un trou noir dans une source X binaire, il faut parvenir à le « peser », puisque le seul critère indiscutable permettant de trancher entre étoiles à neutrons et trous noirs est leur masse : une étoile à neutrons ne peut excéder $3 M_{\odot}$. La pesée séparée de chacune des composantes d'un système binaire est impossible; l'astronome doit recourir à toute une chaîne de déductions. La masse du couple se déduit de la période orbitale; la masse de la composante visible se déduit approximativement de son type spectral et, moyennant une hypothèse sur l'inclinaison du plan orbital par rapport à la direction d'observation (fondée sur la présence ou l'absence d'éclipses), on en déduit la masse approximative de l'étoile compacte.

À la fin des années 2000, une vingtaine de systèmes ont été découverts dans notre Galaxie, où les mesures indiquent une valeur supérieure à $3 M_{\odot}$; dès lors, le trou noir est le seul candidat possible. Les cas les plus probants sont Cygnus X-1, A0620-00 et



4. Les deux classes de sources X binaires. Dans les binaires X à faible masse (LMXB), l'étoile visible (en orange) est une naine ; dans les binaires X à grande masse (HMXB), l'étoile visible est une géante massive (en bleu). Dans les deux cas, l'étoile compacte invisible possède un disque d'accrétion formé du gaz qui est arraché à l'étoile visible. Celui des LMXB est de taille comparable à celle de l'étoile qui l'alimente, celui des HMXB reste minuscule. La taille du Soleil est indiquée pour comparaison.

(J.-P. Luminet)

V 404 Cygni, situés dans notre Galaxie, LMCX-1 et LMCX-3, situés dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie satellite de la nôtre.

C'est dans V 404 Cygni, découvert en 1991, que l'existence d'un trou noir est la plus évidente, car, quelles que soient les hypothèses faites par ailleurs sur la nature de l'étoile compagne et le mouvement orbital du système, on est certain que la composante compacte dépasse $7 M_{\odot}$.

Il existe d'autres candidats trous noirs plausibles, notamment parmi les nombreuses sources X inventoriées, mais qui ne sont pas encore « homologués » en raison de l'imprécision des observations.

Pour les trous noirs de masse intermédiaire, des observations récentes montrent qu'au moins deux amas globulaires (M15 dans notre Galaxie et G1 dans M31, la « nébuleuse »

d'Andromède) sont organisés autour d'une seule masse centrale de 4 000 et 20 000 M_{\odot} , respectivement. Il n'y a pour l'heure pas de meilleure explication que celle de trous noirs intermédiaires ayant fusionné une grande quantité d'étoiles.

Le degré de crédibilité est beaucoup plus grand en ce qui concerne le trou noir massif qui occupe le centre de la Voie lactée et baptisé Sagittarius A*. Ses effets gravitationnels sont très clairement observés sur les étoiles proches (fig. 5), dont la vitesse est d'autant plus grande que l'orbite est resserrée (à l'instar de différentes billes en rotation sur les pentes d'un entonnoir profond) – jusqu'à 10 000 kilomètres par seconde pour les plus proches. Le mouvement de ces étoiles, analysé depuis le milieu des années 1980, permet de déduire la masse et la taille du trou noir en question : la masse vaut au minimum trois millions de fois la masse du Soleil pour un diamètre douze fois plus grand seulement.

