Mais revenons à notre pierre, lancée vers le haut en ligne droite. Plus la vitesse qu'on lui a imprimée est grande, plus élevée sera la hauteur qu'elle atteindra. Il existe d'ailleurs une vitesse, connue sous le nom de *vitesse de libération* : si la pierre pouvait être lancée à une vitesse supérieure, elle échapperait à l'attraction gravitationnelle de la Terre. Cette vitesse est d'environ 11,2 km/s. Et si au lieu de lancer la pierre depuis la surface de la Terre, nous pouvions le faire depuis la surface du Soleil, la vitesse nécessaire pour échapper à l'attraction gravitationnelle de l'astre roi serait bien plus importante encore, de l'ordre de 620 km/s.

La valeur de la vitesse de libération, v_e, s'obtient à partir de l'équation suivante :

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Les autres variables de l'expression sont la masse M de l'objet qui exerce l'attraction gravitationnelle, son rayon, R, et la constante gravitationnelle, G (dont la valeur est de $6{,}67 \cdot 10^{-11}$ $m^3/kg \cdot s^2$). Autrement dit, si la Terre avait la même masse ($6 \cdot 10^{24}$ kg), mais que son rayon était deux fois inférieur (de 3 185 km au lieu de 6 370 km), la vitesse requise pour échapper à son « étreinte » serait bien plus importante (d'environ 16 km/s).

Imaginons maintenant un scénario où la Terre continuerait à se contracter et, gardant toujours la même masse, réduirait de plus en plus son rayon, qui finirait par atteindre 0,9 cm. Quelques calculs nous permettraient de constater que, pour vaincre le champ gravitationnel exercé par une masse comme celle de la Terre concentrée dans un volume aussi réduit, la vitesse de libération serait d'environ 300 000 km/s, soit la vitesse de la lumière dans le vide ! Étant donné que, selon la théorie de la relativité restreinte, il s'agit de la vitesse maximale que nous puissions atteindre, rien donc, pas même la lumière, ne pourrait s'échapper d'un tel objet. La Terre serait transformée en ce que nous connaissons sous le nom de *trou noir*.

De l'équation posée ci-contr
trou noir, c'est-à-dire son rayon
noir ayant la masse de la Terre
vu, un rayon de 0,9 cm ; mais s'i
rayon serait de 3 km. La source
rius A*), l'objet émetteur situé au
la direction du bras du Sagittaire
noir dont la masse équivaudrait
dont le rayon serait inférieur à un
150 millions de kilomètres, soit
Terre et le Soleil). Enfin, les trous
supposément dans le noyau cent
spirales ou elliptiques (le SgrA* s
et pouvant atteindre une masse
Soleil, auraient une taille équivale
solaire.

LES « ÉTOILES SOMBRES » DU PAS

On peut penser que les trous noir
de la gravitation universelle, comm
man et philosophe de formation, Jo
appréhendé leur existence peu aprè

Ce physicien et astronome angla
à Cambridge, où il devient professe
gie, de grec, de philosophie et de gé
À 43 ans, il a la chance d'obtenir un
hill, petite paroisse du centre de la
de pasteur offre de nombreux avant
la science : des obligations peu con
un village de la taille de Thornhill,
un couvert, ainsi qu'une rente viag
Michell le comprend assez vite pou
son humble presbytère, l'homme e
avec les scientifiques les plus renom
sujets fort divers : séismes – dont

De l'équation posée ci-contre, on déduit que la taille du trou noir, c'est-à-dire son rayon, est liée à sa masse. Un trou noir ayant la masse de la Terre aurait, comme nous l'avons vu, un rayon de 0,9 cm ; mais s'il avait la masse du Soleil, son rayon serait de 3 km. La source SgrA* (abréviation de Sagittarius A*), l'objet émetteur situé au centre de la Voie lactée dans la direction du bras du Sagittaire, semble être un énorme trou noir dont la masse équivaudrait à quatre millions de soleils et dont le rayon serait inférieur à une unité astronomique (ou AU, 150 millions de kilomètres, soit la distance moyenne entre la Terre et le Soleil). Enfin, les trous noirs supermassifs, résidant supposément dans le noyau central de la plupart des galaxies spirales ou elliptiques (le SgrA* serait celui de la Voie lactée) et pouvant atteindre une masse d'un milliard de fois celle du Soleil, auraient une taille équivalente à celle de notre système solaire.

