

de l'autre côté... En revanche, les particules microscopiques ont une probabilité infime, mais non nulle, d'y parvenir. Par exemple, sans cet effet tunnel quantique, la radioactivité alpha ne serait pas possible : une particule alpha (un noyau d'hélium) ne pourrait pas s'échapper d'un noyau d'uranium radioactif.

Le « rayonnement de Hawking » fuit hors du trou noir grâce à l'effet tunnel. Les particules échappent au champ gravitationnel intense de l'horizon non pas grâce à une vitesse élevée, mais en se frayant un chemin par effet tunnel. La particule prisonnière dans le trou noir peut passer de l'autre côté de l'horizon et prendre le large.

Le rayonnement est très faible : un trou noir de la masse du Soleil luit si faiblement que sa température n'est que de 60 nanokelvins. Jusque dans les années 1980, nous ne savions même pas comment obtenir quelque chose d'aussi froid en laboratoire. La température de ce trou noir est même plus faible que celle associée au rayonnement du fond diffus cosmologique, émis dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans, et qui est aujourd'hui de 2,7 kelvins environ.

Ainsi, aucune observation astrophysique n'a permis de mettre en évidence le rayonnement de Hawking émis par un trou noir, mais c'est une conséquence mathématique tellement convaincante de l'application de la mécanique quantique à l'espace-temps courbe que personne n'ose en douter.

Puisque les trous noirs libèrent de l'énergie, nous pouvons espérer la récupérer et l'exploiter. Mais le diable est dans les détails. Nous allons voir que quelle que soit la manière dont nous essayons d'extraire cette énergie, nous rencontrons des difficultés.

Une approche simple consisterait à simplement attendre. Le trou noir devrait lentement s'évaporer, émettant son énergie, photon après photon, dans l'Univers. Alors qu'il rayonne, le trou noir perd en masse, jusqu'à finalement disparaître. En ce sens, un trou noir est comparable à une tasse de café dont on ne peut pas toucher la surface, sous peine de démembrement gravitationnel. Il reste un moyen de consommer le café cataclysmique : attendre qu'il s'évapore et inhaler ses vapeurs.

Mais il y a un hic. S'il est simple d'attendre, cette méthode n'est pas très efficace. Pour s'évaporer totalement, un trou noir de masse solaire mettrait  $10^{57}$  fois l'âge actuel de l'Univers, une durée prodigieusement longue. En général, la durée de vie d'un trou noir est proportionnelle à sa masse au cube. Pas de quoi motiver nos descendants.

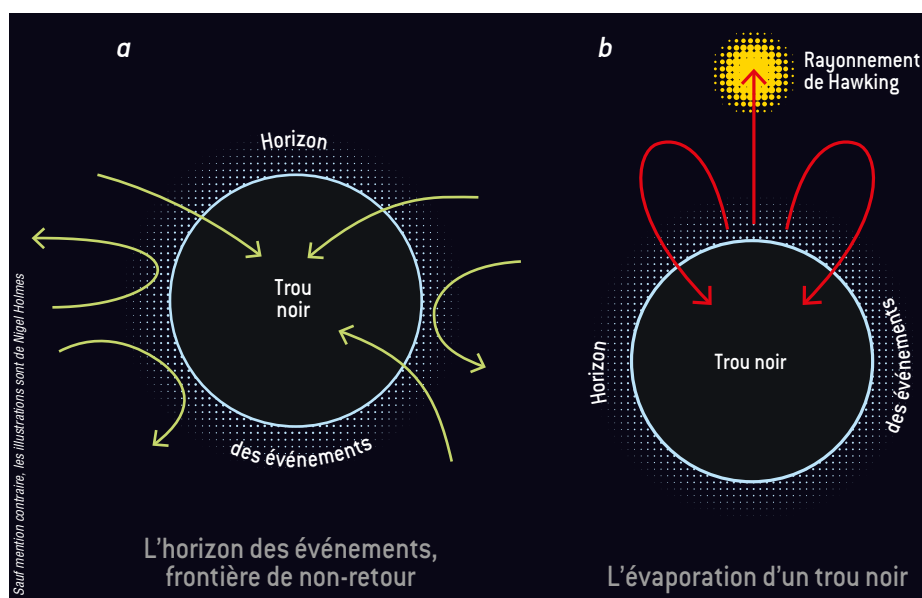
## Un réservoir de particules à exploiter

