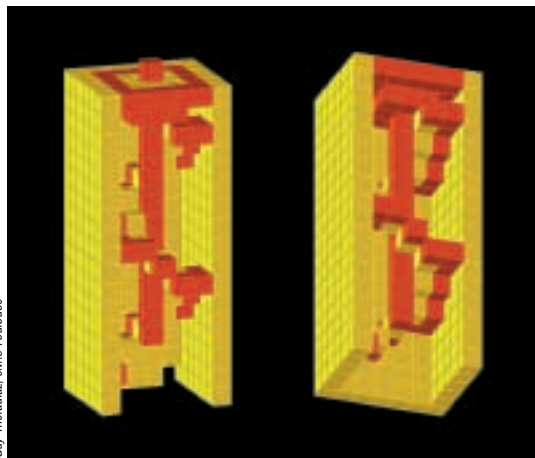




Guy Théraulaz, CNRS Toulouse

8. CETTE STRUCTURE (vue sous deux angles) a été obtenue par auto-assemblage de 500 briques grâce à un processus « stigmergique » : selon le voisinage perçu, c'est-à-dire l'état des 26 briques qui l'entourent, l'agent virtuel bâtisseur dépose ou non une brique dans la cellule qu'il occupe. On a ôté la couche de briques superficielle pour montrer la structure interne de l'ensemble.

complexe, la forme du nid détermine indirectement la construction par un processus nommé stigmergie : certaines microstructures rencontrées sur le nid influencent l'activité bâtisseuse. Par exemple, certaines configurations de cellules, identifiées par la guêpe grâce à ses antennes, entraînent la construction d'une nouvelle cellule, alors que d'autres sont sans effet. La dynamique de construction s'apparente à un processus d'auto-assemblage. Nous avons montré que les structures produites par cet auto-assemblage et des algorithmes stigmergiques pouvaient être très élaborées (voir la figure 8). De plus, d'autres problèmes peuvent être convertis sous la forme d'une représentation spatiale, afin d'être résolus par des robots manipulateurs d'objets. Les divers systèmes que nous avons détaillés illustrent l'abondance d'applications fondées sur le comportement des insectes sociaux. Nous pouvons encore citer d'autres exemples : la planification du travail dans une usine peut être améliorée par l'étude de la flexibilité de la répartition des tâches chez les abeilles (voir l'encadré de la page 70) ; inspiré par la manière dont les guêpes construisent leurs nids, Dan Petrovich, de l'Institut de technologie de l'armée de l'air américaine, a mis au point un essaim de petits satellites mobiles qui s'assembleraient en une structure donnée plus grande ; grâce à des agents logiciels de type insecte, Van Dyke Parunak, de l'Institut de recherches environnementales du Michigan, résout des problèmes de fabrication, telle la gestion d'un

réseau de fournisseurs d'une usine...

Paul Kantor, de l'Université Rutgers, utilise l'intelligence en essaim pour rechercher des informations sur le réseau *Internet*, ainsi que dans d'autres grands réseaux : dans une colonie d'utilisateurs, les internautes à la recherche de sites intéressants accèdent aux informations sous forme de phéromones numériques laissées par d'autres membres de la même colonie lors de recherches précédentes.

L'intelligence en essaim offre un moyen de concevoir des systèmes capables de s'adapter rapidement à des conditions changeantes. Elle s'est développée grâce à

notre compréhension du fonctionnement des sociétés d'insectes, même si parfois les détails précis sur les mécanismes impliqués sont encore inconnus.

Toutefois, bien qu'efficaces dans de nombreuses tâches d'optimisation et de contrôle, les systèmes d'intelligence en essaim sont par principe réactifs et manquent d'une vue d'ensemble indispensable à la résolution de problèmes qui requièrent des techniques de raisonnement approfondi.

Les informaticiens craignaient que les agents autonomes de type insecte ne deviennent incontrôlables dans les ordinateurs qu'ils habitent. Les nombreuses applications leur ont démontré que cette caractéristique est un avantage lorsqu'elle permet à de tels systèmes de s'adapter à des problèmes imprévus : cette flexibilité fait défaut aux logiciels classiques.

Ainsi, les insectes sociaux nous enseignent que des éléments réactifs et simples, correctement connectés dans un groupe, sont capables de produire des résultats intelligents : l'astuce réside dans la pertinence des connexions.

Éric BONABEAU est directeur scientifique à la Société *Euro-Bios*, à Paris. Guy THÉRAULAZ est éthologiste au CNRS, à l'Université Paul Sabatier, à Toulouse.

Éric BONABEAU, Marco DORIGO et Guy THÉRAULAZ, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, 1999.

L'énergie négative

LAWRENCE FORD • THOMAS ROMAN

On voyagerait à des vitesses supérieures à celle de la lumière si l'on maîtrisait une forme d'énergie inédite. Les lois de la physique qui indiquent l'existence de cette énergie «négative» semblent également en limiter les applications pratiques...

Une région de l'Univers peut-elle contenir moins que rien? La question semble absurde : une fois que l'on a éliminé la matière et le rayonnement, que retirer de plus? Toutefois, la physique quantique a souvent montré que l'intuition appréhende mal les phénomènes aux très petites échelles ou aux énergies considérables. Elle révèle qu'un volume peut contenir moins que rien, que la densité d'énergie (la quantité d'énergie par unité de volume) peut être négative.

Évidemment, une telle découverte a des conséquences étranges. D'après la théorie de la relativité générale, due à Albert Einstein, la présence de matière et d'énergie déforme l'espace-temps, et les forces d'attraction gravitationnelles ne sont que des conséquences des déformations de l'espace-temps dues à l'énergie ou à la masse classiques, positives. Si de l'énergie négative ou si de la masse négative (la matière «exotique») déformaient l'espace-temps, des phénomènes étranges apparaîtraient : des tunnels nommés trous de ver relierait des zones éloignées de l'Univers ; on pourrait voyager à des vitesses supérieures à celle de la lumière, et des machines pourraient faire remonter le temps. À l'aide d'énergie négative, on

pourrait même construire des machines à mouvement perpétuel ou détruire des trous noirs. Tous les ingrédients de *Star Trek* y sont.