LES « ÉTOILES SOMBRES » DU PASTEUR MICHELL

On peut penser que les trous noirs naissent des conséquences de la gravitation universelle, comme l'a d'abord déduit le clergyman et philosophe de formation, John Michell, le premier à avoir appréhendé leur existence peu après l'époque de Newton.

Ce physicien et astronome anglais (1724-1793) fait ses études à Cambridge, où il devient professeur d'arithmétique, de théologie, de grec, de philosophie et de géologie – sa grande spécialité. À 43 ans, il a la chance d'obtenir un ministère de pasteur à Thornhill, petite paroisse du centre de la Grande-Bretagne. Le métier de pasteur offre de nombreux avantages à celui qui s'intéresse à la science : des obligations peu contraignantes, de surcroît dans un village de la taille de Thornhill, mais qui assurent un gîte et un couvert, ainsi qu'une rente viagère assez confortable. John Michell le comprend assez vite pour quitter l'université. Depuis son humble presbytère, l'homme en profite pour correspondre avec les scientifiques les plus renommés de son époque sur des sujets fort divers : séismes – dont il devient le premier savant

moderne –, magnétisme, étude de la lumière, composition des Pléiades et… trous noirs.

Dans une missive adressée en 1783 à la Royal Society, Michell écrit : « *S'il existait effectivement dans la nature des corps dont le diamètre était de 500 fois celui du Soleil* », ils exerceraient une attraction gravitationnelle si forte et leur vitesse de libération serait si élevée que « *toute la lumière émise par un tel corps y retournerait, par sa propre gravité* ». Raison donc pour laquelle on n'aurait aucune preuve visuelle de l'existence de ces « étoiles sombres », comme il les nommait alors. Quelques années plus tard, le grand astronome et mathématicien Pierre-Simon Laplace, le « Newton français » lancera une idée similaire :

> « Quelque part dans les cieux, il peut exister des objets invisibles aussi grands que les étoiles, et peut-être plus nombreux. Un astre lumineux, de la même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le Soleil, ne permettrait, en vertu de son attraction [gravitationnelle], à aucun de ses rayons de parvenir jusqu'à nous. Il est dès lors possible que les plus grands corps lumineux de l'Univers puissent, par cette cause, être invisibles. »

Ni Michell ni Laplace ne voyaient dans leurs « étoiles invisibles » autre chose que de simples artefacts théoriques. Il faut dire que les connaissances dans ce domaine étaient encore limitées. On ne détenait aucune preuve de l'existence d'un objet dont la densité pourrait pour le moins se rapprocher de la densité nécessaire pour attraper la lumière. Plus encore, le concept même que la lumière pourrait se faire « happer » par la gravité était loin d'être acceptée par l'ensemble de la communauté scientifique. Cet écueil théorique disparaîtra au début du XX^e^ siècle lorsque le physicien d'origine allemande Albert Einstein avancera que la gravité n'est rien d'autre que la courbure de l'espace-temps, démontrant que même la lumière est obligée de changer sa trajectoire en présence de cette courbure. Quelques mois après la publication de cette théorie révolutionnaire, son compatriote Karl Schwarzschild appliquera ses

équations au cas d'une masse sp
rique sans rotation. Il se heurt
alors à l'existence d'une *singu
rité*, autrement dit à un point où
échelles de valeurs physiques te
que la densité deviennent infin
L'astrophysicien découvre que ce
singularité se trouve à l'intéri
d'une surface circulaire ayant
rayon déterminé. Un point posséd
une densité infinie ? Restées cach
pendant plus d'un siècle, les « étoi
sombres » de Michell refont leur
de Schwarzschild.

Il faut encore patienter vingt an
l'Américain Julius Robert Oppenhe
prouvant qu'il est possible, du poi
l'effondrement gravitationnel d'un
la naissance d'un trou noir. L'articl
de vue d'un observateur externe, l'i
à l'horizon, tandis que, pour un obs
l'étoile, elle ne cesserait pas.

