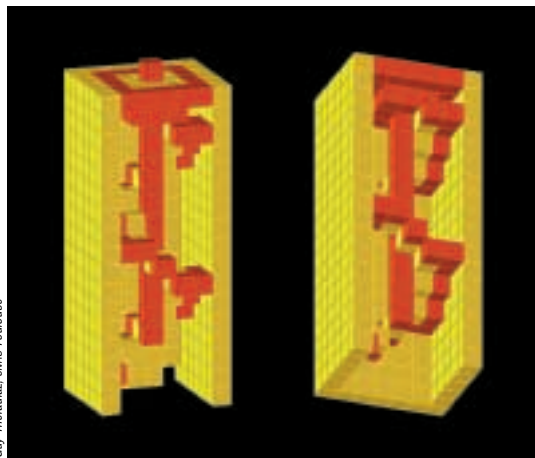




Guy Théraulaz, CNRS Toulouse

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)

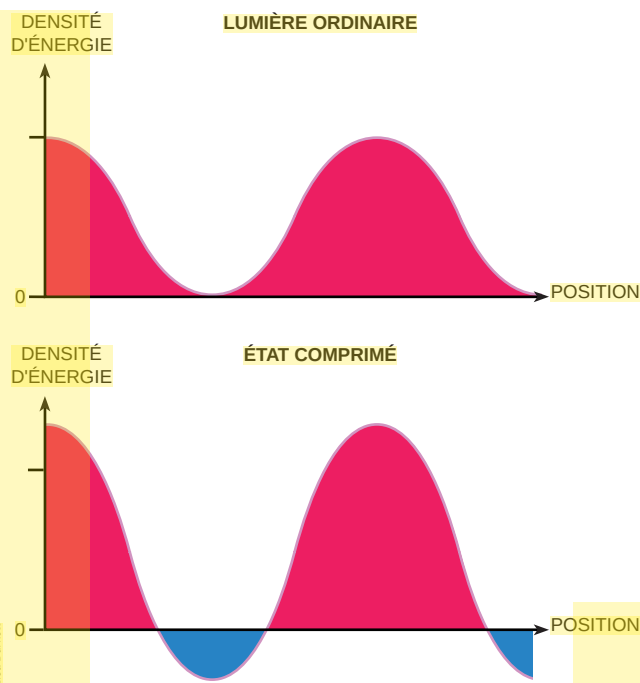


négligeable, l'annihilation ne libérerait aucune énergie. D'autre part, l'énergie négative n'est pas l'énergie associée à la constante cosmologique qui est postulée dans les théories inflatoires de l'Univers (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, *Pour la Science*, mars 1999). Cette constante correspond 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.

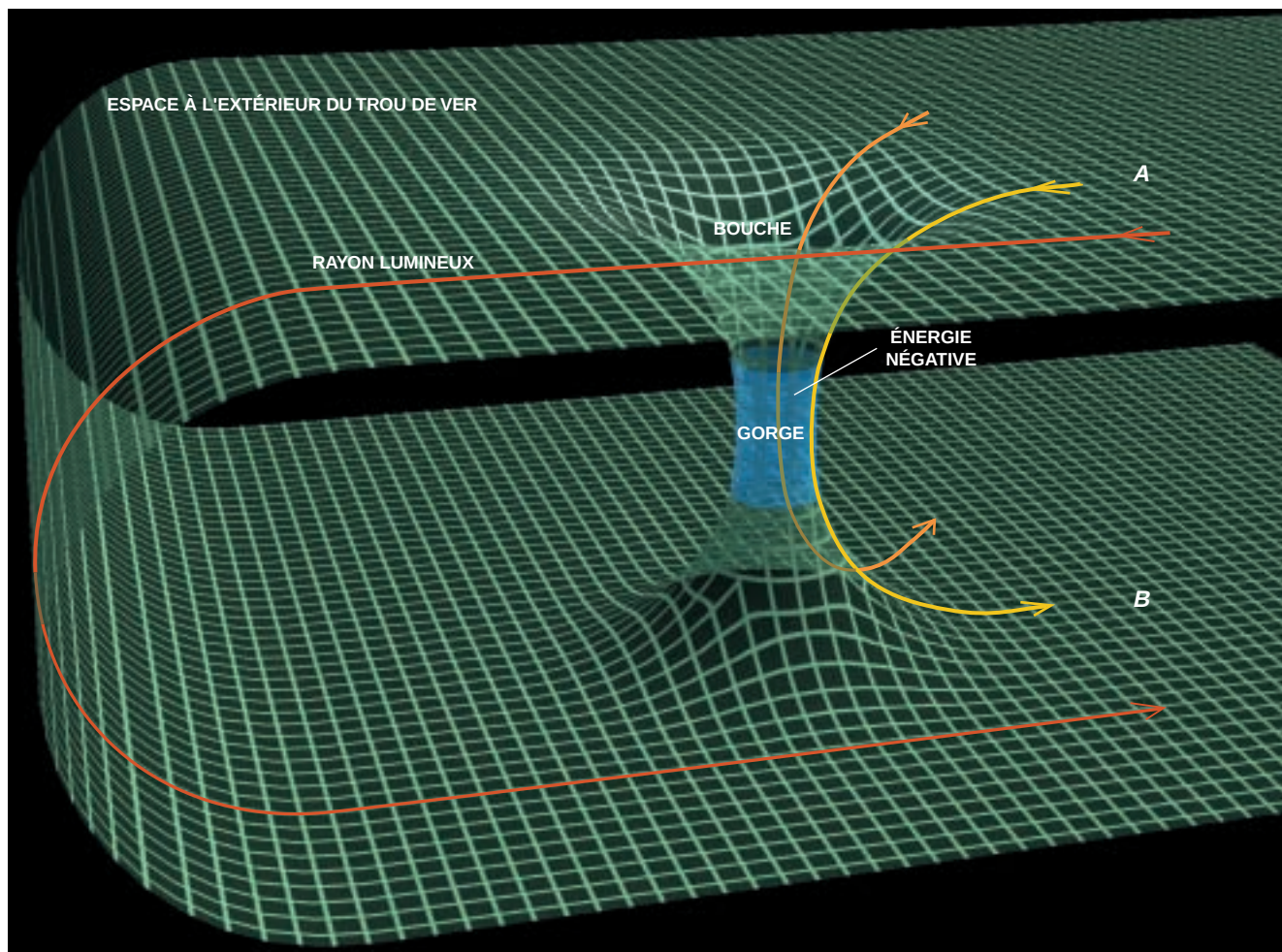
Un trou de ver n'est utilisable que s'il laisse passer des signaux sous forme de rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements pénétrant dans l'une des bouches du trou de ver sont convergents, mais, pour ressortir, ils doivent se défocaliser ; autrement dit, ils doivent passer de la convergence à 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.