Ces possibilités alertent les physiciens : la science-fiction a largement exploré les paradoxes engendrés par les voyages dans le passé (que se passerait-il si vous tuiez votre grand-père avant qu'il ne conçoive votre père?), et la matière exotique pose des questions fondamentales. Par exemple, quelles sont les propriétés de l'énergie négative? Quelques physiciens ont montré que la quantité et la durée de vie de l'énergie négative sont limitées. Au risque de décevoir, la physique prévoit que la construction de trous de ver dans l'Univers et les déplacements supraluminiques par déformation de l'espace-temps sont improbables.

Double négation

Avant d'aller plus loin, précisons que l'énergie négative n'est pas l'antimatière, dont l'énergie est positive. Quand un électron heurte son antiparticule (le positon), ils se détruisent mutuellement, produisant des rayons gamma, dont l'énergie est positive. Si les antiparticules avaient une énergie

1. LES TROUS DE VER ont été considérés comme des ouvertures sphériques vers des régions éloignées de l'Univers. Bien que la création d'un tel trou de ver ne viole aucune des lois connues de la physique, elle nécessiterait la production de quantités tout à fait irréalistes d'énergie négative.



Slim Films ; Dan Wagner (Times Square) ; Julia Waterlow, Corbis (Sahara)

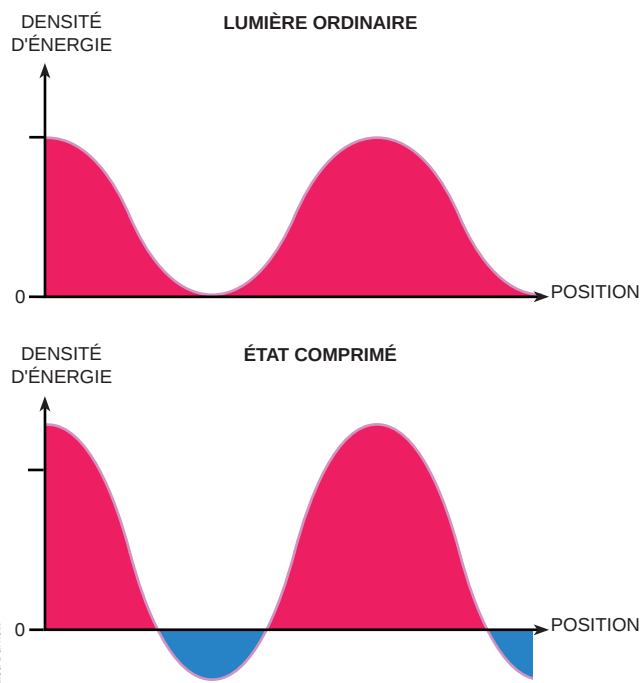


négative, l'annihilation ne libérerait aucune énergie. D'autre part, l'énergie négative n'est pas l'énergie associée à la constante cosmologique qui est postulée dans les théories inflatoires de l'Univers (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, *Pour la Science*, mars 1999). Cette constante correspond à une pression négative, mais à une énergie positive (certains physiciens nomment matière exotique toute matière ayant une pression négative, mais nous préférons réserver ce terme aux masses négatives).

Le concept d'énergie négative n'est pas pure imagination ; certains de ses effets ont même été produits en laboratoire. Ils découlent du principe d'incertitude d'Heisenberg, qui stipule que tout champ (électrique, magnétique, etc.) fluctue. Même quand la densité d'énergie est nulle en moyenne, comme dans le vide, elle n'est pas constamment nulle, de sorte que le vide réel n'est pas le vide qu'imaginait la physique classique ; c'est une mer agitée de particules «virtuelles» qui se créent et s'annihilent spontanément.

La notion habituelle d'énergie nulle correspond au vide soumis à toutes ces fluctuations, de sorte qu'en réduisant l'amplitude de ces dernières, le vide a moins d'énergie qu'il n'en possède normalement : c'est en ce sens qu'il a une énergie négative.

En optique quantique, par exemple, les physiciens ont créé des états particuliers de champs où des interférences quantiques destructrices suppriment les fluctuations du vide. Une énergie négative est présente dans ces états de «vide comprimé» ; plus précisément, ils sont associés à des régions où alternent énergie positive et énergie négative. L'énergie moyenne, sur tout l'espace, est positive, mais la compression du vide crée de l'énergie négative à un endroit donné en augmentant l'énergie ailleurs. Dans ces expériences, on envoie généralement des faisceaux laser à travers des matériaux optiques non linéaires, c'est-à-dire qui réémettent une longueur d'onde différente de la longueur d'onde qu'ils reçoivent



2. LES ONDES LUMINEUSES ont généralement une densité d'énergie positive ou nulle en différents points de l'espace (en haut). Cependant, dans un état «comprimé», la densité d'énergie à un instant donné peut devenir négative en certains points (en bas). En compensation, le pic de densité positive doit être augmenté.

(voir *La lumière silencieuse*, par Richard Slusher et Bernard Yurke, *Pour la Science*, juillet 1988). Le laser crée, dans le matériau, des paires de photons (ou «particules de lumière»). Ces photons renforcent et annulent alternativement les fluctuations du vide, conduisant à des zones d'énergie respectivement positive ou négative.