Puis, la recherche sur les trous
est dû au fait que les principaux
le sujet – qu'ils soient américains
John Archibald Wheeler, responsa
leur simulation par ordinateur) ou
Yakov Zeldovitch) – aient été mobi
de la bombe atomique.

Les études reprennent leur cou
1958, Wheeler admet la possibilité
Le physicien théoricien devient l'a
de trou noir. Et, en 1959, son group
l'intérieur du trou noir est régi par le
une théorie qui cherche à associer l
tique avec la théorie de la gravité.
l'astrophysicien soviétique et théor

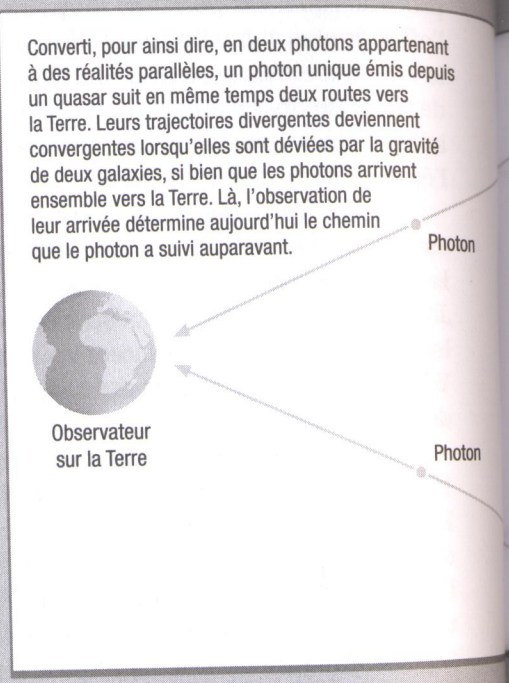
tein la volonté de découvrir la théorie du tout, capable d'expliquer l'unification des quatre forces physiques de la nature. Cela le conduira à mener des études sur la gravité quantique, dont il est le pionnier et qu'il poursuivra jusqu'à la fin de sa vie. Comme bien d'autres scientifiques majeurs de la première moitié du XX^e siècle, sa carrière sera interrompue pendant la Seconde Guerre mondiale alors qu'il doit participer au développement de la bombe atomique dans le cadre du projet Manhattan.

À Princeton

En 1936, Wheeler obtient une place de professeur à l'université de Princeton. Les premières années, il se consacre à l'étude de la *matrice-S*, qui fait le lien entre les états primitif et final d'un processus d'interaction entre particules. Après la guerre, il reprend sa chaire de Princeton, et ses cours portent tout d'abord sur la gravitation d'Einstein. Il a au départ beaucoup de mal à accepter l'idée de l'existence d'une singularité qui serait l'étape finale de la vie d'un objet super-massif. Puis, avec le temps, il devient persuadé de l'existence des trous noirs. Wheeler participera activement à ce que l'on a appelé « l'âge d'or » de la relativité générale pendant lequel les groupes de Yakov Zeldovich à Moscou, de Dennis Sciama à Cambridge et de Wheeler lui-même rivalisent (et, en quelque sorte, collaborent) en vue de l'inclusion définitive de la relativité générale dans le cadre de la physique théorique.

La théorie des champs

Les dernières années de sa carrière, alors qu'il est professeur émérite, Wheeler s'engage résolument dans la *théorie des champs*. Selon lui, l'Univers et les particules sont des manifestations des champs électromagnétiques et gravitationnels dans l'espace-temps. À l'origine, tout est information. Il



photon, suivent des trajectoires que séparent de nombreuses années-lumière. La gravité de deux galaxies massives les oblige à changer de cap et à se rapprocher progressivement l'un de l'autre, si bien qu'ils finissent par arriver ensemble vers la Terre. D'après cet étrange concept, l'observation, faite en l'occurrence depuis la Terre, déciderait aujourd'hui du chemin suivi il y a des milliards d'années par le photon. C'est l'observateur qui créerait la réalité observée. Wheeler est le promoteur d'un autre concept exotique, celui de la *mousse quantique*, dont il a aussi inventé le nom : à une échelle suffisamment petite de l'espace-temps, non seulement des particules sont sans cesse créées et détruites, comme les bulles de la mousse d'un savon, mais l'espace-temps lui même est fluctuant, tout comme une partie de cette mousse. Ce singulier scénario rendrait même possible la création fugace de « tunnels » de taille sous-atomique qui relieraient des points de l'espace, voire du temps. Ces tunnels sont connus sous le nom de *trous de vers*.