Cependant, il y a une raison d'être optimiste : toutes les particules de Hawking qui sortent de l'horizon des événements ne s'échappent pas à l'infini. En fait, très peu y parviennent, ce qui explique pourquoi le rayonnement est si faible (voir la figure b ci-dessous). Presque toutes les particules qui sortent par effet tunnel de l'horizon

laser juste à l'extérieur de l'horizon. Pour que la lumière s'échappe, il faut que vous le teniez bien vertical ; et plus vous êtes proches de l'horizon, plus il vous faudra viser avec précision la verticale. Le champ gravitationnel y est si intense que si vous déviez un peu de cette direction, le trajet de la lumière se courbera et retombera dans le trou noir.

Arrêtons-nous sur ce point. Pourquoi la direction non verticale précipite-t-elle le destin de la particule ? Si la trajectoire n'est pas exactement verticale, une partie du mouvement peut être considérée comme un mouvement de rotation autour du trou noir. Et c'est la vitesse de rotation qui nuit aux chances d'évasion de la particule.

Cela semble étrange. Après tout, c'est précisément la vitesse en orbite qui assure à la Station spatiale internationale de rester



des événements sont recapturées par le champ gravitationnel et récupérées par le trou noir. Si nous trouvons un moyen d'arracher ces photons à l'emprise du trou noir, à les secourir après leur évasion et avant leur recapture, alors nous pourrions recueillir plus rapidement l'énergie.

Afin de comprendre comment sauver ces photons, nous devons commencer par étudier les forces extrêmes à l'œuvre près d'un trou noir. La raison pour laquelle la plupart des particules sont recapturées est qu'elles ne sont pas émises exactement à la verticale. Imaginez que vous teniez un

en l'air : le mouvement de rotation crée une force centrifuge – similaire à ce qu'on ressent dans une voiture prenant un virage – qui contre l'attraction de la Terre et maintient la station à une altitude constante (voir la figure c ci-dessus). Mais si vous vous approchez trop près d'un trou noir, la situation s'inverse : la vitesse rotationnelle empêche la libération. Cet effet résulte de la théorie de la relativité générale, selon laquelle toute la masse et l'énergie sont soumises à la gravité – pas seulement la masse au repos d'un objet, mais aussi son énergie cinétique orbitale. La force centrifuge est

toujours présente, mais, à proximité d'un trou noir (plus précisément, à moins d'une fois et demie le rayon de l'horizon des événements), l'attraction gravitationnelle liée à l'énergie cinétique orbitale est plus forte que la répulsion centrifuge (voir la figure d ci-dessous). En deçà de ce rayon, une vitesse angulaire plus élevée fait tomber les particules plus vite dans le trou noir.

La conséquence qui nous intéresse ici est que juste au-dessus de l'horizon du trou noir beaucoup plus de particules sont présentes que ne le laisse penser le rayonnement de Hawking qui s'échappe vraiment de l'astre. Cette prolifération de particules énergétiques conduit à définir l'«atmosphère thermique» du trou noir: plus vous vous rapprochez de l'horizon des événements, plus il fait chaud. Cette chaleur est porteuse d'énergie.