On produit également de l'énergie négative quand on introduit des limites géométriques dans un espace. En 1948, le physicien néerlandais Hendrik Casimir a montré que deux plaques de métal parallèles modifient les fluctuations du vide, de sorte qu'elles s'attirent. Après lui, des physiciens ont calculé que la densité d'énergie entre les plaques était négative. En effet, les plaques réduisent les fluctuations dans l'espace qui les sépare, ce qui crée une énergie et une pression négatives : les plaques sont attirées l'une vers l'autre. Plus les deux plaques sont proches, plus l'énergie et la pression sont négatives, et plus la force d'attraction est importante. Steve Lamoreaux, du Laboratoire de Los Alamos, Umar Mohideen et Anushree Roy, à l'Université de Riverside, ont récemment mesuré l'effet Casimir. Enfin, dans les années 1970, à Londres, Paul Davies et Stephen Fulling ont calculé qu'une frontière mobile, tel un miroir que l'on

déplacerait, produirait un courant d'énergie négative.

Dans le cas de l'effet Casimir comme dans celui des états comprimés, les physiciens n'ont mesuré que les effets indirects de l'énergie négative. La détection directe est plus difficile, mais pas impossible : Peter Grove et Adrian Ottewill, de l'Université d'Oxford, et l'un d'entre nous (L. Ford) ont proposé en 1992 de la réaliser au moyen des spins atomiques.

Pesanteur et légèreté

Le concept d'énergie négative apparaît dans plusieurs domaines de la physique moderne. On le trouve notamment quand on analyse les trous noirs, ces mystérieux objets dont le champ gravitationnel est si fort que

rien ne s'échappe de leur voisinage, limité par un «horizon des événements». En 1974, à Cambridge, Stephen Hawking a calculé que les trous noirs devaient s'évaporer en émettant un rayonnement (voir *La mécanique quantique des trous noirs*, par Stephen Hawking, dossier hors série de la revue *Pour la Science*) : à chaque instant, un trou noir rayonne une quantité d'énergie proportionnelle au carré de sa masse. Bien que cette «évaporation» ne soit notable que pour les trous noirs de taille subatomique, elle assure l'équilibre thermique des trous noirs et de leur environnement.

Cette évaporation semble paradoxale. Puisque l'horizon des trous noirs est à sens unique, comment les trous noirs rayonnent-ils de l'énergie vers l'extérieur ? En raison de la conservation de l'énergie, la production d'énergie positive (que les observateurs lointains constatent sous forme de rayonnement de Hawking) est accompagnée d'un afflux d'énergie négative vers l'intérieur du trou noir : l'énergie négative est produite par la courbure de l'espace-temps à proximité du trou, qui perturbe les fluctuations du vide.

Les trous noirs ne sont pas les seules déformations de l'espace-temps où l'énergie négative semble jouer un rôle. Elle se retrouve également

dans les trous de ver, d'hypothétiques tunnels qui relient des régions éloignées de l'espace-temps. Naguère, les physiciens pensaient que les trous de ver étaient minuscules, apparaissant et disparaissant comme des particules virtuelles (voir *La gravitation quantique*, par Bryce Dewitt, *Pour la Science*, février 1984).

Au début des années 1960, les physiciens Robert Fuller et John Wheeler calculèrent que des trous de ver plus grands s'effondreraient si rapidement sous leur propre gravité que même un faisceau lumineux n'aurait pas le temps de les traverser. Toutefois, à la fin des années 1980, plusieurs physiciens, tels Michael Morris et Kip Thorne, de l'Institut de technologie de Californie, et Matt Visser, de l'Université de Washington, ont montré que certains trous de ver seraient assez grands pour laisser passer un être humain ou un vaisseau spatial : on

pourrait entrer dans un trou de ver à proximité de la Terre, parcourir une courte distance à pied dans ce trou de ver et ressortir dans la galaxie d'Andromède, par exemple... à condition de maîtriser l'énergie négative, qui correspond à une répulsion gravitationnelle et empêcherait le trou de ver de s'effondrer.

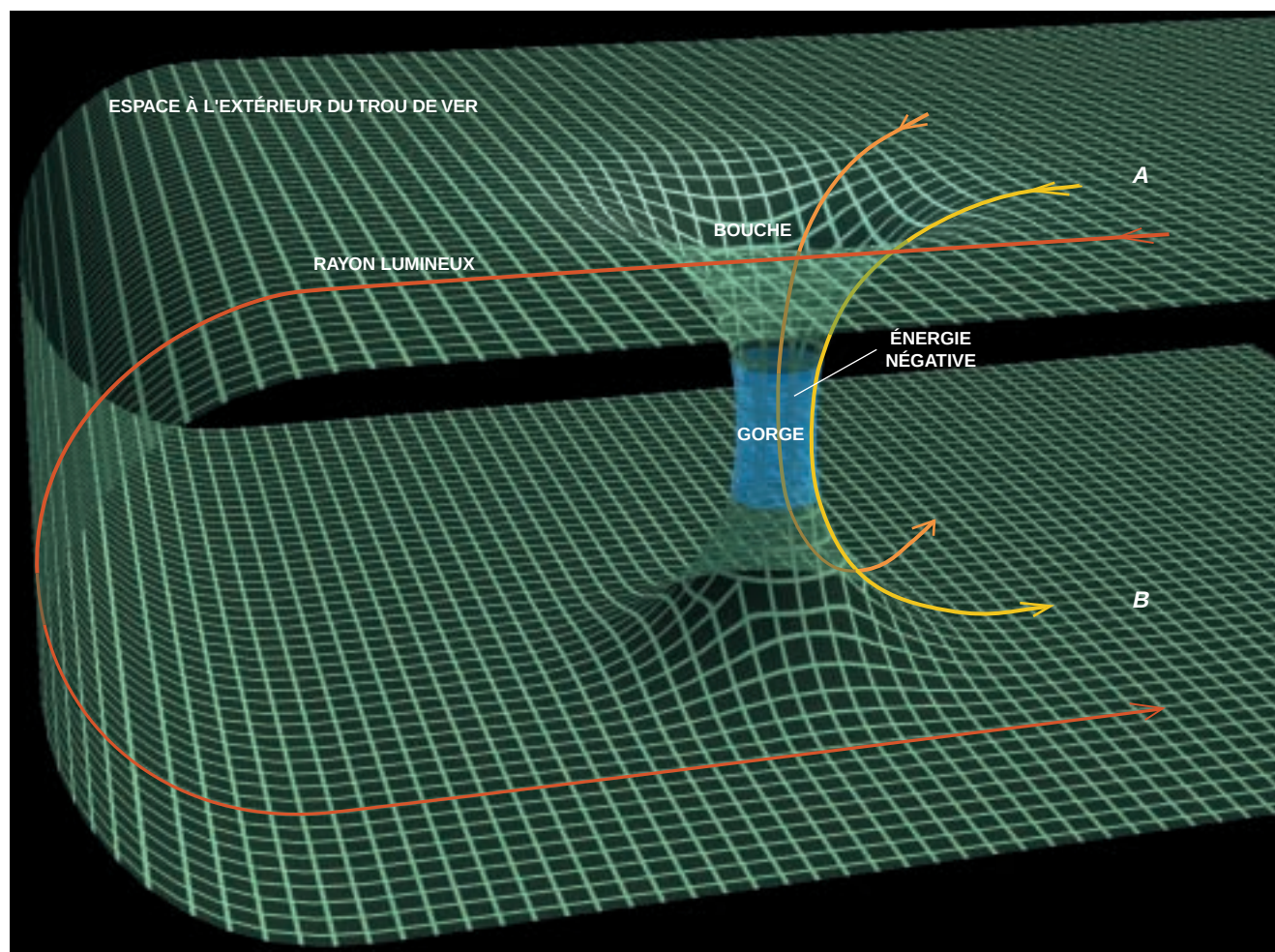
Un trou de ver n'est utilisable que s'il laisse passer des signaux sous forme de rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements pénétrant dans l'une des bouches du trou de ver sont convergents, mais, pour ressortir, ils doivent se défocaliser ; autrement dit, ils doivent passer de la convergence à la divergence quelque part entre l'entrée et la sortie (voir la figure 3). Cette défocalisation nécessite de l'énergie négative : alors que la courbure de l'espace-temps induite par le champ gravitationnel, attractif, de la matière ordinaire agit comme

