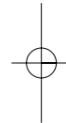


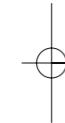


CHAPITRE 12

Illuminations

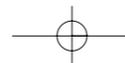


*La plaque du foyer noir, de réels soleils des grèves:
ah ! puits des magies.
Arthur Rimbaud*



En physique, on aime visualiser concrètement l'objet que l'on étudie. Hélas, il semble impossible de filmer ou de photographier un trou noir, puisqu'il ne laisse échapper aucune matière, aucun rayon lumineux. Le trou noir est *a priori* parfaitement invisible. Cependant, il n'est pas nécessaire qu'un objet émette de la lumière pour qu'on puisse le distinguer ; on peut aussi l'éclairer, de manière à ce qu'il renvoie la lumière qu'il reçoit. Dans le domaine astronomique, les planètes, dont le cœur n'est pas alimenté en énergie thermonucléaire, resteraient invisibles si leur surface ne réfléchissait pas la lumière du Soleil.

Ce qui est vrai pour une planète l'est aussi pour un trou noir. On ne verra certainement rien en l'absence de toute source d'éclairage, mais un trou noir convenablement éclairé est capable de renvoyer une image grâce aux trajets particuliers suivis par la lumière émise dans son voisinage. Ainsi photographiés sous les feux des projecteurs, les trous noirs, qui ne sont pas des trous mais des régions de l'espace-temps aux propriétés physiques spécifiques, ne sont pas non plus vraiment noirs. En ce sens, l'ancienne désignation d'« astres occlus » (astre comme objet stellaire, occlus signifiant refermé sur lui-même) donnait une meilleure description de ces objets.

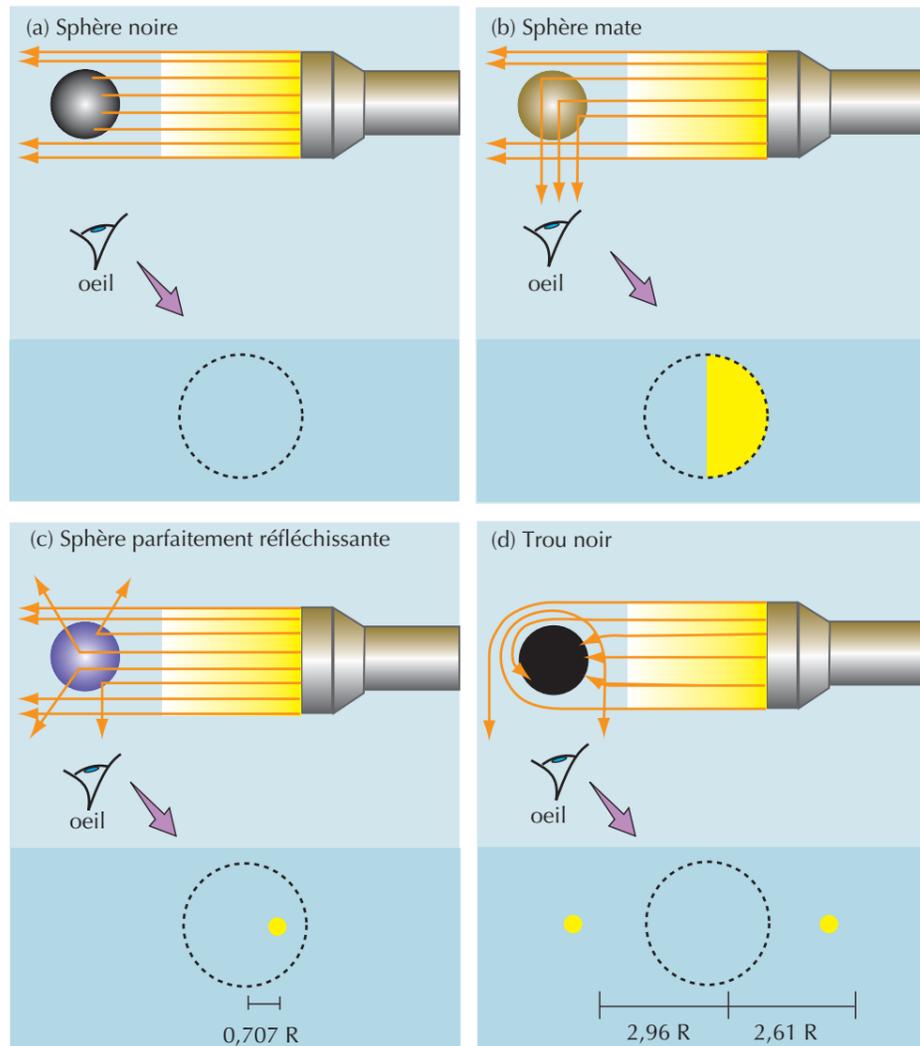


La visualisation d'un corps sphérique dépend de sa nature. Dans le cas d'un corps parfaitement noir, comme une sphère peinte (a), tous les rayons lumineux sont absorbés. Puisque aucun rayon n'est réfléchi, l'observateur ne voit rien de la sphère éclairée. Dans le cas d'une surface mate, comme la Lune ou les planètes (b), la lumière est réfléchie avec la même intensité dans toutes les directions. Par conséquent, en chaque point de la surface, un rayon lumineux et un seul est dévié

Une question d'éclairage

Chaque corps naturel absorbe et réfléchit à sa façon le rayonnement électromagnétique. L'expérience de pensée illustrée sur la figure ci-après consiste à éclairer d'un faisceau de rayons parallèles diverses espèces de corps sphériques, et à observer la lumière réfléchie dans une direction perpendiculaire. L'aspect de l'image reçue révèle la façon dont les corps, selon leur nature, réagissent aux ondes électromagnétiques.

On s'aperçoit que, parmi les diverses espèces de corps qui ne sont pas brillants par eux-mêmes, le trou noir n'est pas le plus sombre. Il renvoie même mieux l'éclairage qu'une sphère peinte en noir et qu'une sphère parfaitement réfléchissante !



Une variante de l'expérience précédente consiste à éclairer le trou noir par des rayons parallèles et à observer la lumière réfléchie non plus à angle droit, mais dans la même direction. Ce « retour de lumière » est montré sur la figure de la page 280. L'image du trou noir proprement dit est agrandie, son diamètre apparent étant $3\sqrt{3}/2 \approx 2.6$ fois plus grand que son diamètre réel. Cela vient du fait qu'une bonne partie du faisceau incident est capturée par le trou noir: non seulement les rayons interceptant directement l'horizon des événements, mais également ceux passant à moins de 5,2M du centre (le rayon propre du trou noir étant égal à 2M). D'autre part, le disque noir est entouré d'une auréole lumineuse constituée d'anneaux concentriques. L'anneau extérieur, à 5,34M du centre, est dessiné par les rayons ayant accompli un demi-tour, les anneaux plus internes par les rayons ayant accompli des demi-tours supplémentaires. L'image évoque l'effet de gloire bien connu en optique traditionnelle: lorsque la lumière solaire est diffusée par les innombrables gouttelettes d'eau du brouillard, il est parfois possible d'apercevoir en réflexion l'ombre de sa propre tête, entourée d'anneaux brillants centrés sur la ligne de visée.

