

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.

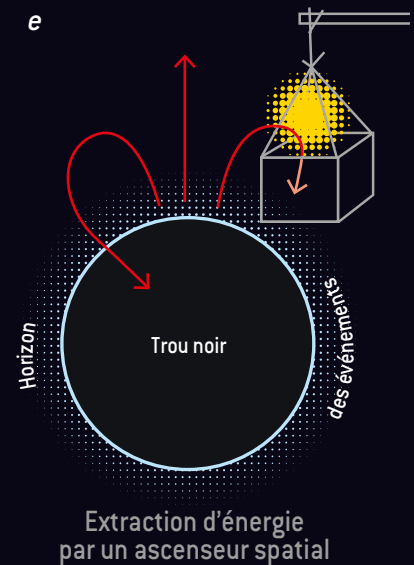
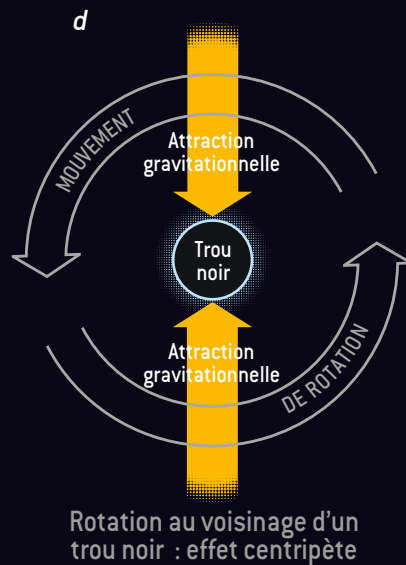
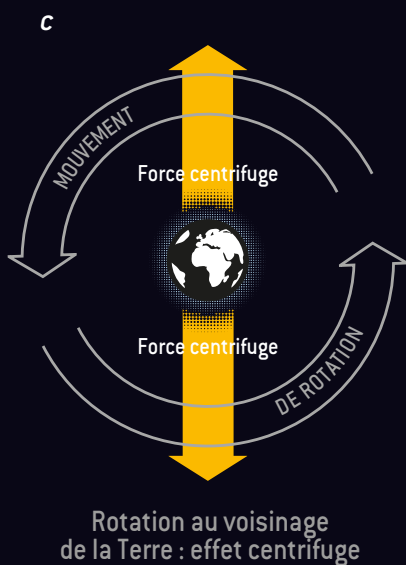
## ■ L'AUTEUR



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<sup>e</sup> siècle est tout simplement impossible. Mais des matériaux du XXI<sup>e</sup> 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.

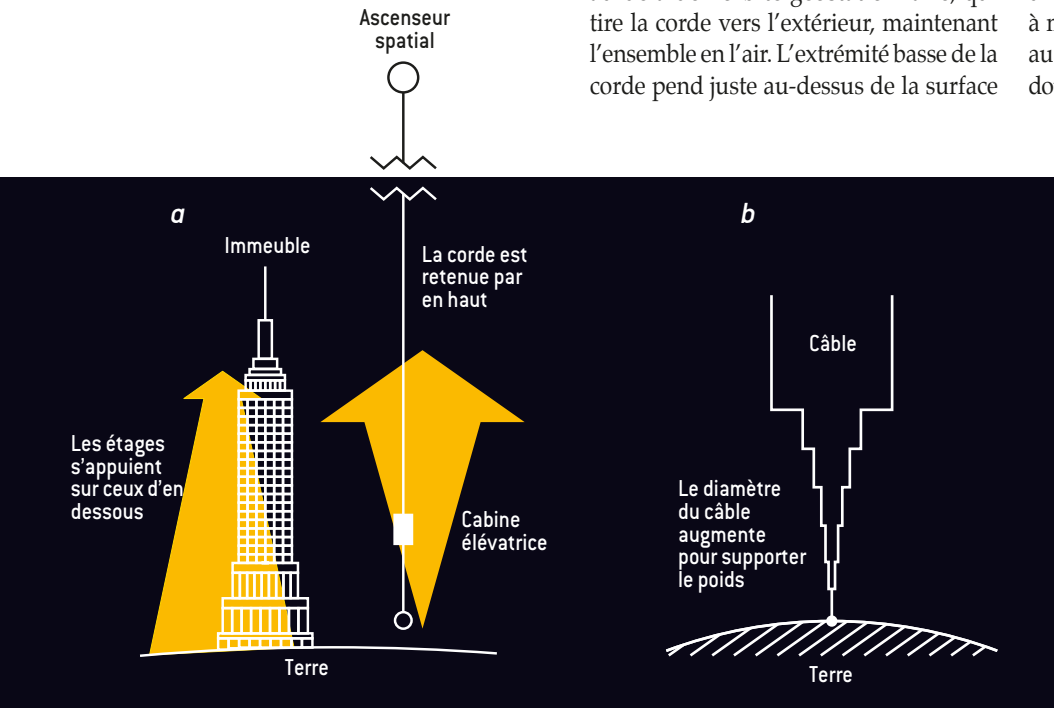
Les obstacles technologiques à la construction d'un ascenseur spatial sont nombreux, et le plus important est de trouver un matériau adéquat pour la corde. Il doit être à la fois solide et léger: solide pour

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.