une lentille convergente, l'énergie négative agit comme une lentille divergente.

Plus vite que la lumière

Des déformations de l'espace-temps permettraient également des voyages à des vitesses supérieures à celle de la lumière. En 1994, à Cardiff, Miguel Alcubierre Moya a trouvé une solution aux équations d'Einstein qui présente un certain nombre de caractéristiques communes avec la propulsion supraluminique par déformation de l'espace-temps. Une telle solution correspond à une bulle d'espace-temps qui pourrait transporter un vaisseau interstellaire à des vitesses arbitrairement élevées par rapport à un observateur situé en dehors de la bulle. Là encore, l'énergie négative est la clé du phénomène.

Le principe de déplacement à des vitesses supérieures à celle de la



3. UN TROU DE VER est un tunnel entre deux régions éloignées de l'espace. Les rayons lumineux peuvent entrer par une des ouvertures du trou de ver et ressortir par l'autre ouverture. La propagation serait beaucoup plus longue si le rayonnement n'empruntait pas ce raccourci. Dans la gorge, de l'énergie négative (en bleu) doit être

présente pour faire diverger les rayonnements. Ce diagramme est une représentation bidimensionnelle, mais l'espace réel a trois dimensions ; les ouvertures et la partie centrale du trou de ver seraient en fait des sphères. Les trous de ver pourraient également relier entre eux deux points différents dans le temps.

lumière par déformation de l'espace-temps semble contraire à la théorie de la relativité restreinte, mais cette dernière stipule seulement qu'on ne peut pas se déplacer plus vite que la lumière en suivant la même trajectoire qu'elle ; si l'espace-temps est déformé, on peut aller finalement plus vite que la lumière sans dépasser localement la vitesse de la lumière, à condition d'emprunter des raccourcis de l'espace-temps. La contraction de l'espace-temps devant la bulle et l'expansion de l'espace-temps derrière la bulle réduisent la distance à parcourir, créant un tel raccourci (voir la figure 4).

La théorie de M. Alcubierre, très originale, ne résout toutefois pas complètement le problème du voyage supraluminique, car Sergueï Krasnikov, de l'Observatoire astronomique central de Pulkovo (près de Saint-Petersbourg), a calculé que l'intérieur de la bulle d'espace-temps déformé est causalement déconnecté

