

Est-il possible d'exploiter un trou noir ?

L'environnement immédiat d'un trou noir contient une importante quantité d'énergie. Mais pour en extraire, une civilisation future devra construire un ascenseur spatial qui défie les lois de la physique.

Adam Brown

Imaginons le pire scénario de science-fiction possible. Le Soleil s'est arrêté de briller, le combustible qui alimentait la fusion nucléaire s'étant épuisé. La Terre – si elle survit à la mort de l'étoile – est alors plongée dans un hiver perpétuel. Et s'il en est encore là, l'homme doit trouver des sources d'énergie ailleurs, dans d'autres étoiles pour commencer. Néanmoins, une fois que toutes les étoiles se seront éteintes, que restera-t-il comme source d'énergie ? Les trous noirs. Mais sera-t-il possible de récupérer cette énergie et de sauver la civilisation ?

Certes, ce scénario est « tiré par les cheveux ». Mais nous pouvons tout de même



L'ESSENTIEL

- Les trous noirs regorgent d'énergie juste au-dessus de leur horizon des événements.
- Une expérience de pensée suggère d'utiliser un ascenseur spatial pour exploiter cette énergie.
- L'ascenseur spatial devra utiliser une corde assez solide pour s'opposer à l'attraction gravitationnelle du trou noir. L'existence d'un matériau adéquat semble illusoire.

Kenn Brown, Monolithis Studios

nous demander s'il est possible d'exploiter l'énergie d'un trou noir. Ces questions sont un bon prétexte pour se pencher sur la physique d'un trou noir, en particulier celle de son horizon des événements, et d'étudier la possibilité de construire une structure gigantesque et popularisée par la science-fiction : l'ascenseur spatial.

Une frontière sans retour possible... ou presque

À première vue, extraire de l'énergie (ou quoi que ce soit) d'un trou noir semble impossible. En effet, on définit l'horizon des événements d'un trou noir comme la frontière qui délimite la région sphérique où le champ gravitationnel du trou noir devient si intense que tout ce qui y pénètre ne peut plus s'en échapper : ni les météorites, ni les fusées, ni même la lumière (voir la figure a, page 56). Tout ce qui s'aventure à l'intérieur de cette sphère est voué à disparaître. De la même façon, une bombe larguée sur le trou noir, loin de le détruire, ne servirait qu'à le faire grossir d'une quantité égale à la masse de la bombe.

C'est en tout cas ce que l'on pensait. Mais dans un article publié en 1974, Stephen Hawking montrait que nous nous trompions. En développant des idées de Jacob Bekenstein, maintenant à l'Université hébraïque de Jérusalem, Stephen Hawking expliquait que les trous noirs laissent fuir de petites quantités de rayonnement. Vous mourrez quand même si vous tombez dedans, mais, bien que vous ne puissiez jamais refaire surface en tant que personne, votre énergie finira par ressortir. Et c'est une bonne nouvelle pour ceux qui voudraient exploiter les trous noirs : de l'énergie s'en échappe.

La raison pour laquelle cette énergie s'échappe est liée aux lois de la mécanique quantique. Un des phénomènes caractéristiques de la physique quantique est qu'elle permet aux particules de passer par effet tunnel à travers des obstacles qui, classiquement, devraient être infranchissables. N'essayez pas de le faire chez vous : si vous vous jetez sur un mur, vous avez peu de chances de réapparaître intact

LES ASCENSEURS SPATIAUX transporteront peut-être un jour des objets de la Terre vers l'espace. Un tel dispositif permettrait-il d'extraire de l'énergie d'un trou noir ?

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.

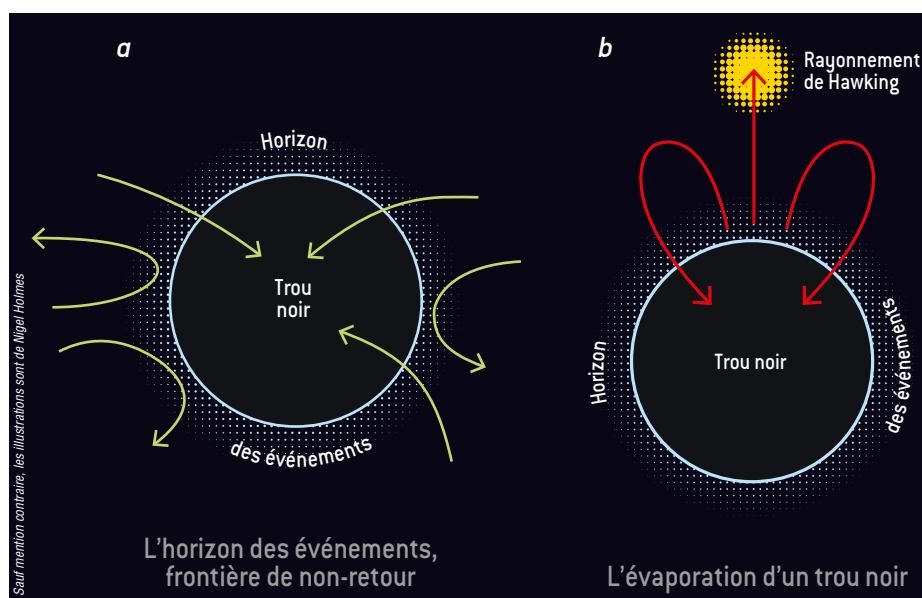
Un réservoir de particules à exploiter

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.