Dans le cas du trou noir glorieux, seul l'anneau extérieur serait visible, la résolution n'étant pas suffisante pour distinguer les retours de lumière d'ordre plus élevé.

Optique dans l'espace-temps courbe

Quelle est la justification de cette surprenante « optique géométrique » du trou noir? Cette optique considère la courbure des rayons lumineux comme une caractéristique fondamentale de la théorie de la relativité générale, selon laquelle la propagation desdits rayons dépend des champs de gravitation. L'Univers se décrit comme un espace-temps à quatre dimensions, sorte de tissu souple et élastique déformé par la gravitation, c'est-à-dire par les corps massifs qu'il contient. Formant la trame de ce tissu, les trajets de la lumière sont comme des fils jetés sur les abîmes. Tout comme la matière, l'énergie engendre un champ gravitationnel (puisque elles sont équivalentes, liées par la formule $E = mc^2$); réciproquement, matière et énergie subissent les effets de la gravitation. Notamment, les particules sans masse mais en mouvement, tels les corpuscules de lumière nommés photons, possèdent une énergie: leurs trajectoires sont donc modifiées par la gravitation. Ainsi, les rayons lumineux suivent des trajectoires d'autant plus incurvées que le champ gravitationnel qu'ils traversent est intense. Dans une excellente approximation, qui revient à négliger l'influence du champ gravitationnel propre du photon devant celui du trou noir, la lumière émise par chaque photon suit une trajectoire géodésique, c'est-à-dire la ligne de plus court trajet entre deux points. Les géodésiques sont des lignes droites dans l'espace-temps plat et elles épousent la forme d'un espace-temps courbe.

d'exactly 90 degrés en direction de l'observateur: celui-ci voit l'image familière de la demi-lune.

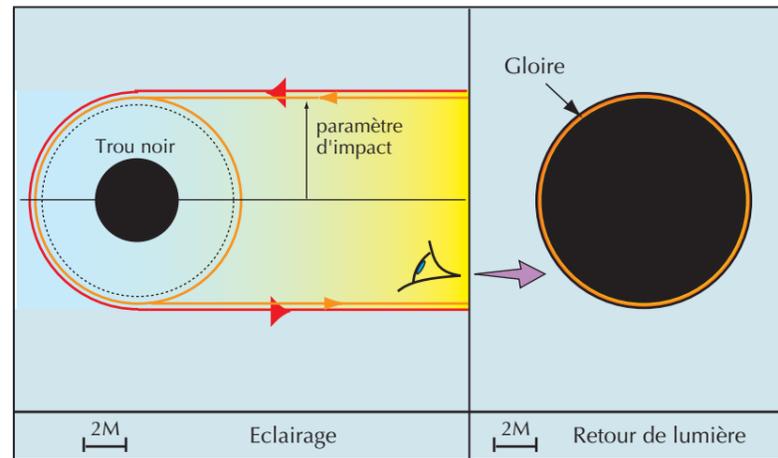
Sur une sphère métallique parfaitement réfléchissante (c), un seul point de la surface dévie un rayon incident de 90 degrés et le renvoie en direction de l'observateur: l'image de la sphère se réduit donc à un point lumineux unique, situé à $\sqrt{2} \approx 0.707$ fois le rayon de la sphère.

Par rapport aux corps précédents, le trou noir (d) n'a pas de surface tangible sur laquelle les rayons puissent frapper et se réfléchir. C'est son champ gravitationnel qui dévie les rayons lumineux. La sphère d'influence du trou noir ne se réduit pas à sa seule surface – l'horizon des événements – mais s'étend jusqu'à l'infini.

En conséquence, les rayons lumineux ne sont plus des lignes droites brisées au point d'impact avec la surface, mais des lignes d'autant plus courbées qu'elles passent près de la surface. L'image du trou noir est donc constituée d'une suite infinie de points lumineux.

L'un d'entre eux, situé à gauche à 2,96 fois le rayon du trou noir, appelé « image primaire », est formé par l'unique rayon lumineux dévié de 90 degrés. L'autre, à droite, ou image secondaire, situé à 2,61 fois le rayon du trou noir, provient du rayon lumineux qui a tourné d'un demi-tour supplémentaire, c'est-à-dire de 270 degrés. Le calcul complet des trajectoires des rayons lumineux dans l'espace-temps de Schwarzschild qui entoure le trou noir montre qu'il existe une infinité de points lumineux, correspondant aux rayons déviés de tous les demi-tours supplémentaires; en pratique, ces images d'ordre supérieur sont tellement proches des images primaire et secondaire qu'elles ne peuvent pas être résolues.

La gloire d'un trou noir nu.
On éclaire un trou noir nu d'un faisceau de rayons lumineux parallèles et on observe le retour de lumière. Le trou noir semble 2,6 fois plus gros, et il est nimbé d'une auréole constituée d'une infinité d'images en forme d'anneaux concentriques.



Le champ gravitationnel d'un trou noir courbe fortement l'espace-temps dans son voisinage. À partir d'une certaine distance de son centre, qui définit l'horizon des événements, aucune particule (massive ou non) ne peut échapper à son emprise. À l'extérieur de l'horizon des événements (qui est la surface du trou noir proprement dite), les rayons lumineux peuvent s'échapper, mais l'importante courbure de l'espace-temps modifie considérablement leur trajectoire.

On peut faire confiance aux équations de la relativité générale pour calculer la propagation des rayons lumineux au voisinage des trous noirs. Le calcul nécessite une analyse mathématique préalable, suivie d'une intégration numérique par l'ordinateur. C'est par cette méthode que l'on peut obtenir les images d'un trou noir éclairé par des sources de n'importe quelle nature et distribuées de n'importe quelle façon.

Pile et face

Un tel calcul de la trajectoire des rayons lumineux autour d'un trou noir suppose une bonne connaissance de la nature de la source lumineuse. Si les trous noirs existent réellement dans la nature, ils ont de bonnes chances d'être éclairés par des sources extérieures de lumière. Pour un trou noir tout comme pour une planète, la source d'éclairage la plus évidente est une étoile. Cette étoile peut par exemple être accouplée au trou noir dans un système binaire. Toutefois, malgré la profusion de telles associations dans la Galaxie, les trous noirs correspondants seraient impossibles à détecter : l'image de l'étoile compagne réfléchi par le trou noir serait noyée dans son image directe, beaucoup plus intense.