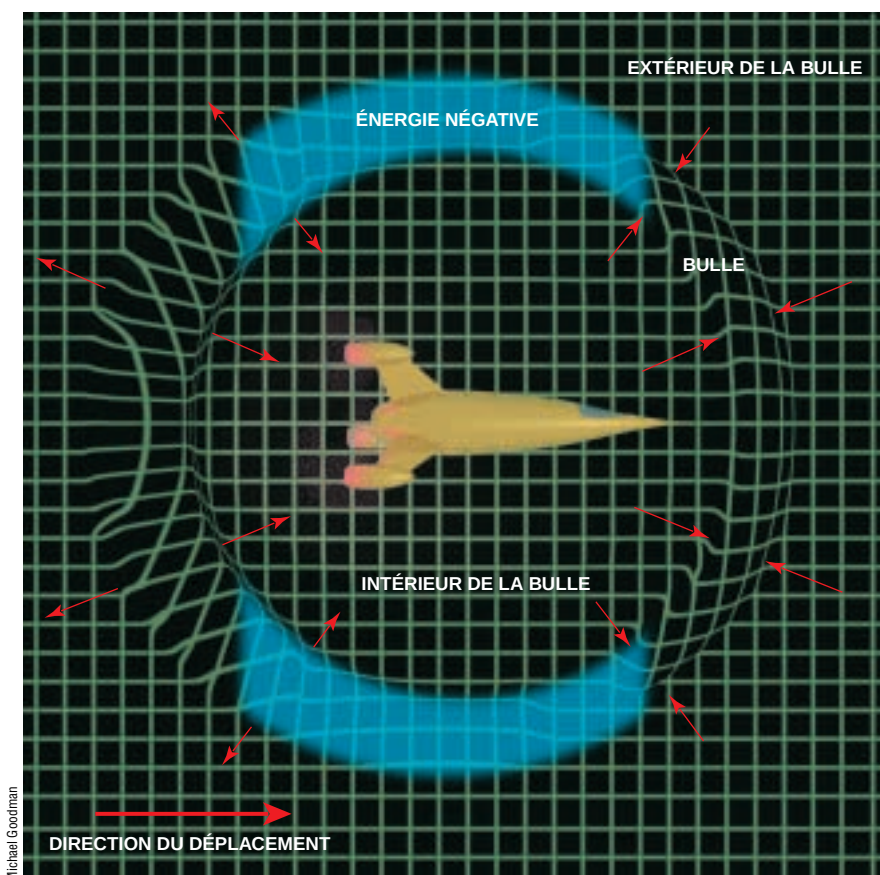
de l'extérieur. Le capitaine d'un vaisseau stellaire qui serait à l'intérieur d'une telle bulle ne pourrait ni la diriger, ni la supprimer, ni la recréer ; un agent extérieur doit la régler à l'avance. Afin de surmonter ce problème, S. Krasnikov a proposé l'utilisation de passages supraluminiques, des tubes d'espace-temps (différents des trous de ver) qui relieraient la Terre à des étoiles lointaines, par exemple. À l'intérieur du tube, le voyage à une vitesse supraluminique ne serait possible que dans un sens. En pratique, un vaisseau spatial quittant la Terre à une vitesse inférieure à celle de la lumière créerait ce tube ; puis il l'emprunterait au retour pour revenir vers la Terre à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Tout comme les bulles d'espace-temps, de tels tubes sont fondés sur l'énergie négative. Plus généralement, divers physiciens théoriciens ont calculé que tout principe qui ferait voyager plus vite que la lumière met en jeu de l'énergie négative.

Si l'on parvenait à construire des trous de ver ou des tubes de S. Krasnikov, on pourrait voyager dans le temps. En effet, l'écoulement du temps est relatif ; il dépend de la vitesse de l'observateur. Une personne quittant la Terre à bord d'un vaisseau spatial et voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière est moins vieille, à son retour sur Terre, qu'une autre personne qui serait restée sur notre planète. Si le voyageur parvient à dépasser la lumière, par exemple en prenant un raccourci (un trou de ver ou une bulle de l'espace-temps), il peut revenir avant d'être parti. En 1988, M. Morris, K. Thorne et Ulvi Yurtsever ont proposé une machine à voyager dans le temps fondée sur ce principe du trou de ver, et leur article est beaucoup étudié depuis dix ans. En 1992, S. Hawking a prouvé que la construction d'une machine temporelle dans une région finie de l'espace-temps nécessitait de l'énergie négative.

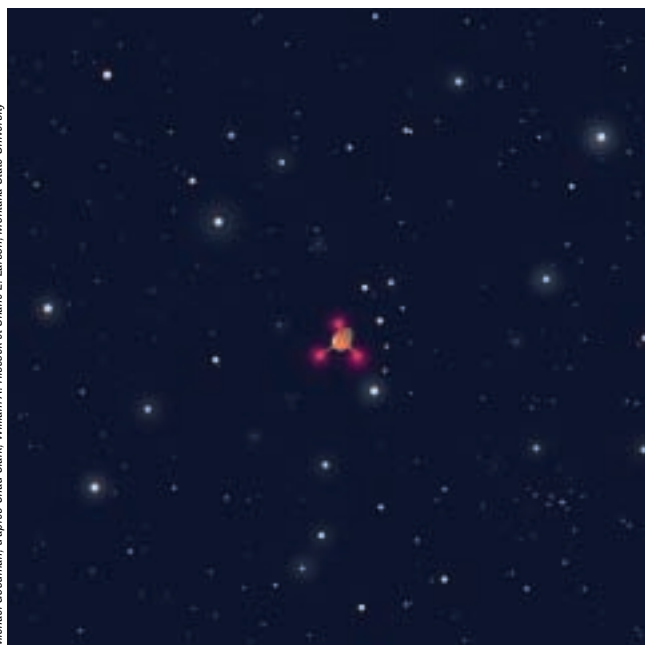
L'énergie négative est une notion si étrange qu'on admet difficilement qu'elle ne viole aucune des lois de la physique. Pourtant, avant et après la création de quantités égales d'énergie négative et positive dans un espace initialement vide, l'énergie totale est nulle : le principe de conservation de l'énergie est satisfait. Certes, ce respect est insuffisant, car de nombreux autres phénomènes où l'énergie est conservée ne sont jamais observés dans la réalité : les verres brisés ne se réparent pas d'eux-mêmes, et la chaleur ne diffuse pas spontanément d'un corps froid à un corps plus chaud.

De tels effets sont exclus par le deuxième principe de la thermodynamique, qui stipule que la mesure du désordre d'un système (son entropie) ne décroît pas spontanément, sans un apport d'énergie. Ainsi, un réfrigérateur consomme de l'énergie pour extraire de la chaleur de son intérieur déjà froid vers l'extérieur, plus chaud. De même, le deuxième principe interdit la transformation complète de la chaleur en travail mécanique.

L'existence d'énergie négative semble opposée au deuxième principe. Imaginons un laser d'un type nouveau, qui émettrait un faisceau stationnaire d'énergie négative. La conservation de l'énergie imposerait, en contrepartie, la création d'un faisceau stationnaire d'énergie positive. Pourrait-on pointer le faisceau d'énergie négative vers



4. DES BULLES D'ESPACE-TEMPS permettraient des voyages à vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. Elles pourraient transporter des vaisseaux spatiaux à des vitesses arbitrairement élevées. L'espace-temps serait contracté à l'avant de la bulle, réduisant ainsi la distance qui la sépare de sa destination, et dilaté à l'arrière, accroissant la distance qui la sépare de son point de départ (flèches). Le vaisseau lui-même ne bouge pas par rapport à l'espace immédiatement autour de lui ; les membres d'équipage ne ressentent aucune accélération. Une telle bulle nécessite de l'énergie négative (en bleu), sur les flancs de la bulle.