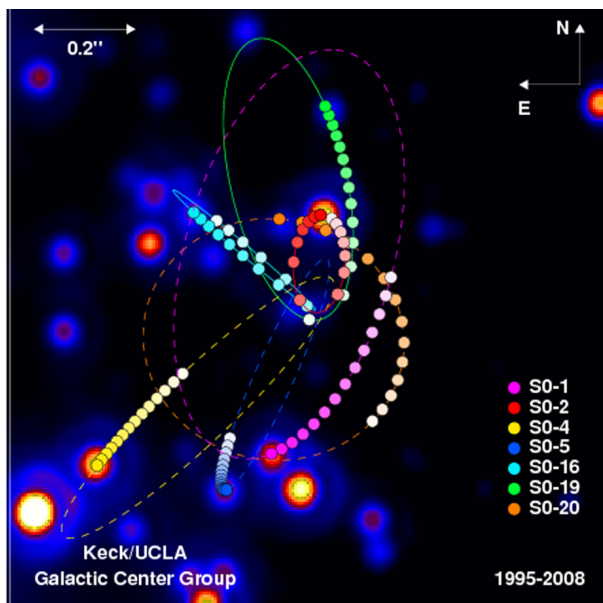
L'application la plus spectaculaire des trous noirs à l'astrophysique concerne les noyaux actifs de galaxies. L'idée de base est toujours la même – l'énergie serait produite par du gaz chauffé au cours de sa chute libre sur un trou noir –, mais l'échelle est tout autre : le trou noir, situé

au centre, aurait la masse de cent millions d'étoiles ou davantage, et pour produire une énergie équivalente à celle qui est observée dans les quasars, il devrait absorber en gaz l'équivalent de plusieurs étoiles par an.

Sur 120 000 galaxies étudiées, 20 000 semblent posséder un trou noir supermassif. Le record de masse, détenu depuis janvier 2008, est de 18 milliards de masses solaires.

Ces énormes quantités de gaz requises proviendraient de la rupture totale d'étoiles. Un trou noir géant doit en effet être capable d'attirer des étoiles orbitant à proximité et de les faire tomber progressivement dans son puits gravitationnel. Si le trou noir fait entre

5. Le trou noir massif du centre galactique. Les trajectoires d'une poignée d'étoiles gravitant autour du centre galactique Sagittarius A* ont été reconstituées grâce aux observations continues effectuées dans l'infrarouge de 1995 à 2008 aux télescopes Keck de Hawaï. La dynamique de cet ensemble d'étoiles et les grandes vitesses stellaires observées (plus de 1 000 km/s) impliquent un trou noir central de 3 millions de masses solaires environ. (Andrea Ghez, UCLA Galactic Center Group/ Keck)



5 et 100 millions de M_{\odot} , une étoile qui pénètre à l'intérieur d'un certain rayon critique est soumise à un puissant effet de marée, dû au champ différentiel de gravitation du trou noir géant. L'étoile se disloque littéralement en émettant un rayonnement caractéristique, cette bouffée parvenant à échapper au trou noir car elle est émise avant que l'étoile ait franchi l'horizon.

Une telle mise à mort suit un scénario en trois temps : dans un premier temps, la gravitation différentielle qui s'exerce sur les bords opposés de l'étoile vainc la cohérence de celle-ci et la contraint à s'aplatir comme une crêpe. On peut alors la qualifier de « crêpe stellaire flambée » ; flambée parce que, au moment de sa dislocation, elle est surchauffée et fabrique des éléments chimiques particuliers ; ceux-ci pourraient servir de signature pour les détecter. Au bout d'un certain temps, l'aplatissement devient tel que la densité et la température intérieures deviennent paroxystiques, provoquant l'allumage de nouvelles réactions nucléaires, et des ondes de choc intenses et brutales : l'étoile est devenue une bombe, elle expédie des débris dans toutes les directions. Certains sont éjectés vers l'extérieur, d'autres continuent à spiraler en direction du trou noir. Lorsqu'ils arrivent à proximité de l'horizon, ils s'échauffent tellement qu'ils émettent des bouffées de rayons X et ultraviolets. C'est le dernier rôle de l'agonie stellaire.