Une situation plus intéressante est celle où la source d'éclairage est une série d'anneaux matériels en orbite autour du trou noir. Je développerai

dans la dernière partie de ce livre les raisons pour lesquelles on pense que de nombreux trous noirs sont entourés de telles structures, nommées *disques d'accrétion*. Les anneaux de la planète Saturne sont un exemple célèbre de disque d'accrétion ; ils sont constitués d'un amalgame de cailloux et de glace qui réfléchit la lumière du Soleil lointain. En revanche, dans le cas d'un trou noir, les anneaux d'accrétion se composent d'un gaz chaud qui rayonne lui-même. Ce gaz tombe peu à peu en spirale dans le trou noir, de façon analogue au mouvement de l'eau entraînée dans un tourbillon. Sa chute s'accompagne d'une élévation de sa température et d'une émission de rayonnement. Voilà donc une bonne source d'éclairage : les anneaux d'accrétion brillent et illuminent le trou noir central. On peut alors s'interroger : quelle est l'image apparente du disque d'accrétion autour d'un trou noir ?

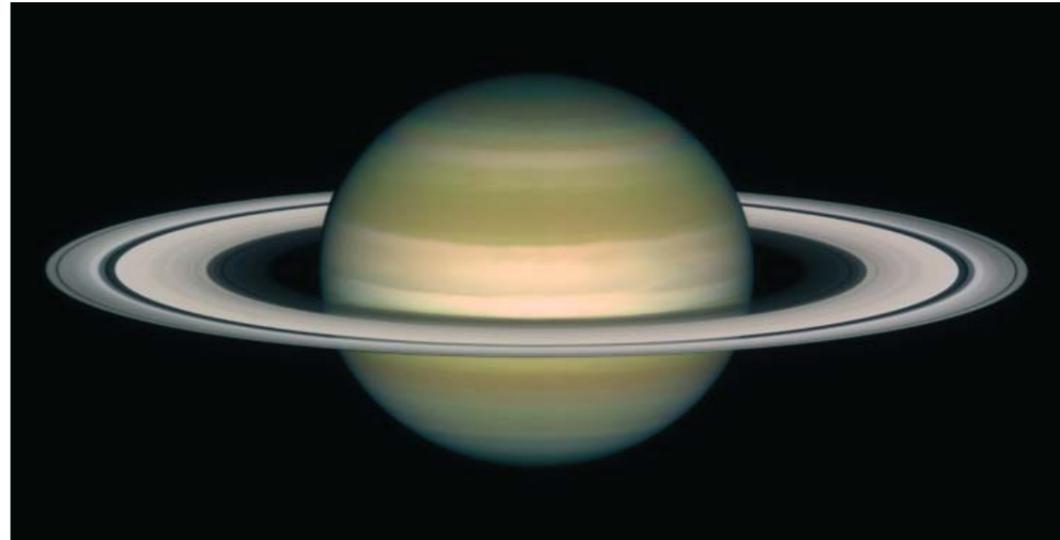
C'est exactement la question que je me suis posée en 1978, et que j'ai été le premier à résoudre dans un article publié un an plus tard dans la revue européenne *Astronomy and Astrophysics*. Pour l'anecdote, les spécialistes anglo-saxons qui ont découvert cette première image d'un trou noir entouré d'un disque lumineux ont cru que le mystérieux signataire de l'article avait pris le pseudonyme de Luminet !

Revenons à l'image familière de la planète Saturne. Les champs de gravitation dans le système solaire sont si faibles que l'espace-temps correspondant est pratiquement sans courbure : c'est l'espace-temps de Poincaré-Minkowski (voir chap. 2). Dans cette solution, les rayons lumineux se propagent en ligne droite, et l'optique géométrique qui les décrit est l'optique habituelle : pour un astronome lointain qui observe Saturne selon une direction inclinée par rapport au plan des anneaux, les anneaux circulaires entourant Saturne ont la forme d'ellipses ; en outre, si cette inclinaison n'est pas trop grande, la partie arrière de l'anneau est cachée par le disque de Saturne.

La figure de la page 283 montre schématiquement les contours d'un disque circulaire entourant non plus une planète, mais un trou noir sphérique. L'image est prise à grande distance, dans une direction légèrement inclinée au-dessus du plan du disque. La forte courbure de l'espace-temps autour du trou noir se manifeste par une distorsion importante de l'image du disque. Celle-ci ne se réduit plus à un ensemble d'ellipses, mais se décompose en deux. L'image primaire est formée des rayons lumineux émis par le dessus du disque, et qui sont déviés de moins de 180° . Une première constatation surprend : la *totalité* du dessus des anneaux est visible, y compris la portion qui serait « normalement » cachée dans une géométrie sans courbure ; ceci s'explique par un « relèvement » des trajectoires lumineuses dans le champ de gravitation du trou noir. L'étonnement grandit lorsqu'on reconnaît aussi, simultanément, le *dessous* des anneaux : c'est l'image secondaire. Le disque d'accrétion du trou noir peut être vu côté pile et côté face !

En théorie, outre les images primaire et secondaire, une infinité d'images sont créées par les rayons lumineux qu'émet le disque, puisque ceux-ci peuvent s'enrouler un nombre arbitraire de fois autour du trou noir avant d'échapper à son champ gravitationnel et parvenir à un astronome

La planète Saturne et ses anneaux. On considère que le disque d'accrétion d'un trou noir, bien que constitué de gaz, a une forme similaire, c'est-à-dire des anneaux circulaires et une faible épaisseur.

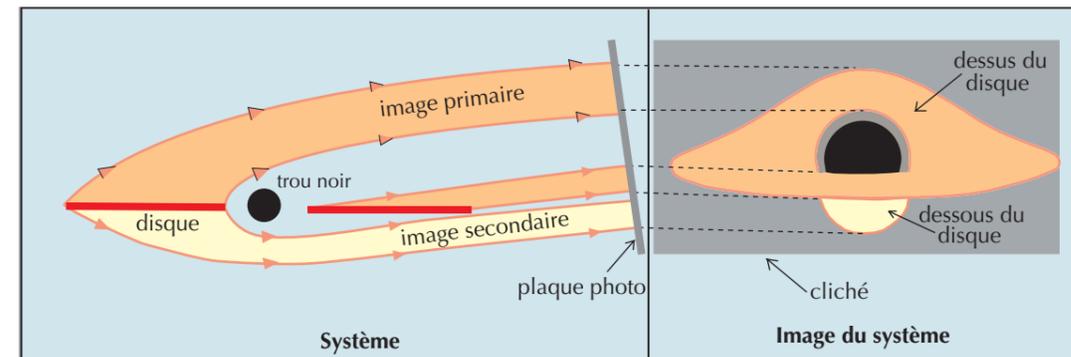


extérieur. En pratique, ainsi que nous l'avons décrit dans la deuxième expérience de pensée, les images d'ordre supérieur à deux seraient indiscernables: elles s'agglutinent contre le rond noir central, qui est l'image agrandie du trou noir proprement dit.