5. DANS UN VAISSEAU STELLAIRE qui se déplacerait plus vite que la lumière en direction de la Petite Ourse (*ci-dessus*), on ne verrait pas les zébrures classiquement représentées par les films de science-fiction, mais une scène analogue à celle qui est montrée ici. Tandis que la vitesse augmente (*à droite*), les étoiles situées devant le vaisseau (*colonne de gauche*) semblent de plus en plus proches de la direction du mouvement et leur couleur vire au bleu. Derrière le vaisseau (*colonne de droite*), les étoiles se rapprochent d'une position directement à l'arrière, rougissent et finissent par disparaître complètement. La lumière provenant d'étoiles situées directement au-dessus ou au-dessous est inchangée.



une région lointaine de l'Univers, tandis que l'énergie positive serait utilisée à des fins pratiques? Cette source apparemment inépuisable d'énergie pourrait servir à la réalisation d'une machine à mouvement perpétuel, qui violerait le deuxième principe. Par exemple, en pointant le faisceau vers un verre d'eau, on rafraîchirait l'eau, tandis que l'énergie positive extraite alimenterait un petit moteur : on obtiendrait ainsi un réfrigérateur qui fonctionnerait sans apport d'énergie. En réalité, une impossibilité survient, non pas en raison de l'idée d'énergie négative, mais parce que l'on ne peut pas séparer sans restriction l'énergie négative et l'énergie positive.

L'existence d'énergie négative aurait également des conséquences importantes en cosmologie. Quand l'énergie dégagée par les réactions thermonucléaires devient insuffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle des étoiles, celles-ci s'effondrent sur elles-mêmes et forment parfois un trou noir : une «singularité» de l'espace-temps qui correspond à une région de l'espace où l'intensité du champ de gravitation devient infinie. La relativité générale (et les autres lois de la physique) n'in-

dique pas comment l'Univers évolue dans cette région : cette ignorance est une des grandes lacunes de la description mathématique de la nature. Tant que la singularité reste à l'intérieur d'un horizon des événements, on peut décrire l'Univers à l'extérieur de cet horizon. C'est pour cette raison que Roger Penrose, à Oxford, a proposé l'hypothèse de «censure cosmique» : aucune singularité n'est-à-dire sans horizon des événements.

Pour certains types de trous noirs électriquement chargés ou en rotation, connus sous le nom de trous noirs extrêmes, une infime augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation, ou une diminution de la masse, détruiraient l'horizon des événements et transformeraient le trou noir en une singularité nue. L'augmentation de la charge ou de la vitesse de rotation de ces trous noirs à l'aide de matière ordinaire semble irréalisable pour diverses raisons. En revanche, on pourrait réduire la masse du trou noir en brisant un faisceau d'énergie négative sur le trou, ce qui mettrait en défaut

le principe de la censure cosmique. On créerait un tel faisceau à l'aide d'un miroir mobile, par exemple. En principe, une infime quantité d'énergie négative suffirait à changer radicalement l'état d'un trou noir extrême. C'est ainsi que l'énergie négative aurait le plus de chances de produire des effets macroscopiques.

Ni isolé ni de même amplitude

Malheureusement (ou heureusement, selon le point de vue), bien que la théorie quantique admette l'existence d'énergie négative, elle prescrit des limites à son amplitude et à sa durée. Ces inégalités quantiques ont été évoquées pour la première fois par L. Ford, en 1978 ; depuis, elles ont été démontrées et affinées.

Ces inégalités ressemblent au principe d'incertitude d'Heisenberg. Elles stipulent qu'un faisceau d'énergie

négative ne peut pas être arbitrairement intense pendant un temps arbitrairement long. L'amplitude de l'énergie négative est inversement proportionnelle à son étendue spatio-temporelle : une impulsion intense d'énergie négative ne dure qu'un temps très bref ; une impulsion faible dure plus longtemps. De surcroît, une impulsion initiale d'énergie négative est nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive d'intensité supérieure (voir la figure 6). Plus l'amplitude de l'énergie négative est importante, plus sa contrepartie en énergie positive doit arriver peu de temps après. On peut se représenter l'énergie négative comme un prêt énergétique : de la même manière qu'une dette est de l'argent négatif que l'on doit rembourser, l'énergie négative est un déficit d'énergie qui doit être compensé. Examinons comment l'analogie se prolonge.

Dans l'effet Casimir, la densité d'énergie négative entre les deux plaques peut persister indéfiniment, mais la densité d'énergie négative n'est notable que si l'écart entre les plaques est très faible : la densité d'énergie négative est inversement proportionnelle à la puissance quatrième de la distance entre les plaques. Les inégalités quantiques indiquent que la densité d'énergie entre les plaques peut être rendue encore plus négative que la valeur observée dans l'effet Casimir, mais seulement temporairement ; plus on réduit la densité d'énergie au-dessous de la valeur Casimir, plus bref est l'état obtenu.