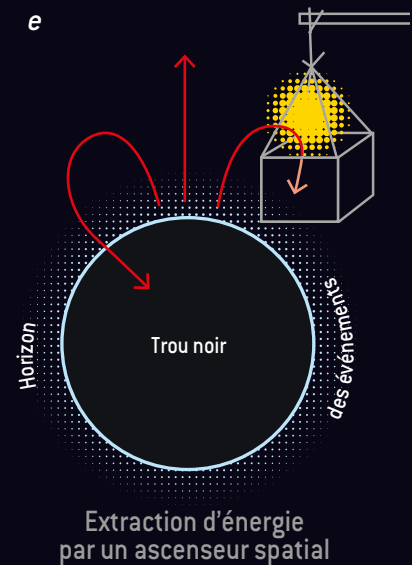
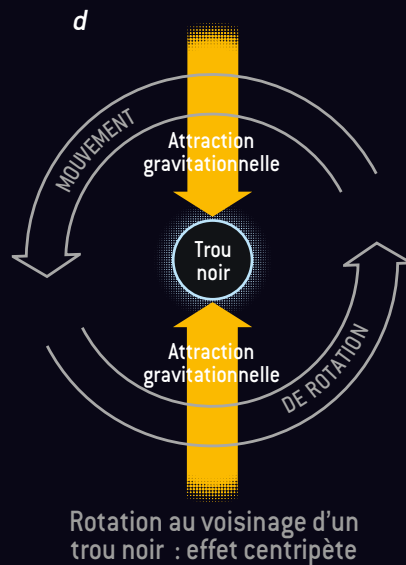
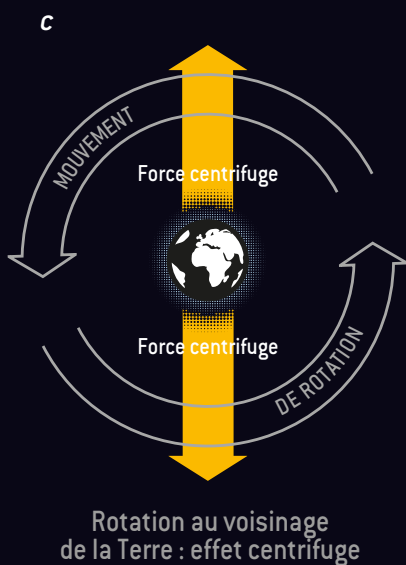
■ L'AUTEUR



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

sol (comme dans un gratte-ciel, où chaque étage tient ceux du dessus), mais par une traction du haut (chaque segment de corde tient celui du dessous) (voir la figure a ci-dessous). L'extrémité de la corde est amarrée à une énorme masse en orbite lente très au-delà de l'orbite géostationnaire, qui tire la corde vers l'extérieur, maintenant l'ensemble en l'air. L'extrémité basse de la corde pend juste au-dessus de la surface

ne pas s'étirer ou casser sous la tension, et léger pour ne pas inutilement charger la corde au-dessus.

L'acier n'est pas assez résistant, loin de là. Pour compenser ce défaut et pour faire supporter le poids du câble à l'acier, une solution serait d'augmenter sa section à mesure que l'altitude augmente. Mais, au voisinage de la Terre, le câble devrait doubler son diamètre tous les quelques kilomètres (voir la figure b, ci-contre). Longtemps avant d'atteindre le point géostationnaire, il aurait atteint une épaisseur irréaliste.

Construire un ascenseur spatial pour la Terre avec des matériaux du XIX^e siècle est tout simplement impossible. Mais des matériaux du XXI^e siècle sont prometteurs. Les nanotubes de carbone, de longs rubans de carbone ayant une structure en nid-d'abeilles, sont 1 000 fois plus résistants que l'acier. Ils font d'excellents candidats pour la construction d'un ascenseur spatial.

Un tel projet coûterait des milliards de dollars et serait de loin le plus grand chantier jamais entrepris. En outre, cela nécessiterait de trouver comment

de la Terre, l'équilibre des forces en jeu étant tel qu'elle flotte là comme par magie (la magie, faisait remarquer Clarke, est impossible à distinguer de technologies suffisamment avancées).