Le trou noir photographié

Ne nous étonnons pas que l'on amène si lentement à la lumière ce qui est caché si profondément.
Sénèque

Ces expériences d'illumination, bien qu'idéalisées, ont au moins le mérite de montrer qu'un trou noir, par l'intermédiaire de son champ gravitationnel, agit sur le rayonnement comme une lentille multipliant les images d'une source unique. Pour calculer les images les plus réalistes possible d'un trou noir éclairé par un disque d'accrétion, il faut non seulement calculer la propagation des rayons lumineux dans l'espace-temps courbe, mais aussi connaître les propriétés physiques du disque d'accrétion. Les anneaux de matière en orbite autour de corps célestes ont été très étudiés au cours des trente dernières années, car ils s'appliquent à un grand nombre de phénomènes astronomiques: les planètes solaires (Saturne, Jupiter, Uranus), mais aussi les disques protoplanétaires et les systèmes d'étoiles doubles dont l'un des partenaires est un astre condensé (naine



blanche, étoile à neutrons ou trou noir). Ce dernier aspire par son champ gravitationnel intense le trop-plein de gaz de son compagnon, le stocke dans un disque d'accrétion et le consomme progressivement.

Les modèles de disques d'accrétion tentent de reproduire dans le détail les caractéristiques du rayonnement de haute énergie émis par certains systèmes d'étoiles doubles, comme Cygnus X-1. À beaucoup plus grande échelle, la prodigieuse luminosité de certains noyaux de galaxies et des quasars peut aussi s'expliquer par la chute de matière sur un trou noir géant de plusieurs millions, voire plusieurs milliards de masses solaires. Une discussion détaillée du rôle des trous noirs dans ces divers phénomènes astronomiques fera l'objet de la quatrième partie de ce livre.

On pense que, dans de nombreuses situations, la masse du disque d'accrétion est négligeable devant celle du trou noir: chaque particule composant le disque est donc en chute libre dans le champ gravitationnel engendré par le trou noir. Considérons le cas simple d'un disque où chaque particule suit une trajectoire circulaire dans le plan de symétrie du trou noir. La vitesse de cette particule dépend de la distance qui la sépare de son centre attractif: comme deux éléments voisins ne se déplacent pas à la même vitesse, ils interagissent et engendrent une viscosité qui chauffe le disque. Ainsi, ce dernier est d'autant plus chaud et d'autant plus lumineux qu'il est proche du trou noir.

Par ailleurs, le trou noir a un diamètre très petit comparé à celui d'une étoile de même masse. En conséquence, le gaz du disque gravite dans des zones de très fort champ gravitationnel et atteint des températures particulièrement élevées.

Lorsque le débit de matière avalée par le trou noir est faible, on montre que le disque est très mince. Dans cette approximation, sa luminosité propre, obtenue en intégrant les luminosités des particules individuelles qui le constituent, suit une loi énoncée par Don Page et Kip Thorne: l'intensité du rayonnement émis en un point donné du disque ne dépend que de sa température, celle-ci ne dépendant que de sa distance au trou noir.

Distorsions optiques au voisinage d'un trou noir.

Le trou noir est entouré d'un disque brillant dont on a représenté la tranche. On observe l'ensemble à grande distance, dans une direction de 10 degrés par rapport au plan du disque. Les rayons lumineux sont reçus sur une plaque photographique. À cause de la courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir, l'image du système est très différente des ellipses que l'on observerait si un astre ordinaire se trouvait à la place du trou noir. La lumière émise par le dessus du disque forme l'image directe et présente une distorsion notable qui permet d'en voir la totalité. Le dessous du disque est également visible sous forme d'une image indirecte, engendrée par des rayons lumineux fortement infléchis.

C'est en considérant ce type de rayonnement comme source d'éclairage du trou noir que j'ai pu calculer, en 1978, l'apparence « photographique » lointaine d'un trou noir sphérique entouré d'un disque gazeux mince (figure ci-dessous). L'image reconstituée est universelle, c'est-à-dire indépendante de la masse du trou noir et du débit de gaz avalé. Elle peut aussi bien représenter un trou noir de 10 kilomètres de rayon attirant le gaz d'une étoile proche qu'un trou noir gros comme le système solaire aspirant le gaz interstellaire (dans d'autres situations, le disque d'accrétion peut être épais et massif, avoir la forme d'un tore, etc.).

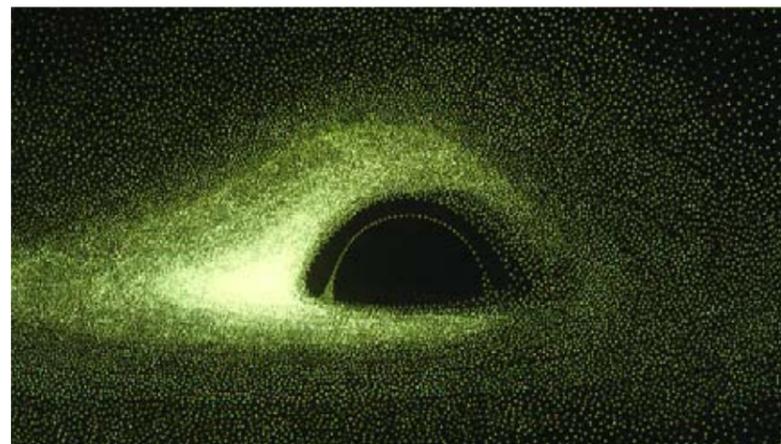
Aucun rayonnement ne provient de la région qui s'intercale entre le trou noir et le bord interne du disque, sinon celui du « fond de ciel » qu'engendrent d'éventuelles étoiles situées à l'arrière-plan. Pourquoi cela ? Parce que les propriétés de l'espace-temps de Schwarzschild interdisent à un disque d'accrétion mince de toucher l'horizon du trou noir : les orbites circulaires suivies par les particules se maintiennent jusqu'à une distance critique égale à trois fois le rayon du trou noir (6M dans nos unités) ; en deçà, le disque est instable, et les particules plongent directement dans le trou noir ; il n'y a plus ni viscosité ni rotation différentielle, il n'y a donc plus de rayonnement émis.

Comme dans la figure précédente, le dessus du disque est entièrement visible. Toutefois, seule une petite partie du dessous est observable. En effet, dans une situation réaliste, le disque gazeux est opaque, donc il absorbe les rayons lumineux qu'il intercepte. Il s'ensuit que la majeure partie de l'image secondaire – montrant le dessous du disque – est occultée par l'image primaire, la partie visible, très déformée, étant collée contre la frontière du trou noir.