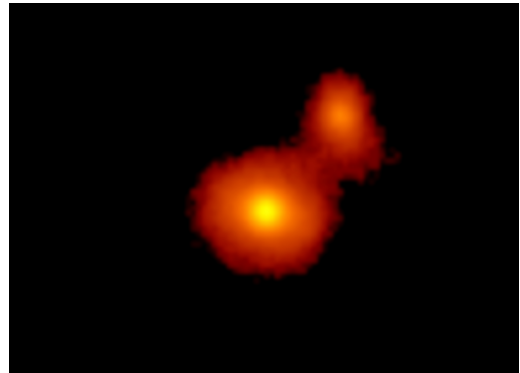
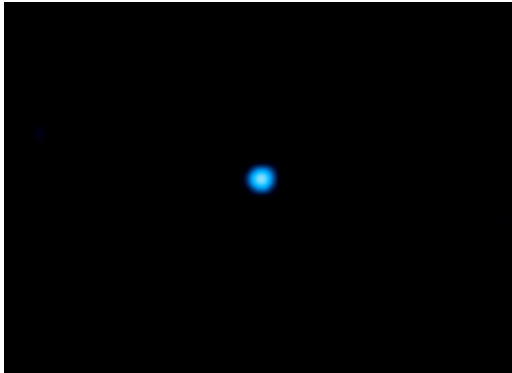
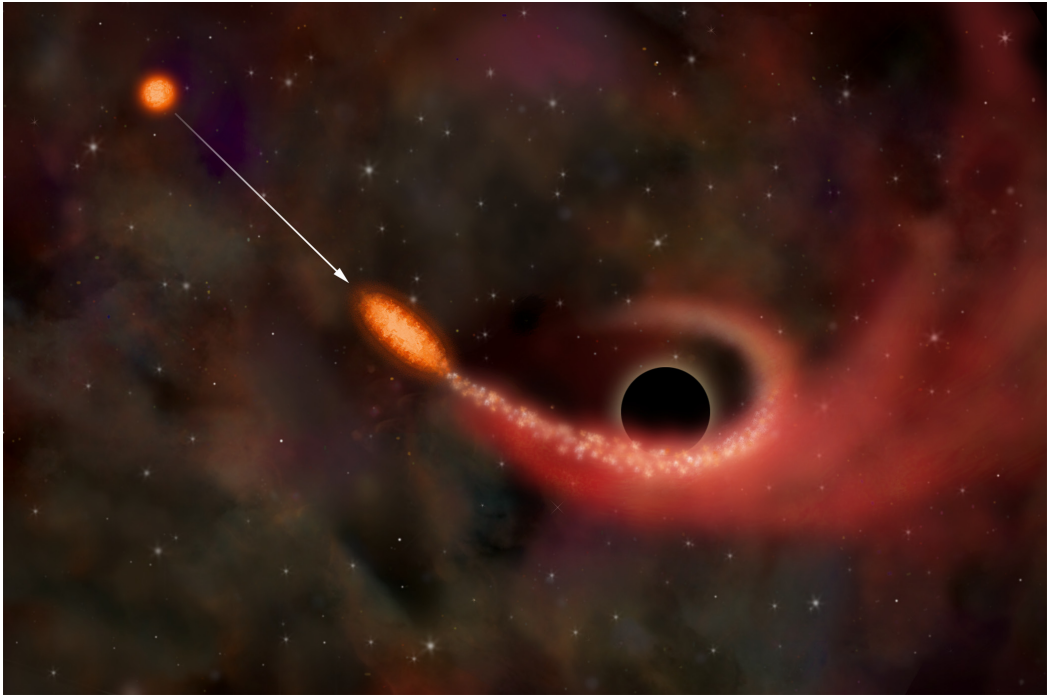
Ces modèles ont d'abord été calculés sur ordinateur, dans les années 1980, puis quelque peu délaissés, faute d'observations susceptibles de les corroborer. Mais, grâce aux progrès des instruments d'observation, on commence à détecter tout près du centre de certaines galaxies lointaines des flashes de rayonnement qui ressemblent à la signature attendue des crêpes stellaires. En 2004, une puissante flambée observée près d'un trou noir de 100 millions de masses solaires affichait le profil calculé d'une destruction stellaire de masse équivalente au Soleil (fig. 6).