L'idée de cette technologie avancée est qu'une fois la corde en place, il devient beaucoup plus facile de monter des charges en orbite. Fini le danger, l'inefficacité ou les gaspillages d'une fusée qui, durant la première partie de son voyage, soulève essentiellement du carburant. Au lieu de cela, nous attacherions à la corde un ascenseur électrique. Le coût de déplacement d'une cargaison jusqu'en orbite terrestre basse ne sera plus que celui de l'électricité, et monter un kilogramme dans l'espace ne coûtera plus les dizaines de milliers de dollars facturés par la navette spatiale, mais reviendra à quelques dollars: un voyage dans l'espace pour le prix d'un ticket de métro.

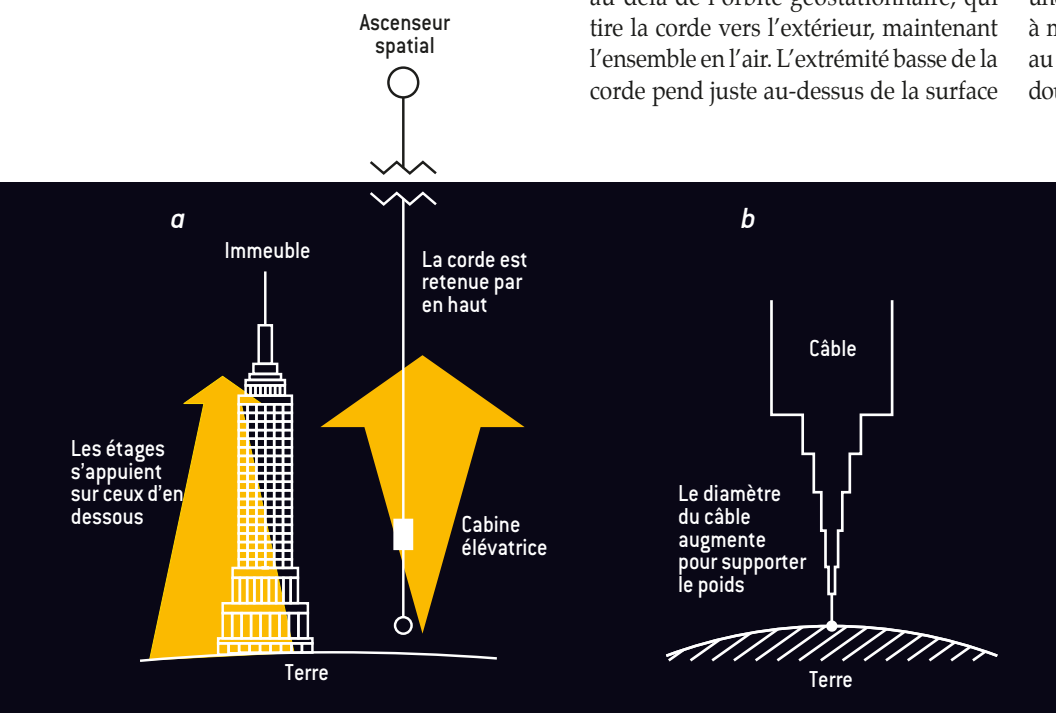
Les obstacles technologiques à la construction d'un ascenseur spatial sont nombreux, et le plus important est de trouver un matériau adéquat pour la corde. Il doit être à la fois solide et léger: solide pour

filer des nanotubes de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres de long, et il y aurait évidemment de nombreux autres obstacles à surmonter. Mais pour un physicien théoricien comme moi, une fois établi le fait qu'une structure proposée ne viole pas les lois connues de la physique, tout le reste n'est qu'ingénierie.

Ascenseur pour trou noir

Autour d'un trou noir, bien sûr, le problème est beaucoup plus compliqué. Le champ gravitationnel est plus intense, et ce qui fonctionne autour de la Terre est insuffisant pour le cas qui nous intéresse.

Même en utilisant les nanotubes de carbone dont on vante tant la résistance, un hypothétique ascenseur spatial qui descendrait tout près de l'horizon d'un trou noir serait soit tellement fin à proximité du trou noir qu'un seul photon suffirait pour le casser, soit tellement épais à distance du trou noir que la corde s'effondrerait sous sa propre gravité et deviendrait elle-même un trou noir.



BIBLIOGRAPHIE

A. Riazuelo, À l'horizon des trous noirs, *Dossier Pour la Science*, n° 83, avril-juin 2014.

A. Brown, Tensile strength and the mining of black holes, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 111, 211301, 2013.

C. Zakri et al., Les nanotubes : des fibres d'avenir !, *Dossier Pour la Science*, n° 79, avril-juin 2013.

R. Parentani, Les prédictions de Stephen Hawking, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

W. G. Unruh et R. M. Wald, Acceleration radiation and the generalized second law of thermodynamics, *Phys. Rev. D*, vol. 25(4), pp. 942-958, 1982.

Arthur C. Clarke, *Les Fontaines du paradis*, Folio SF, 2005.