La caractéristique principale de la « photographie » du trou noir est la différence de luminosité apparente entre les différentes régions du disque : la brillance est maximale dans les zones les plus proches de l'horizon, car c'est là que le gaz est le plus chaud. Toutefois, la luminosité reçue (enre-

Apparence lointaine d'un trou noir sphérique entouré d'un disque d'accrétion.

C'est la première « photographie » virtuelle d'un trou noir, que j'ai calculée en 1978 sur ordinateur. Comme dans le schéma précédent, le système est vu de très loin dans une direction inclinée de 10 degrés au-dessus du plan du disque. L'image, bien qu'en noir et blanc, tient compte des propriétés physiques du disque gazeux.



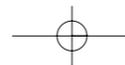
gistrée par exemple par des capteurs embarqués sur satellite) diffère nettement de la luminosité propre du disque (telle qu'elle serait perçue par un observateur tournant avec les particules du disque).

La différence entre les points de vue (observateur éloigné ou proche) provient des effets de la gravitation sur la propagation des rayons lumineux. La combinaison de deux effets décale la fréquence et l'intensité du rayonnement reçu par rapport à celles du rayonnement émis. *Primo*, le champ gravitationnel affaiblit l'intensité du rayonnement (il piège un plus grand nombre de photons) et en diminue la fréquence (il ralentit les horloges) : c'est l'effet Einstein, déjà expliqué au chapitre 3. Il n'est sensible qu'au voisinage immédiat du trou noir et ne dépend pas de la position de l'observateur. *Secondo*, le mouvement de la particule de gaz change la fréquence de la lumière : c'est l'effet Doppler. Lorsque la source et le récepteur s'éloignent, l'effet Doppler diminue l'intensité et la fréquence du rayonnement, donc le décalage vers le rouge ; lorsqu'ils se rapprochent, l'intensité et la fréquence augmentent et le décalage s'effectue « vers le bleu » (voir aussi chap.19).

L'effet Doppler dû au mouvement de la source est de loin le plus important. Ici, il est induit par la rotation du disque autour du trou noir. Les régions les plus proches de celui-ci tournent à une vitesse approchant celle de la lumière, de sorte que le décalage Doppler est considérable. Le sens de rotation du disque est tel que la matière s'éloigne de l'observateur dans la partie droite de la photographie et s'en rapproche dans la partie gauche. Lorsque la matière fuit, le ralentissement Doppler s'ajoute au ralentissement gravitationnel, ce qui explique le très fort affaiblissement de l'image dans la moitié droite du cliché. En revanche, dans la moitié gauche, les deux effets tendent à s'annuler, ce qui permet à l'image de garder à peu près son intensité propre.

Vol dans un trou noir

Ce travail de visualisation numérique des trous noirs a été repris et développé par de nombreux chercheurs, qui ont en outre bénéficié de l'amélioration rapide des performances informatiques. Des couleurs ont été ajoutées aux images (selon un codage particulier dicté par les variations de température) et des fonds de ciel, de façon à rendre les images le plus réaliste possible. En outre, l'observateur n'est plus supposé stationnaire et à grande distance du trou noir, mais en mouvement par rapport à lui. Ceci introduit une nouvelle distorsion des images due à l'effet Doppler induit par le mouvement de l'observateur lui-même. Si ce dernier plonge dans le trou noir, sa vitesse approche celle de la lumière et les distorsions correspondantes deviennent considérables. Enfin, le trou noir n'est plus nécessairement supposé sphérique, mais peut être animé d'un mouvement de rotation, comme dans la solution de Kerr, ce qui introduit une dissymétrie supplémentaire.



Chimères

*En cherchant l'œil de Dieu,
je n'ai vu qu'un orbite
Vaste, noir et sans fond,
d'où la nuit qui l'habite
Rayonne sur le monde et
s'épaissit toujours;*

*Un arc-en-ciel étrange entoure
ce puits sombre,
Seuil de l'ancien chaos dont le
néant est l'ombre,
Spirale engloutissant les Mondes
et les Jours!*

Nulle légende ne saurait mieux
convenir à l'image « virtuelle »
d'un trou noir entouré d'un
disque de gaz que ces strophes
de Gérard de Nerval, extraites du
recueil *Les Chimères* (1854).
L'œil noir, c'est le trou lui-même.
Le rayonnement qui l'entoure est
celui du gaz, aspiré en un mou-

vement de spirale, comprimé par
la gravité et chauffé à d'incroyables
températures. Quant à l'arc-en-
ciel étrange qui entoure finement
le puits sombre, c'est l'image
distordue de l'autre côté du
disque gazeux, rendu visible par
la forte courbure de l'espace-
temps engendrée par le trou noir.
Cette image du soleil noir,
Nerval semble l'avoir empruntée
à un autre romantique, Jean-Paul
Richter. Dans son vaste poème
cosmique *Rêve de l'univers*
(1820), ce dernier écrit : « Nous
passions à travers les royaumes
terrifiants des mondes en forma-
tion... où un corps solaire
obscur, infini, de plomb,
engloutissait des flammes et des
soleils, sans en devenir plus
lumineux. »
L'expérience intime de Victor

Hugo diffère de celle de Nerval.
Ce n'est pas un dépressif, mais
un conquérant. Pourtant, son
enfer, ce sont encore les soleils
noirs. Hugo est le meilleur inter-
prète de la chute dans l'abîme,
l'un des cauchemars les plus
naturels de l'homme. Sans se
lasser, il évoque dans plusieurs
textes ces mondes obscurs, qui
ne peuvent être que des mondes
punis, des « lazarets de l'infini ».
Un poète moins connu, Léon
Dierx, a retrouvé la fascination
nervalienne pour le gouffre, dans
un texte de 1889 qui, là encore,
évoque irrésistiblement le puits
inexorable et mystérieux d'un
trou noir paré d'un halo de
lumière : « Il est des gouffres noirs
dont les bords sont charmants. »

Parmi les nombreuses visualisations effectuées un peu partout dans le monde, et dont certaines sont visibles sur Internet, celles réalisées au début des années 1990 par mon collaborateur Jean-Alain Marck, à l'observatoire de Paris-Meudon, sont de loin les plus remarquables. La série d'images virtuelles qu'il a calculées permet de suivre pas à pas le spectacle qui se dessine dans le hublot d'un vaisseau spatial en chute libre vers le trou noir, selon différentes trajectoires, les unes frôlant l'horizon des événements le long d'orbites paraboliques, à la façon des comètes rasant le Soleil, les autres plongeant directement dans le trou noir et achevant leur course dans la singularité centrale. Le spectateur suit l'étonnant film des déformations optiques progressives engendrées par le trou noir, révélatrices des distorsions que celui-ci imprime au tissu élastique de l'espace-temps. Au vu de ces images, il peut légitimement se poser la question : avec les trous noirs, sommes-nous dans le virtuel ou dans le réel ? Sont-ils de fascinants objets issus de la spéculation pure, ou correspondent-ils à une réalité physique ? La quatrième partie de ce livre développe de forts arguments en faveur de leur existence réelle.