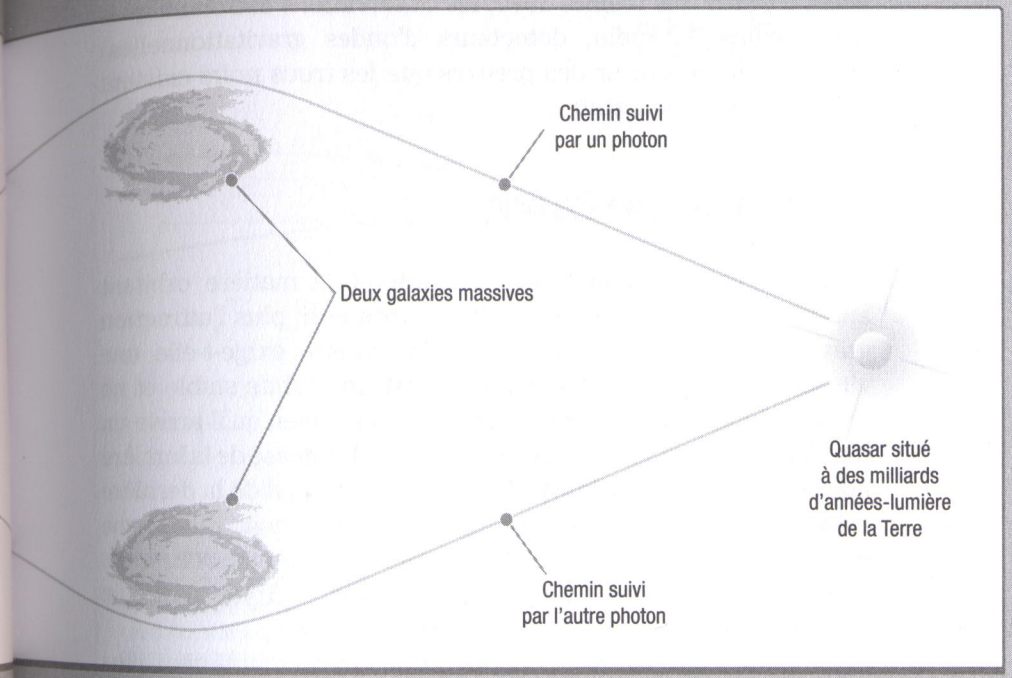
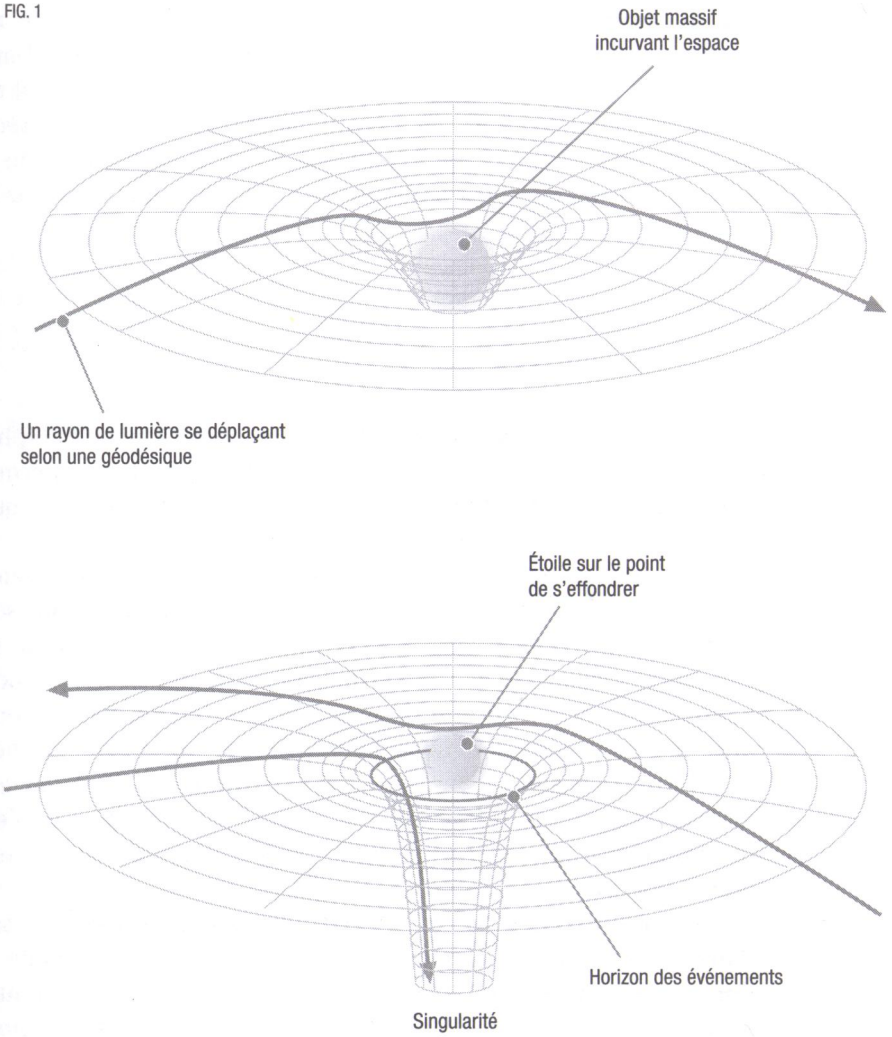