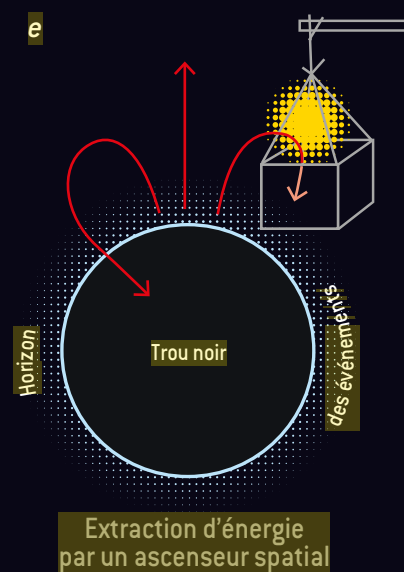
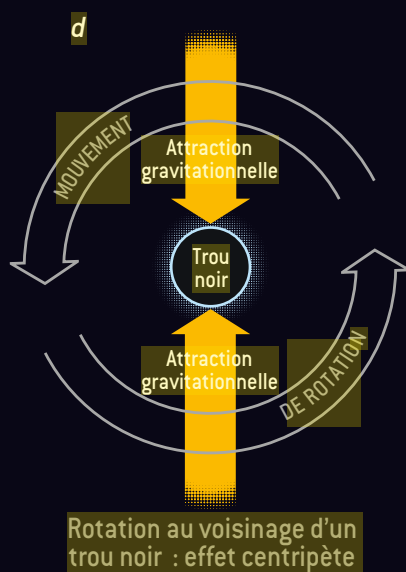
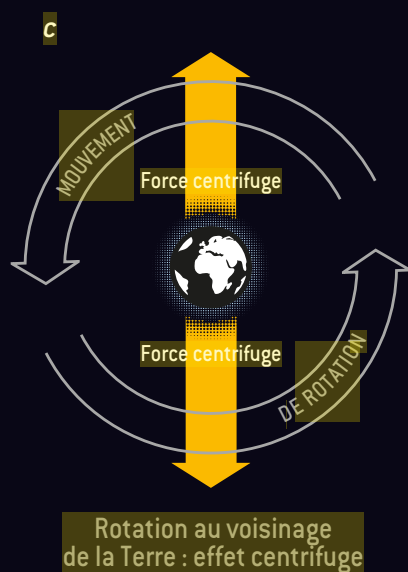
## L'AUTEUR



Adam BROWN est physicien théoricien à l'Université Stanford, aux États-Unis.

Cette stratégie revient à souffler sur votre café. Sans cette action, la majeure partie de la vapeur d'eau émise retombe dans la tasse, mais en soufflant à la surface, on éloigne la vapeur fraîchement échappée avant qu'elle n'ait été recapturée. L'idée est donc la suivante: en dépouillant un trou noir de son atmosphère thermique, on accélère son évaporation. Sa durée de vie ne sera plus proportionnelle à la masse au cube, mais simplement proportionnelle à la masse, ce qui est considérablement plus court.

Cependant, j'ai montré que cette idée est impossible à mettre en pratique. L'obstacle ne vient pas de hautes considérations sur la mécanique quantique ou la gravitation quantique. Il découle d'une considération des plus triviales: il n'existe pas de corde assez solide pour retenir la boîte et l'empêcher de tomber dans le trou noir. Afin



Le fait que de l'énergie soit stockée à l'extérieur de l'horizon des événements laisse espérer une possibilité de la récupérer. Reste à voir comment, concrètement, extraire cette énergie. L'idée consisterait à approcher une boîte près de l'horizon du trou noir, à la remplir de gaz chaud – les particules de Hawking – et à la ramener loin du trou noir (voir la figure e ci-dessus). Sans aide, une partie du contenu aurait pu réussir à s'échapper, formant le rayonnement de Hawking classique, mais la majeure partie du gaz, si nous n'étions pas intervenus, était destinée à retomber dedans.

d'exploiter l'atmosphère thermique, vous devez parvenir à faire pendre une corde près d'un trou noir, autrement dit, vous devez créer un ascenseur spatial. Mais, comme je l'ai démontré, construire un ascenseur spatial efficace près d'un trou noir est impossible. Pourquoi?

L'ascenseur spatial est une structure futuriste, rendue célèbre grâce à l'auteur de science-fiction Arthur Clarke dans son roman de 1979, *Les Fontaines du paradis*. Il imaginait une corde qui pend depuis l'espace jusqu'à la surface de la Terre. Cette corde est tenue non pas par la réaction du