Cela élimine les nanotubes de carbone. Mais de la même manière que l'âge de Fer a suivi l'âge de Bronze, et que les nanotubes de carbone succéderont un jour à l'acier, nous pouvons espérer découvrir des matériaux encore plus résistants et plus légers. Mais les améliorations ne peuvent pas se poursuivre indéfiniment. Il y a une limite au progrès de l'ingénierie, imposée par les lois de la nature. En ce qui concerne l'ascenseur spatial près d'un trou noir, c'est la limite du rapport résistance à la traction/poids du matériau qui est le facteur déterminant. Ce rapport est insuffisant pour l'acier et les nanotubes, mais existe-t-il un matériau assez résistant ? La résistance maximale théorique, indépendamment du matériau, est calculable, et est une étonnante conséquence de la relation  $E = mc^2$  d'Albert Einstein.

Comment évaluer la résistance à la traction d'une corde pour éviter qu'elle ne casse ? La tension d'une corde indique combien d'énergie vous devez dépenser pour l'allonger : plus la corde est tendue, plus cela coûte en énergie pour l'allonger. Un élastique a une certaine tension parce que vous dépensez de l'énergie à réarranger ses molécules pour l'étirer : quand les molécules sont faciles à réarranger, la tension est faible ; quand il faut beaucoup d'énergie pour réarranger les molécules, la tension est élevée.

Réarranger les molécules n'est pas la seule façon d'allonger la corde. Il est aussi possible d'ajouter des molécules, une à une, à une extrémité (ce qui revient à coller un bout de corde à la précédente). L'énergie fournie pour créer les molécules que l'on colle est donnée par la relation d'Einstein,  $E = mc^2$  : l'énergie est égale au produit de la masse ( $m$ ) du nouveau segment de corde par le carré de la vitesse de la lumière ( $c^2$ ).

C'est une façon très coûteuse de rallonger une corde. On peut montrer que ce raisonnement fournit une limite supérieure au coût en énergie pour allonger une corde, et donc une limite théorique à la tension de la corde indépendamment de sa composition. Aucune corde ne pourra résister à une tension supérieure à la masse par unité de longueur multipliée par  $c^2$ .

Cette limite fondamentale de la résistance des matériaux laisse une grande marge

de progrès. La résistance de l'acier est des centaines de milliards de fois inférieure à cette limite théorique et, à masse égale, la résistance des nanotubes de carbone reste encore des centaines de millions de fois plus faible. Cette limite théorique signifie aussi que nous ne pouvons pas améliorer indéfiniment nos matériaux, tout comme nos efforts pour nous propulser plus rapidement sont limités par la vitesse de la lumière.

Il existe un matériau hypothétique qui atteint précisément la limite. Ce matériau n'a jamais été observé dans un laboratoire, et certains physiciens doutent même de son existence, mais il a déjà un nom : la corde

réaliser cet exploit, ce sont bien les cordes quantiques ; réciproquement, si les cordes quantiques n'y parviennent pas, les trous noirs n'ont rien à craindre.

À nouveau, nous rencontrons un obstacle : les cordes quantiques ne sont pas tout à fait assez solides pour l'usage que nous voulons en faire. Un rien plus solides et il serait « facile » de construire un ascenseur spatial, même autour d'un trou noir ; un peu plus fragiles, et le projet serait désespéré : la corde casserait sous son propre poids. Les cordes quantiques sont exactement à la limite : un câble constitué de cordes quantiques et qui pend vers la surface d'un trou noir a juste assez de résistance pour supporter son propre poids, mais il ne peut pas supporter la charge de l'ascenseur. La cage est de trop.

Le câble peut donc atteindre l'atmosphère dense du trou noir, mais il ne suffit pas pour l'exploiter. Une solution serait de descendre le câble seulement dans la haute atmosphère : la quantité d'énergie y est limitée, mais exploitable.

Cependant, ce régime maigre ne vaut pas beaucoup mieux que de simplement attendre que le trou noir s'évapore, le rendement étant quasiment le même. En braconnant quelques photons ici ou là, nous pourrions éventuellement raccourcir un peu la durée de vie d'un trou noir, mais nous ne parviendrions pas à mettre en place le type d'extraction industrielle qui serait nécessaire pour alimenter une civilisation affamée.

Le problème posé au départ est encore une fois « tiré par les cheveux », mais il nous a permis de nous aventurer aux limites de la physique, là où la vitesse finie de la lumière est un obstacle. Celle-ci nous empêche d'échapper à l'horizon d'un trou noir ou de construire un ascenseur cosmique, puisqu'une corde ne peut jamais être plus solide que le carré de la vitesse de la lumière multiplié par sa masse par unité de longueur.

Les trous noirs peuvent être tranquilles : on ne pourra pas leur soutirer de l'énergie plus vite qu'ils ne s'évaporent. Heureusement, l'humanité a encore de beaux jours devant elle pour profiter de la chaleur du Soleil. ■

**Les  
particules**  
**qui foisonnent à  
l'horizon d'un trou noir**  
constituent un réservoir  
d'énergie. Les récupérer  
est-il une utopie ?

quantique. Issue de la « théorie des cordes », les chercheurs l'étudient principalement car elle pourrait être le constituant fondamental de la matière. Pour nos besoins, ce n'est pas son caractère fondamental qui importe, mais sa résistance.

Les cordes quantiques sont solides. Il serait possible de suspendre l'Everest à un câble constitué de cordes quantiques de même taille et de même poids qu'un lacet. Les défis d'ingénierie les plus redoutables exigent les matériaux les plus performants. Si nous voulons construire un ascenseur spatial autour d'un trou noir, notre meilleur espoir est d'utiliser des cordes quantiques ; là où les nanotubes ont échoué, les cordes fondamentales réussissent peut-être. Si un matériau peut