FIG. 1



La pesanteur, ou gravité, n'est rien d'autre que la courbure de l'espace-temps. Un objet massif, comme l'étoile du dessin du haut, courbe l'espace-temps, ce qui détermine à son tour le mouvement de la lumière et d'autres objets proches, qui décrivent des courbes dites *géodésiques*. Comme on peut le voir dans le dessin du bas, les trous noirs sont des régions de l'espace-temps où, lorsqu'un certain horizon des événements a été franchi, la courbure est telle que même la lumière ne peut s'en échapper. Le cœur du trou noir se trouve au centre de ce champ gravitationnel : c'est la singularité.

mais depuis celle d'un objet qui tente de s'en extraire. Dans ce cas, la frontière correspond à la lumière qui, issue de l'étoile, ne parvient pas à se diriger vers l'infini mais reste là, figée. Dans le cas d'un trou noir statique (certains, nous le verrons, sont en rotation), cette frontière est aussi connue sous le nom de *rayon de Schwarzschild* ou *rayon gravitationnel* et se formule de la façon suivante, où M est la masse de l'objet et c, la vitesse de la lumière :

$$r_s = \frac{2GM}{c^2},$$

Cette formule, valable pour un trou noir statique à symétrie sphérique – également nommé *trou noir de Schwarzschild* –, permet de calculer, par exemple, le rayon d'un trou noir de masse équivalente à celle de la Terre ou du Soleil.

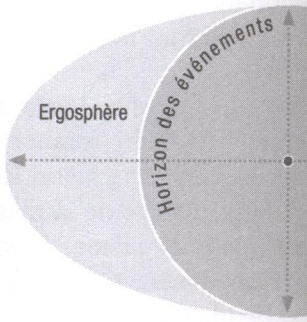
Lorsque la masse ou la lumière traverse l'horizon des événements, elle est attirée vers la région centrale du trou noir, soit la *singularité* (figure 1). Toute la masse de l'objet original se concentre alors dans cette région. On peut imaginer le trou noir comme une sorte d'entonnoir où la matière s'engouffre. La courbure du trou noir s'accentue jusqu'au point où, dans sa région la plus interne, cette courbure devient infinie. Là, tout devient mathématiquement infini : non seulement la courbure de l'espace-temps, mais aussi la densité de la matière et, par conséquent, la gravité.