Les inégalités quantiques imposent que les tailles des trous de ver et des tubes de S. Krasnikov soient submicroscopiques ou que l'énergie négative soit restreinte à des bandes extrêmement étroites. En 1996, nous avons calculé que les trous de ver submicroscopiques auraient un rayon inférieur à 10^{-32} mètre environ. Cette longueur est légèrement

supérieure à la longueur de Planck -10^{-35} mètre -, qui est la plus petite longueur possible ayant un sens physique. Nous avons calculé que l'on pourrait créer des trous de ver macroscopiques si l'on confinait l'énergie négative dans un intervalle extrêmement étroit autour de l'entrée du trou. Par exemple, sous certaines hypothèses, on détermine qu'un trou de ver dont le rayon d'entrée est égal à un mètre contraint l'énergie négative à n'être que dans un intervalle de 10^{-21} mètre, un million de fois plus petit que la taille d'un proton. D'après les estimations de M. Visser, l'énergie négative nécessaire à un trou de ver de cette taille correspond à l'énergie totale émise par dix milliards d'étoiles en un an. Les problèmes sont analogues avec les trous de ver plus

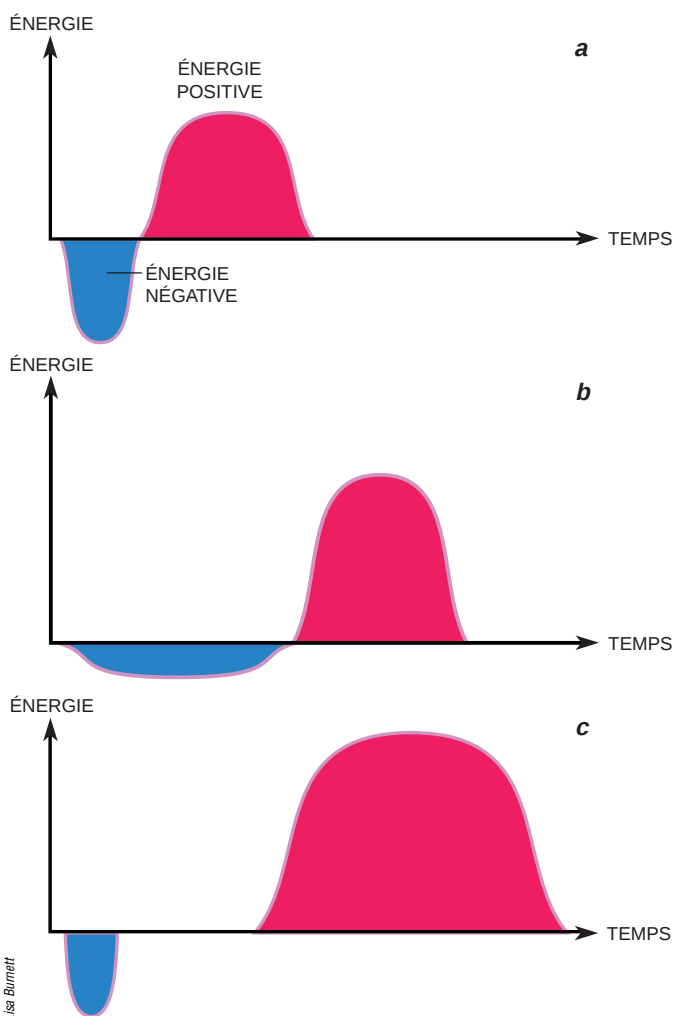
gros. Avec les mêmes hypothèses, l'épaisseur maximale possible de l'intervalle d'énergie négative est proportionnelle à la racine cubique du rayon d'entrée. En augmentant le rayon d'entrée jusqu'à une année-lumière, l'énergie négative reste confinée à une région plus petite que le rayon d'un proton, et la quantité totale nécessaire augmente linéairement avec la taille du trou d'entrée.

Ceux qui voudront maîtriser les trous de ver devront résoudre le difficile problème de confiner de grandes quantités d'énergie négative dans des volumes extrêmement minces. Certaines théories cosmologiques supposent l'existence de «cordes cosmiques», où de très fortes densités d'énergie sont réparties le long de longues lignes étroites, mais tous les modèles de cordes

cosmiques physiquement acceptables ont des densités d'énergie positives.

La propulsion par déformation de l'espace-temps semble encore plus difficile. Le modèle de M. Alcubierre, qui considère une bulle d'espace-temps qui se déplacerait dix fois plus vite que la lumière, impose des parois d'une épaisseur maximale de 10^{-32} mètre. Une bulle ne pourrait contenir un vaisseau stellaire de 200 mètres de long que si la quantité totale d'énergie négative était équivalente à dix milliards de fois la masse de l'Univers observable. Les difficultés sont analogues pour le tube supraluminique de S. Krasnikov. Chris Van Den Broeck, à Louvain, a récemment modifié le modèle de M. Alcubierre. Moins d'énergie négative est nécessaire, mais le vaisseau stellaire doit alors rentrer dans une bouteille d'espace-temps courbé dont le goulot aurait moins de 10^{-32} mètre de diamètre. Ainsi, au total, la construction de trous de ver et de couloirs d'espace-temps utilisables semble très improbable.

Les inégalités quantiques empêchent la violation du deuxième principe. Quand on essaie de refroidir

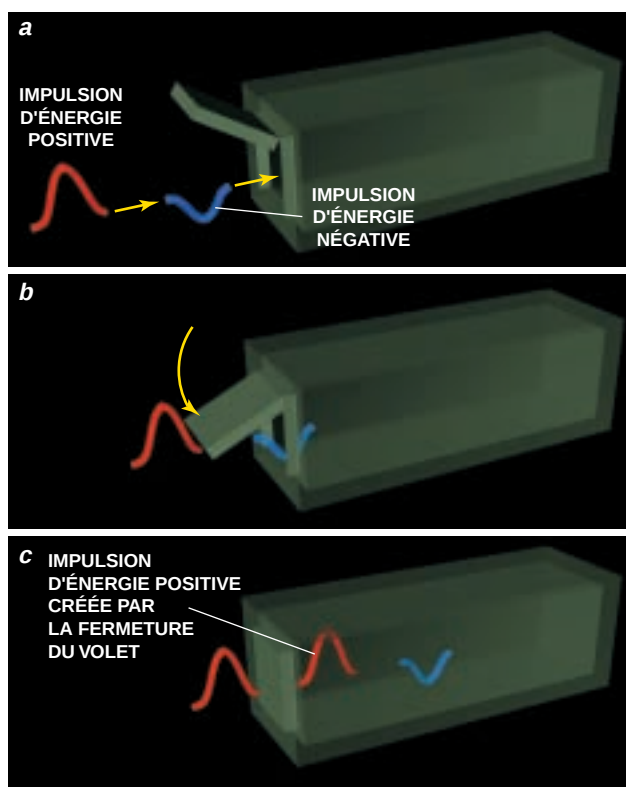


6. DES IMPULSIONS D'ÉNERGIE NÉGATIVE sont envisageables, mais sous certaines conditions. Premièrement, plus l'impulsion est longue, plus elle doit être faible (a,b). Deuxièmement, elle doit être suivie d'une impulsion d'énergie positive. L'amplitude de l'impulsion positive est nécessairement supérieure à celle de l'impulsion négative initiale. Troisièmement, plus les deux impulsions sont séparées dans le temps, plus l'impulsion positive doit être importante : cet effet est nommé «intérêt quantique» (c).

