

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

Intelligence

Les babouins passent le test

Joël Fagot et Anaïs Maugard

Experts en analogies, capables de reconnaître leur ignorance, moins aptes à réfléchir quand ils sont stressés... Tel est le portrait des babouins que dressent des études d'un genre nouveau, où des tests cognitifs en libre accès sont mis à disposition des singes.





Les écrans tactiles arrivent... chez les singes ! En libre accès dans l'enclos des babouins, à la station de primatologie de Rousset, près d'Aix-en-Provence, ils permettent de proposer aux animaux toute une série de tests cognitifs. Et d'apporter de nouvelles preuves expérimentales de la continuité entre les facultés mentales de l'homme et celles des primates non humains, que Charles Darwin évoquait déjà en 1871 dans son ouvrage *La descendance de l'homme et la sélection sexuelle*.

Si les premiers contacts européens avec les singes remontent aux expéditions carthaginoises du V^e siècle avant notre ère, leur étude scientifique ne commence qu'au XVIII^e siècle. Les naturalistes, tel Georges-Louis Leclerc de Buffon, en donnent alors une description anatomique précise. Dans les années 1920, les éthologues organisent des expéditions en Afrique et en Asie afin de comprendre leur comportement et leur mode de vie. Ils ramènent quelques spécimens à des zoos ou des collectionneurs privés.

Depuis cette période, les travaux sur les facultés cognitives des primates ont suivi deux voies. La première consiste à observer le comportement des animaux dans leur milieu naturel, la seconde à les étudier en captivité, dans des environnements contrôlés. Chaque approche a apporté son lot de découvertes. Les recherches de terrain ont par exemple révélé l'extraordinaire complexité de l'organisation sociale des singes : la primatologue britannique Jane Goodall a ainsi observé que les chimpanzés de Tanzanie vivent en petits groupes dirigés par un mâle dominant et se coordonnent pour chasser de petits gibiers. En proposant aux singes de résoudre des tâches précises

L'ESSENTIEL

■ **À la station de primatologie de Rousset, les babouins ont un accès libre à des tests cognitifs depuis leur enclos.**

■ **Chaque singe y fait environ un millier de tests par jour.**

■ **En augmentant peu à peu la difficulté des tâches, on découvre que les babouins sont capables de mettre en œuvre des capacités cognitives élaborées, auparavant considérées comme l'apanage de l'homme.**

■ **On s'aperçoit aussi que le contexte social influence les performances.**

© shutterstock.com/Christian Musat (page précédente)

et en récompensant les succès par de la nourriture, les recherches de laboratoire ont quant à elles révélé des capacités cognitives insoupçonnées chez ces animaux. En 1972, le chercheur américain David Premack a notamment appris à une femelle chimpanzé l'utilisation d'un langage simple en combinant des symboles en plastique.

Un laboratoire où les singes vivent en groupe

Cependant, les animaux captifs ne déploient sans doute pas toutes les ressources cognitives qu'ils mobilisent dans leur milieu naturel. Dans notre équipe, nous avons élaboré une nouvelle stratégie, à mi-chemin entre les études de laboratoire et celles de terrain. Nous avons installé des dispositifs de tests en libre accès dans des compartiments accessibles depuis un enclos de babouins (voir la figure ci-dessous). Chaque singe peut choisir de quitter momentanément son groupe social pour entrer dans un compartiment. Il y trouve un écran tactile dispensant des tests informatisés et un distributeur de récompenses, qui délivre des grains de blé. Chaque babouin porte une puce électronique, grâce à laquelle nous déterminons son identité.

Cette méthode est inspirée du concept de conditionnement opérant, proposé par les psychologues américains Edward Thorndike, au XIX^e siècle, et Burrhus Skinner, au milieu du XX^e siècle : un animal (ou un homme) tend à reproduire les comportements qui ont une conséquence positive pour lui. Ainsi, quand on récompense les bonnes réponses, l'animal se prête volontairement aux tests. Comme nous avons placé le dispositif au sein de son milieu de vie, il l'utilise tout