Tout objet voué à tomber dans un trou noir termine écrasé dans ce que l'on nomme donc la singularité gravitationnelle et finit par atteindre une densité infinie. Mais, auparavant, il aura été sujet aux *forces de marée*, résultat de l'attraction gravitationnelle différente ressentie par plusieurs parties de l'objet à mesure que l'horizon des événements se rapproche. Les astrophysiciens désignent les conséquences d'un tel processus sur l'objet du nom particulièrement éloquent de « spaghettification ». De fait, la transformation due aux forces de marée est double. D'une part, l'objet tend à s'allonger dans la direction radiale (c'est-à-dire

FIG. 2

Un astronaute qui tomberait dans un trou noir formé par une étoile d'une masse équivalente à plusieurs fois celle du Soleil n'aurait aucune chance de survivre. À mesure qu'il s'approcherait du trou, sa forme deviendrait de plus en plus fine et allongée. Cette « spaghettisation » finirait par le détruire.

FIG. 3



Structure d'un trou noir en rotation. Le grand axe
rotation) coïncide avec le rayon de Schwarzschil
à l'axe de rotation) est moindre en raison de la r
Cet aplatissement est lié à une grandeur physiqu
aborderons plus loin. Le petit axe donne la taille

FIG. 2

Un astronaute qui tomberait dans un trou noir formé par une étoile d'une masse équivalente à plusieurs fois celle du Soleil n'aurait aucune chance de survivre. À mesure qu'il s'approcherait du trou, sa forme deviendrait de plus en plus fine et allongée. Cette « spaghettisation » finirait par le détruire.