dir un objet chaud à l'aide d'une impulsion d'énergie négative, l'objet est presque immédiatement réchauffé par une impulsion supérieure d'énergie positive. La contrepartie positive d'une faible impulsion d'énergie négative pourrait être différée, mais les effets de l'énergie négative seraient alors indiscernables de ceux des fluctuations thermiques normales. Apparemment, on ne peut ni capter l'énergie négative ni la dissocier de l'énergie positive. On a cherché si l'énergie négative serait piégée par une boîte munie d'un volet, vers laquelle on dirigerait un faisceau d'énergie négative ; toutefois la fermeture du volet crée un flux d'énergie positive qui neutralise l'énergie négative (voir la figure 7).

Flash cosmique et intérêts quantiques

Nous avons montré l'existence de restrictions analogues pour la violation de la censure cosmique. L'injection d'une impulsion d'énergie négative dans un trou noir chargé détruirait momentanément l'horizon des événements, faisant exploser la singularité qu'il contient. Cependant cette impulsion étant nécessairement suivie d'une impulsion d'énergie positive, la singularité nue serait immédiatement retransformée en un trou noir ; nous nommons un tel phénomène un «flash cosmique». Pour observer ce flash cosmique, on doit augmenter l'écart temporel entre l'énergie négative et l'énergie positive, afin que la singularité reste nue le plus longtemps possible. Or, dans ce cas, l'amplitude de l'impulsion d'énergie négative serait nécessairement très faible, en raison des inégalités quantiques. Le changement de masse du trou noir, dû à l'énergie négative, serait alors noyé dans le bruit des fluctuations quantiques normales de la masse du trou noir, qui sont la conséquence naturelle du principe d'incertitude d'Heisenberg. Le spectacle de la singularité nue serait brouillé, si bien qu'un observateur lointain ne pourrait vérifier sans ambiguïté la violation de la censure cosmique. Avec Frans Pretorius, de l'Université



7. CET ESSAI DE CONTOURNEMENT des lois quantiques qui gouvernent l'énergie négative est voué à l'échec. L'expérimentateur tente de séparer une impulsion d'énergie négative de l'impulsion compensatoire d'énergie positive. Tandis que les impulsions s'approchent d'une boîte (a), l'expérimentateur cherche à isoler l'impulsion négative en fermant le couvercle dès qu'elle est entrée (b). Cependant la fermeture du couvercle crée une seconde impulsion d'énergie positive à l'intérieur de la boîte (c).

Michael Goodman

sions. Aussi les impulsions négatives et positives ne peuvent-elles jamais s'annuler exactement ; l'énergie positive dominera toujours. On nomme «intérêt quantique» cet effet de surcompensation. Autrement dit, si l'on considère l'énergie négative comme un prêt d'énergie, le prêt doit être remboursé avec les intérêts. Plus la période sur laquelle le prêt aura été accordé est longue, ou plus le montant du prêt est important, plus les intérêts sont élevés. En outre, plus le prêt est important, moins son remboursement peut être différé : Dame Nature est une banquière implacable qui n'épouge aucune dette.

Le concept d'énergie négative intervient dans de nombreux domaines de la physique : la gravitation, la théorie quantique, la thermodynamique. L'existence d'un lien entre ces domaines montre que les lois de la nature ont une structure logique contrainte. D'un côté, l'existence d'énergie négative semble être le seul moyen de relier les trous noirs

et la thermodynamique. D'un autre côté, la physique quantique interdit la production illimitée d'énergie négative, qui violerait le deuxième principe de la thermodynamique. Les physiciens cherchent aujourd'hui si ces restrictions font également partie intégrante d'une théorie sous-jacente plus puissante, telle une théorie unifiée de la gravitation. La nature, n'en doutons pas, nous réserve encore bien des surprises.

Lawrence FORD est professeur de physique à l'Université Tufts. Thomas ROMAN est professeur de physique à l'Université du Connecticut.

Jean-Pierre LUMINET, *Les trous noirs*, Éditions du Seuil, 1992.

Kip S. THORNE, *Black Holes and Time Warps : Einstein's Outrageous Legacy*, W.W. Norton, 1994.

Lawrence FORD et Thomas ROMAN, *Quantum Field Theory Constrains Traversable Wormhole Geometries*, in *Physical Review D*, vol. 53, n° 10, pp. 5496-5507, 15 mai 1996.

Matt VISSER, *Lorentzian Wormholes : From*

Einstein to Hawking, American Institute of Physics Press, 1996.

M.J. PFENNING et L.H. FORD, *The Unphysical Nature of Warp Drive*, in *Classical and Quantum Gravity*, vol. 14, n° 7, pp. 1743-1751, juillet 1997.

Paul DAVIES, *Paradox Lost*, in *New Scientist*, vol. 157, n° 2126, p. 26, 21 mars 1998.

Paul J. NAHIN, *Time Machines : Time Travel in Physics, Metaphysics, and Science Fiction*, seconde édition, AIP Press, Springer-Verlag, 1999.

Lawrence FORD et Thomas ROMAN, *The Quantum Interest Conjecture*, in *Physical Review D*, vol. 60, n° 10, article n° 104018 (8 pages), 15 novembre 1999.