Pour l'heure, poursuivons notre exploration virtuelle. Un voyageur cosmique a repéré un gros trou noir au loin par le hublot de son vaisseau spatial. Fasciné par le spectacle, il décide de plonger dans sa direction et de s'engouffrer à l'intérieur, sachant toutefois qu'il ne pourra plus en ressortir. Il oriente son vaisseau en direction du trou noir, coupe les moteurs de

façon à tomber en chute libre et photographie ce qu'il voit par le hublot avant, dans la direction de son mouvement. La série de clichés présentés page 288 sont les instantanés pris par notre intrépide explorateur à différentes étapes du plongeon. Les images sont calculées aux positions 1 à 8 de la trajectoire plongeante schématisée sur la figure suivante. La dernière image est prise *de l'intérieur du trou noir*, le photographe ayant pivoté de 180 degrés pour regarder par le hublot arrière et voir une dernière fois les images démultipliées et déformées du disque d'accrétion. Contrairement à une opinion courante, il ne fait pas noir à l'intérieur d'un trou noir, puisque les rayons lumineux y pénètrent.

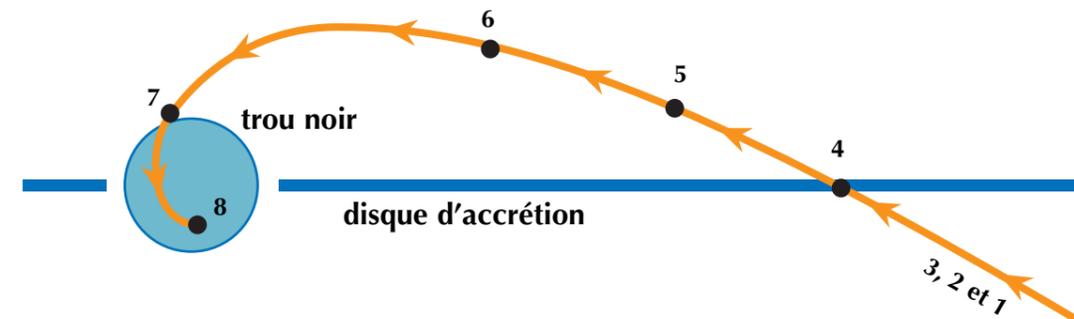
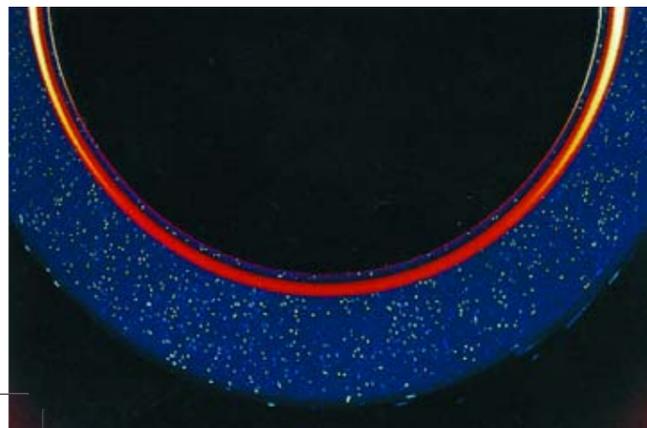
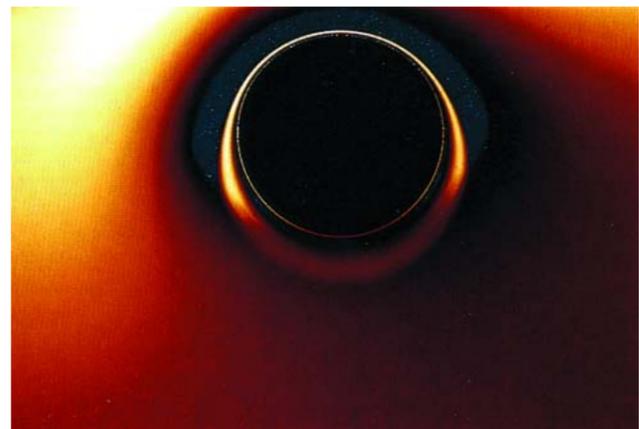
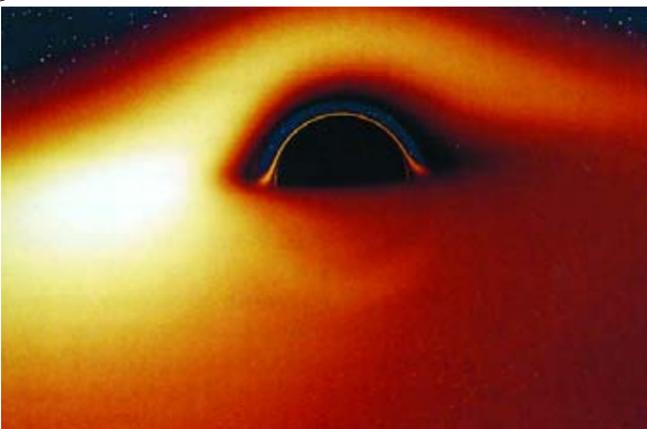
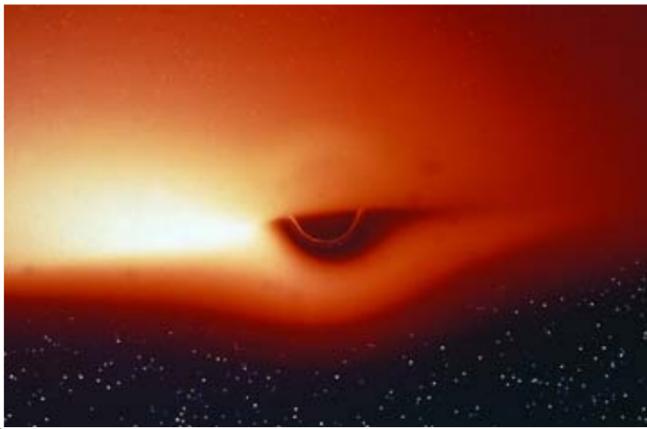
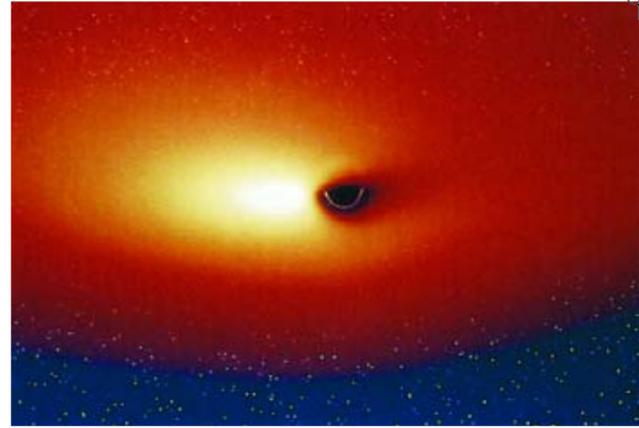
Insistons sur le fait que ces photographies virtuelles sont calculées point par point dans le cadre de la relativité générale ; il ne s'agit nullement d'une « vue d'artiste », mais d'une intégration numérique reproduisant de la façon la plus exacte possible ce qu'observerait un voyageur s'aventurant dans les parages d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion mince. Il utilise un appareil photographique muni des filtres nécessaires pour convertir en rayonnement optique le rayonnement électromagnétique émis (dans le domaine gamma, X ou ultraviolet selon la masse du trou noir considéré).