Pour les trous noirs de plus de 100 millions de masses solaires, la dislocation d'étoiles par effet de marée a lieu à l'intérieur de l'horizon et ne donne donc lieu à aucun phénomène observable. Pour expliquer le fonctionnement des très brillants quasars, il faut invoquer des collisions stellaires à grande vitesse, qui détruisent les étoiles et libèrent leur gaz à l'extérieur de l'horizon ; le gaz est ensuite avalé par le trou noir en libérant une énergie phénoménale.

Un autre moyen de prouver l'existence des trous noirs est de capter l'énergie qui est libérée au moment exact de leur formation. On observe notamment les indices de la formation de trous noirs stellaires sous forme de « sursauts gamma ». À partir du début des années 1970, on a enregistré sporadiquement des flashes de rayonnement de très haute énergie venant de l'espace, sans avoir la moindre idée de ce qui pourrait en être la cause. Aujourd'hui, on pense que ces sursauts gamma proviennent de l'explosion d'hypernovae libérant une énergie équivalente à 100 milliards d'étoiles en une seule seconde ! Il s'agit du phénomène cosmique le plus violent connu, mais il est si rare qu'on ne l'observe généralement que dans des galaxies extrêmement lointaines.

Un autre type de sursaut gamma, dit « court », se produit dans des galaxies plus vieilles et plus proches, et est donc moins puissant que les sursauts longs. Depuis 2005, on observe toutes les caractéristiques prédites par le modèle de la fusion d'étoiles à neutrons, autre processus de formation des trous noirs stellaires.

La formation des trous noirs s'accompagne aussi d'une émission d'ondes gravitationnelles, qui sont à la gravitation ce que les ondes lumineuses sont à l'électromagnétisme. Leur détection ne sera cependant possible que dans un futur plus ou moins lointain, tant elle requiert une technologie avancée. La sensibilité des instruments interférométriques franco-italien Virgo et américain L.I.G.O. (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), opérationnels depuis 2007, se situe à la limite de détection d'explosions de supernovae, de naissances de trous noirs et de collisions de



6. Rupture d'étoile par un trou noir géant. La flambée observée en 2004 au cœur de la galaxie RXJ 1242-11 dans les domaines X (par le satellite Chandra X-Ray Observatory, en bas à gauche) et optique (E.S.O., en bas à droite) est modélisée par la destruction d'une étoile par les forces de marée d'un trou noir géant (vue d'artiste, en haut), suivie de l'accrétion d'une partie de ses débris. (NASA/CXC/M. Weiss, S. Komossa).

pulsars jusqu'à 60 millions d'années-lumière environ, ce qui correspond à la distance qui nous sépare des galaxies de l'amas de la Vierge. L'étape suivante sera la grande mission américano-européenne L.I.S.A. (Laser Interferometer Space Antenna), qui mettra trois satellites en orbite conjointe autour du Soleil pour former un triangle de 5 millions de kilomètres de côté. Cette distance, mesurée avec une précision extraordinaire, jouera le rôle d'un bras dont la longueur oscillera à chaque passage d'une onde gravitationnelle. Cette technique de détection sera sans nul doute l'un des atouts majeurs de l'astronomie du XXI^e siècle.

Quant aux mini-trous noirs, susceptibles de s'être formés lors du big bang, existent-ils vraiment ? La question est ouverte. La fin de l'évaporation d'un mini-trou noir doit se solder par un rayonnement très énergétique qui serait détectable à 30 années-lumière à la ronde. Comme rien de probant n'a été détecté, les observations actuelles limitent la densité de mini-trous noirs primordiaux à un niveau extrêmement bas. On peut alors se demander si l'énergie nécessaire pour produire un mini-trou noir serait accessible dans l'accélérateur de particules L.H.C. (Large Hadron Collider, grand collisionneur de hadrons) du Cern. Deux protons extrêmement accélérés, au point d'atteindre 10 000 fois leur énergie habituelle, ne pourraient-ils pas, lorsqu'ils entrent en collision, fusionner en un mini-trou noir artificiel ? Le scénario a été étudié, mais il faudrait que certaines hypothèses théoriques peu vraisemblables soient vérifiées. Dans le cadre normal de la relativité générale, les énergies atteintes au Cern seront de très loin insuffisantes pour fabriquer même le trou noir le plus petit. Mais, si on remplace cette théorie par une version très spéciale de la théorie des cordes (théorie qui a pour ambition de remplacer la relativité générale pour décrire la gravitation à très petite échelle), on a une chance infime de voir se former des trous noirs microscopiques et très éphémères : ils s'évaporeront en une fraction de seconde, laissant une signature explosive, et cela au rythme d'un par seconde environ. Il s'agirait d'une avancée spectaculaire, confirmant par une seule expérience deux hypothèses : les micro-trous noirs et la théorie des cordes.