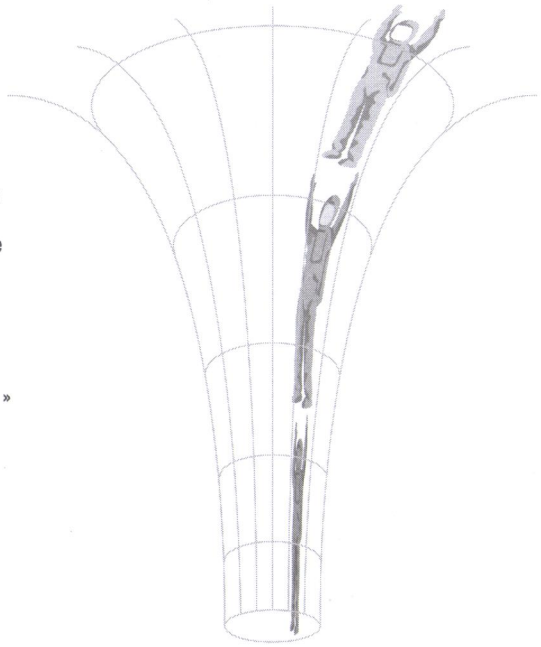
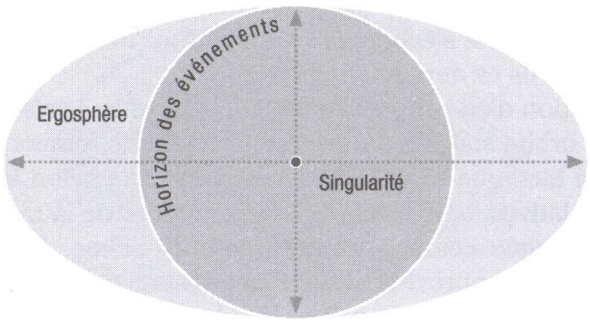
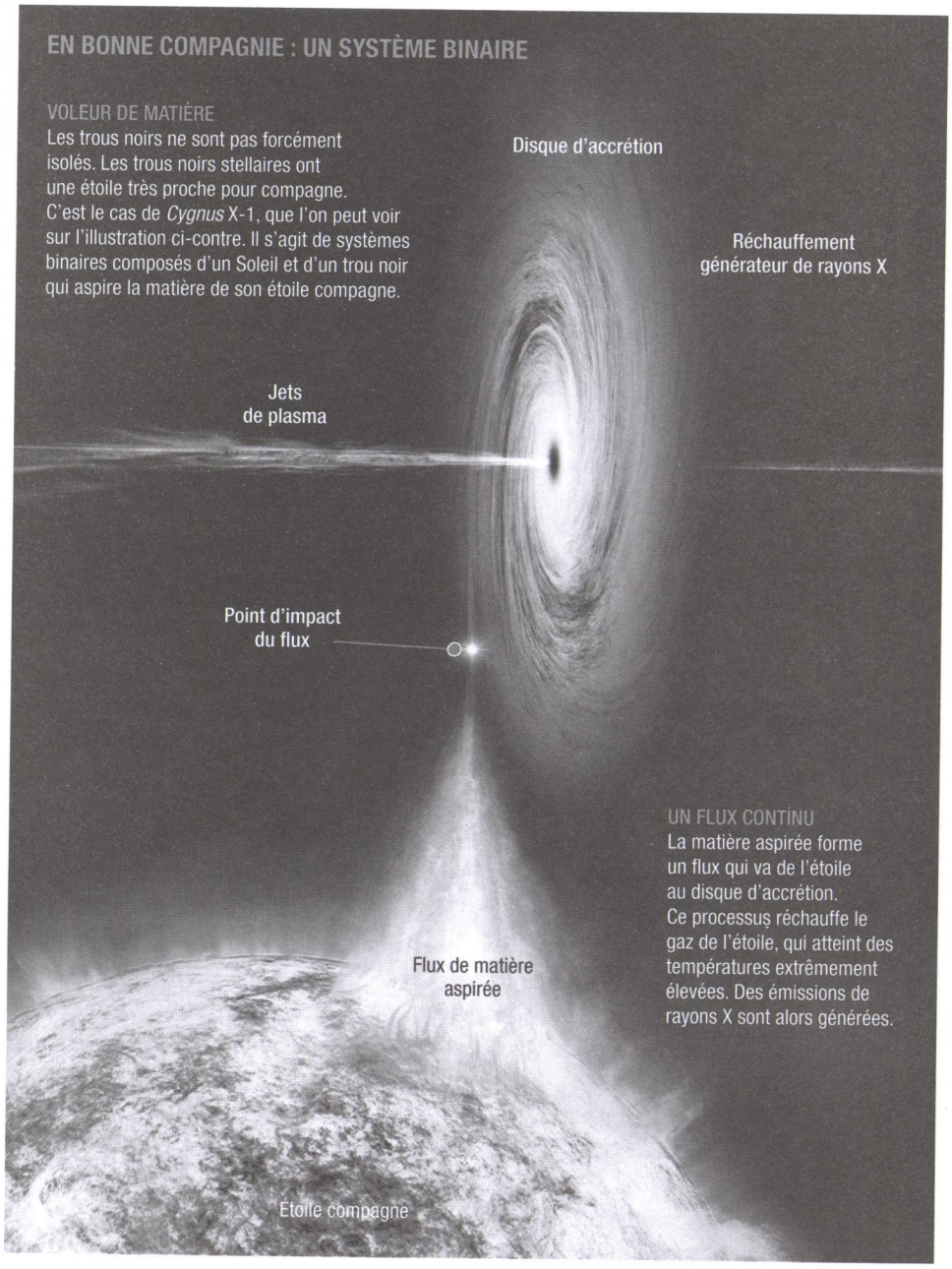


FIG. 3



Structure d'un trou noir en rotation. Le grand axe de l'ellipsoïde (perpendiculaire à l'axe de rotation) coïncide avec le rayon de Schwarzschild, tandis que la taille du petit axe (parallèle à l'axe de rotation) est moindre en raison de la rotation, qui aplatit la structure du trou noir. Cet aplatissement est lié à une grandeur physique nommée moment cinétique, que nous aborderons plus loin. Le petit axe donne la taille de l'horizon des événements.