La coloration (arbitraire) des images transcrit la luminosité apparente de l'objet. Les parties les plus lumineuses et les plus chaudes sont colorées en jaune, les parties plus froides en rouge. La dissymétrie des images est due à l'effet Doppler : les parties les plus lumineuses sont celles où les particules du disque, en rotation circulaire autour du trou noir, se rapprochent de l'observateur. La transparence du disque a été exagérée pour montrer les images indirectes au travers de l'image directe, ainsi que quelques étoiles de fond.

L'observateur ne peut recevoir que les photons qui se dirigent vers lui. La direction que prennent ceux-ci après leur passage à proximité du trou noir dépend d'un paramètre nommé « paramètre d'impact », qui mesure l'écart entre la direction du photon à l'infini et la direction du centre attractif (voir fig. p280).

Certains rayons lumineux émis par les particules composant le disque ont un paramètre d'impact suffisamment faible pour être fortement déviés de la ligne droite, et suffisamment important pour ne pas être piégés à l'intérieur de l'horizon des événements. Certains de ces photons, dirigés initialement dans une direction proche de celle du centre attractif, finissent leur course dans la direction du point émetteur. Ce cheminement particulier des rayons lumineux permet de visualiser le trou noir comme si la lumière était réfléchiée par un objet.

C'est pourquoi l'observateur aperçoit en même temps, à différents endroits du ciel, plusieurs images du même point, de même qu'il lui est possible de voir des parties du disque qui lui seraient normalement cachées – c'est-à-dire en l'absence de champ gravitationnel ou en ignorant la relativité générale. Certains rayons lumineux font plusieurs fois le tour du trou noir avant d'atteindre l'œil de l'observateur. Aux abords immédiats du trou



noir, ces rayons fournissent donc non seulement des images primaire et secondaire du disque, mais aussi une image tertiaire, etc.

Des lentilles gravitationnelles

Le fond de ciel étoilé de ces images, qui se distingue d'une part en transparence derrière le disque, d'autre part dans la partie si proche de l'horizon que le disque n'existe plus, a également été calculé. On y voit notamment des arcs gravitationnels, images déformées des étoiles qui sont alignées sur l'axe de visée observateur-trou noir. C'est dans le cliché pris en position 8 qu'ils sont le plus apparents.

Einstein a prédit de tels effets dans les années 1930 comme conséquence naturelle de la courbure de l'espace-temps. Le corps intermédiaire responsable de ces effets joue un rôle analogue à celui d'une lentille en optique traditionnelle, qui déforme les images des sources situées à l'arrière-plan; on le nomme « lentille gravitationnelle ».

Supposons que la Terre, un trou noir et un astre lointain soient fortuitement alignés. Selon les lois de la relativité générale, la courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir permet à la lumière émise par l'astre situé à l'arrière-plan d'emprunter plusieurs trajets possibles pour parvenir à la Terre. Dans des conditions idéales (alignement exact et corps sphériques), les télescopes devraient capter une infinité d'images issues de la même source, toutes rassemblées en un anneau circulaire parfait, appelé « anneau d'Einstein ». Dans des conditions plus réalistes, les images sont démultipliées un nombre fini de fois; elles ne constituent plus un anneau parfait, mais des morceaux d'anneau appelés « arcs », ou d'autres configurations moins symétriques. Cette multiplication et cette distorsion des images apparentes par rapport à la source réelle produisent ce que l'on nomme un *mirage gravitationnel*.

Le mirage traditionnel, parfois observé dans le désert, est produit par des couches d'air empilées auxquelles la conduction de la chaleur du sable confère des indices de réfraction différents. Les rayons lumineux réfléchis

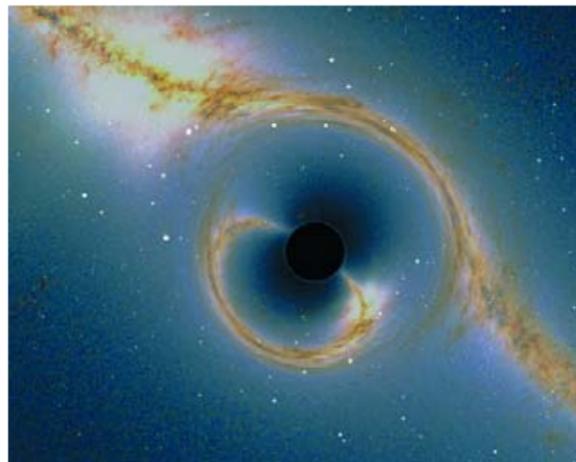
Le plongeur d'un astronaute intrépide dans un trou noir.

Le voyageur suit la trajectoire ci-dessus. Au départ, il est situé sous le plan du disque, à $1200 M$ du centre attractif. L'unité de distance utilisée, M , est proportionnelle à la masse du trou noir. Dans le cas d'un trou noir d'un million de masses solaires, M vaut 1,5 million de kilomètres; le rayon du trou noir vaut $2 M$. L'observateur traverse le disque d'accrétion à $39 M$ (4). Il est très près de l'horizon au point 7 et, finalement, prend son dernier cliché (8) à l'intérieur du trou noir, à $0,7 M$ du centre, en se retournant vers l'horizon.