Souignons pour finir que les trous noirs de taille astronomique sont appelés à grossir perpétuellement en absorbant de la matière. Il en résulte que, si on envisage des perspectives temporelles très éloignées, le rôle des trous noirs deviendra de plus en plus important au cours de l'évolution de l'Univers. Les trous noirs géants se trouvant au centre des galaxies finiront, dans des milliards et des milliards d'années, par engloutir la plupart de la matière des galaxies, après quoi certains pourront même fusionner pour former des méga-trous noirs de plus en plus grands. Cependant, il est exclu d'imaginer que l'Univers tout entier se transforme en un seul trou noir géant, parce que l'Univers est en expansion. Comme l'espace se dilate, il a tendance à éloigner les trous noirs les uns des autres. Il se joue une sorte de course de vitesse entre la matière qui, localement, a tendance à se rassembler en grumeaux et finalement à former des trous noirs, et l'espace qui, de son côté, disperse la matière. On pense que la course sera gagnée par l'expansion de l'Univers. Seuls des trous noirs voisins pourront se rapprocher et fusionner. Les autres seront irrémédiablement emportés à la dérive sur les ailes en expansion de l'Univers vieillissant ■

- ▶ **La Science au présent 2000** « Les Sursauts gamma », p. 120.
- ▶ **La Science au présent 2001** « Les Quasars », p. 209.
- ▶ **La Science au présent 2004** « Un trou noir tournant au centre de la Galaxie », p. 47 ; « L'Évolution des galaxies », p. 224.
- ▶ **La Science au présent 2008** « Évolution de l'Univers : nouvelles données », p. 104.



BIBLIOGRAPHIE

M. Cassé, *Les Trous noirs en pleine lumière*, Odile Jacob, Paris, 2009 / S. Hawking, *Black Holes and Baby Universes and Others Essays*, Bantam Press, Londres, 1993 (trad. de l'anglais par R. Lambert, *Trous noirs et bébés Univers : et autres essais*, Odile Jacob, 1993, rééd. 2000) / J.-P. Luminet, *Les Trous noirs*, coll. Points Sciences, Seuil, Paris, 1992 ; *Le Destin de l'Univers : trous noirs et énergie sombre*, Fayard, Paris, 2006 / A. Riazuelo, S. Rouat et P. Desenne, *Voyage au cœur d'un trou noir*, DVD, Sciences et Avenir, Paris, 2008 / K. S. Thorne, *Black Holes and Times Warps : Einstein's Outrageous Legacy*, W. W. Norton, New York, 1994 (trad. de l'anglais par A. Bouquet et J. Kaplan, *Trous noirs et distorsions du temps : l'héritage sulfureux d'Einstein*, Flammarion, Paris, 1996, rééd. 2009) / *Les Trous noirs*, dossier de *Pour la science*, 1997.



SITES INTERNET

Black Hole Encyclopedia : <http://blackholes.stardate.org/>

Chandra X-Ray Observatory : Black Holes : <http://chandra.harvard.edu/xray/sources/blackholes.html>

Virtual Trips to Black Holes and Neutron Stars : http://antwrp.gsfc.nasa.gov/htmltest/rjn_bht.html