Reconstitution d'un trou noir massif entouré d'un anneau de poussière, vu de profil. Lorsque l'on observe de la Terre des trous noirs dans cette perspective, comme dans le cas du trou appartenant au système binaire Swift J1357.2-0933 (dont le compagnon est une étoile), certains détails sont inaccessibles. En revanche, il est possible d'en capter d'autres, révélateurs de son activité. Par exemple, lorsque l'on peut observer l'un de ces disques par sa tranche, la matière de l'une de ses extrémités s'approche de nous lorsqu'il tourne, tandis que celle de l'autre côté s'éloigne, comme dans un manège. Ces mouvements opposés, que l'on ne percevrait pas si l'on voyait le disque d' « en haut », permettent d'obtenir une information, après analyse du spectre de la lumière projetée par la matière qui se rapproche ou s'éloigne.


EN BONNE COMPAGNIE : UN SYSTÈME BINAIRE
VOLEUR DE MATIÈRE
Les trous noirs ne sont pas forcément isolés. Les trous noirs stellaires ont une étoile très proche pour compagne. C'est le cas de *Cygnus* X-1, que l'on peut voir sur l'illustration ci-contre. Il s'agit de systèmes binaires composés d'un Soleil et d'un trou noir qui aspire la matière de son étoile compagne.
Disque d'accrétion
Réchauffement générateur de rayons X
Jets de plasma
Point d'impact du flux
UN FLUX CONTINU
La matière aspirée forme un flux qui va de l'étoile au disque d'accrétion. Ce processus réchauffe le gaz de l'étoile, qui atteint des températures extrêmement élevées. Des émissions de rayons X sont alors générées.
Flux de matière aspirée
Étoile compagne

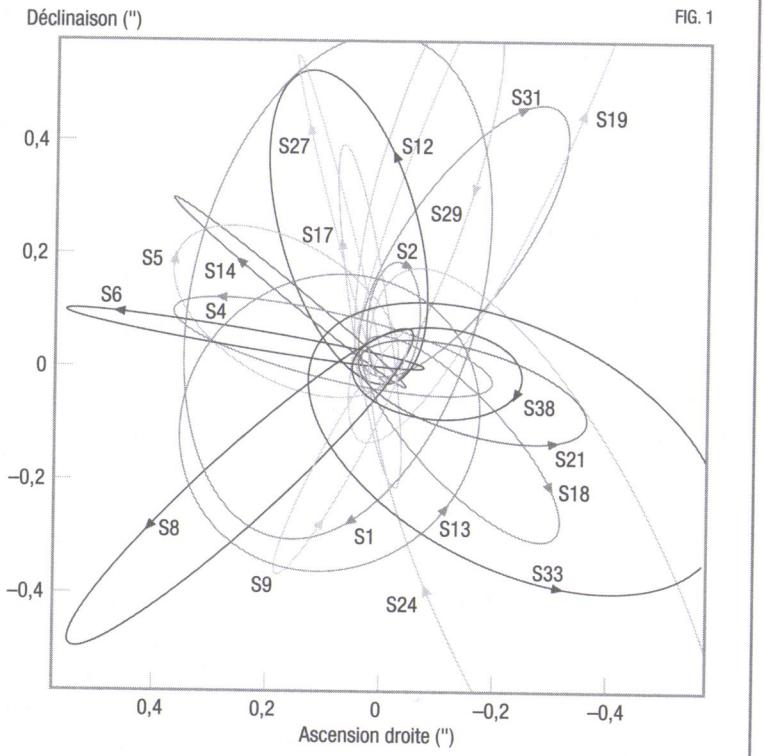


FIG. 1

Orbite des étoiles dans le voisinage de SgrA*, le trou noir du centre de la Voie lactée.

chaque étoile dans la région centrale des galaxies. Néanmoins, une analyse de la composition de la lumière combinée ou superposée de toutes, effectuée à l'aide d'une technique que nous détaillerons plus loin, permet d'obtenir une information révélatrice.

Afin d'explorer cette voie, des recherches ont été effectuées sur des galaxies proches possédant un trou noir relativement peu actif, de sorte que l'activité de ce trou ne masque pas les propriétés de la population d'étoiles. Le cas le plus clair est celui de la galaxie d'Andromède, M31. On signalera au passage que Martin Schwarzschild, fils de Karl Schwarzschild, appartenait à l'équipe de l'université de Princeton qui a étudié cette galaxie.