Mirage gravitationnel produit par un trou noir isolé sur un fond lointain d'étoiles. Sur l'image de gauche, on reconnaît notamment la constellation d'Orion, les brillantes étoiles Sirius et Capella,

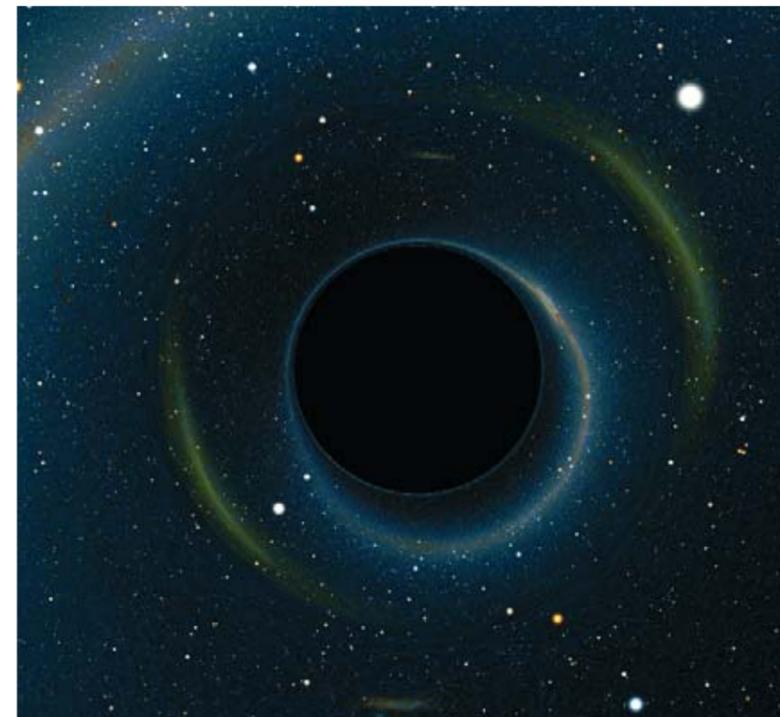
les gémeaux Castor et Pollux. Sur l'image de droite, on identifie encore certaines de ces constellations, mais déformées par la présence du trou noir sur la ligne de visée.



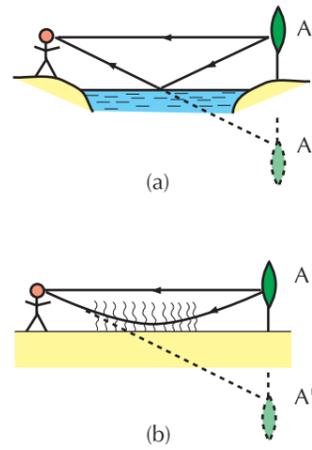
Mirage gravitationnel produit par un trou noir passant devant le centre de notre galaxie.

Vue de la Voie lactée (en haut) et des distorsions (en bas) qui seraient causées par un trou noir de Schwarzschild passant dans la ligne de visée d'un observateur, à 50 rayons de Schwarzschild de lui (par exemple

1500000 km pour un trou noir de 10000 masses solaires). Deux images du bulbe central sont clairement visibles: l'image principale en haut à droite, et l'image secondaire en dessous à gauche du trou noir. La zone circulaire où les distorsions sont les plus importantes forme un anneau d'Einstein.



Simulation numérique montrant le mirage gravitationnel qu'engendrerait un trou noir passant dans l'axe de visée du Grand et du Petit Nuage de Magellan, deux petites galaxies satellites de la nôtre. Les deux étoiles brillantes à gauche sont α et β du Centaure, suivies le long de la Voie lactée par la constellation de la Croix du Sud. Les étoiles sur la droite appartiennent aux constellations des Voiles, de la Carène et de la Poupe. L'étoile la plus brillante, au nord-est du Grand Nuage, est Canopus, l'autre étoile brillante en bas à droite est Achernar. L'augmentation de la taille du Grand Nuage due au mirage gravitationnel du trou noir est extrêmement spectaculaire. On peut aussi reconnaître les images secondaires de certaines étoiles brillantes. C'est facile pour α et β du Centaure grâce à leur alignement avec la Voie lactée (et donc l'alignement des images secondaires correspondantes). Cela devient plus difficile pour la Croix du Sud, considérablement déformée. On note aussi l'image quadruple de Canopus. À proximité de l'image secondaire de Canopus, plus proche de l'ombre, l'étoile brillante est l'image secondaire de Sirius, dont l'image primaire n'est pas visible sur l'écran (trop au nord-est). Juste au-dessus, légèrement à gauche, on devine aussi l'image secondaire d'Orion très déformée.

**Le principe des mirages.**

a) À cause de la réflexion de la lumière sur une surface aqueuse située entre l'observateur et l'objet A, deux rayons lumineux issus de A se rencontrent à nouveau: il y a dédoublement d'image.

b) Dans un mirage terrestre, les rayons lumineux issus de A sont réfractés et déviés en traversant les couches d'air surchauffées proches du sol. Il y a aussi multiplication d'images.

Formation d'un mirage gravitationnel lorsque la source lointaine (une étoile), la lentille gravitationnelle (le trou noir) et l'observateur forment un alignement presque parfait. Le trou noir dévie les rayons lumineux à la manière d'une lentille. Aussi l'observateur voit-il plusieurs images de la même étoile.

sur le sable suivent plusieurs chemins possibles avant d'atteindre le caravanier lointain: ces images fantômes abusent le voyageur, qui les interprète selon ses désirs comme une oasis, une ville ou une étendue d'eau.

Les mirages gravitationnels dus à la distorsion de l'espace cosmique sont évidemment beaucoup plus difficiles à déceler. Grâce à de grands télescopes, on en a pourtant repéré plusieurs dizaines, causés par des galaxies ou des amas de galaxies situés dans le champ (voir aussi chap. 10). Toutefois, ces mirages ne sont pas causés par des trous noirs géants, mais plus prosaïquement par des galaxies ou des amas de galaxies situées dans le champ. En effet, toute concentration de matière, effondrée en trou noir ou non, déforme à divers degrés la géométrie de l'espace-temps et peut jouer le rôle de lentille gravitationnelle.

Dans le cas du trou noir, il faut pour l'instant se contenter de visualiser le mirage gravitationnel qu'il provoquerait sur le fond lointain d'étoiles, de galaxies ou de quasars à l'aide de simulations numériques. De nombreux chercheurs se sont prêtés au jeu et ont créé des panoramas variés figurant les mirages créés par d'hypothétiques trous noirs passant dans la ligne de visée d'objets célestes classiques. Les vues les plus spectaculaires ont été obtenues récemment par Alain Riazuelo, de l'Institut d'astrophysique de Paris, qui a notamment calculé le mirage gravitationnel créé par un trou noir passant devant un fond d'étoiles, le disque de notre propre galaxie ou des galaxies extérieures.

Ainsi, toute notre perception de l'espace provient de l'analyse des trajectoires des rayons lumineux, qui épousent naturellement la forme incurvée de l'espace. À travers les images étonnantes créées par les trous noirs et les mirages gravitationnels, la lumière nous donne à voir l'impalpable, l'invisible...

