

Attention, l'ombre va avoir un accident!

Les enfants âgés de moins de huit ans prennent les ombres pour des entités à part entière.

Lucky Luke est plus rapide que son ombre : voilà qui ne doit pas étonner outre mesure les enfants âgés de moins de huit ans. Michèle Molina et François Jouen, de l'Université de Rouen et de l'École pratique des hautes études à Paris, viennent de réaliser une expérience qui montre que les enfants considèrent les ombres comme des objets solides et compacts, distincts des objets qui les créent.

De nombreux psychologues ont essayé de comprendre comment les enfants perçoivent et conçoivent les objets physiques. D'après les études réalisées par Elisabeth Spelke, de l'Université de Cornell, les enfants distinguent les objets dans l'environnement grâce à l'utilisation de trois principes fondamentaux : le principe de contact (l'action sur un objet n'est possible que s'il y a contact) ; celui de cohésion (la forme de l'objet ne varie pas quand il se déplace) ; et celui de continuité (les trajectoires sont continues). La contrainte de solidité des objets découle de ces trois principes. En revanche, rares sont les études sur les étranges traces sombres qui accompagnent les objets : les ombres.

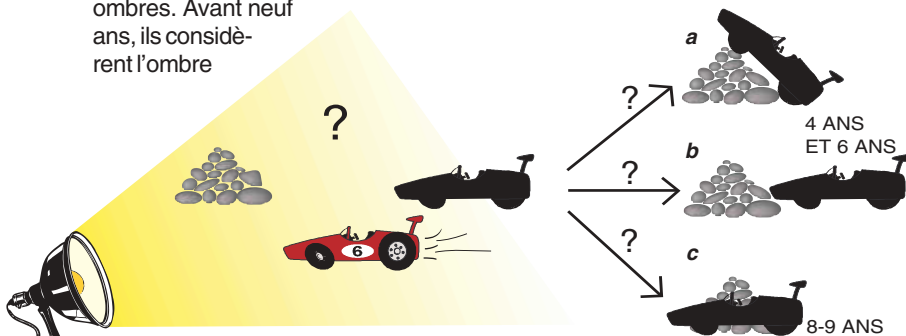
Le psychologue suisse Jean Piaget avait déjà défini plusieurs stades de conception des ombres chez les enfants. Au début, ils considèrent que l'ombre correspond à un objet isolé. Puis, à partir de l'âge de huit ans, ils établissent une relation entre l'ombre et une source lumineuse, mais ils croient toujours que les ombres continuent à exister la nuit. Vers l'âge de neuf ans seulement, les enfants comprennent le rôle de la lumière dans la production des ombres. Avant neuf ans, ils considèrent l'ombre

comme une entité, mais lui attribuent-ils les mêmes propriétés qu'aux objets ?

Pour répondre à cette question, M. Molina et F. Jouen ont réalisé une expérience auprès de 30 enfants, classés en trois groupes selon leur âge : quatre ans, six ans, et huit à neuf ans. Ils cherchaient à déterminer si les enfants appliquent aux ombres (comme aux objets) la contrainte de solidité, bien que les ombres violent les trois principes liés aux objets. Dans l'expérience, une voiture miniature se déplace sur un rail. Une lampe l'éclaire et projette son ombre sur un écran derrière la voiture. Un obstacle (un tas de galets) est placé sur la trajectoire de l'ombre. On demande aux enfants d'imaginer ce qu'il va se passer lorsque la voiture avance, et que son ombre arrive sur l'obstacle. Ils ont le choix entre trois possibilités, représentées par des dessins proposés selon un ordre aléatoire : l'ombre de la voiture grimpe sur les galets ; elle s'arrête devant ; ou elle passe à la surface des galets.

Les réponses des enfants âgés de quatre et six ans sont identiques. Selon neuf sur dix d'entre eux, l'ombre de la voiture va s'arrêter devant le tas de galets ou alors elle va le gravir, comme une vraie voiture. Au contraire, dans le groupe des enfants de huit à neuf ans, neuf sur dix donnent la bonne réponse, contraire à la contrainte de solidité des objets : l'ombre glisse sur les galets.

Dans une seconde expérience, l'ombre de la voiture rencontre non plus le tas de galets réel, mais une autre ombre. Pour les enfants âgés de moins de huit ans, l'ombre se comporte face à une autre objet. Seuls les plus âgés savent que les deux ombres se fondent. Ces deux expériences renforcent l'idée que les savoirs des enfants se « différencient » avec l'âge, que les enfants créent de nouvelles « catégories » à mesure de leur développement. Les psychologues vont maintenant étudier si les enfants attribuent des propriétés « humaines » aux ombres formées par des personnes.



Trois groupes d'enfants respectivement âgés de quatre ans, six ans et huit à neuf ans sont interrogés : comment se « comportera » l'ombre de la voiture rouge projetée sur un écran quand elle arrivera sur l'obstacle, le tas de pierres. Selon les enfants de quatre et six ans, l'ombre passe par-dessus l'obstacle (a) ou elle s'arrête devant (b) : pour les jeunes enfants, l'ombre est un « objet ». Les enfants plus âgés donnent la bonne réponse : l'ombre glisse sur l'obstacle (c).

BRÈVES

L'âge du capitaine

Quel âge a votre capitaine ? Le capitaine étant un gros poisson des eaux douces africaines, la sclérochronologie peut apporter la réponse. Cette technique consiste à compter les stries de croissance des pièces calcifiées des poissons, telles les otolithes. Le biologiste est aujourd'hui aidé dans cette tâche par un logiciel mis au point à l'Institut de recherche et de développement, l'IRD. Cet outil informatique fournit des images numériques sur lesquelles les stries de croissance sont représentées par des régions translucides alternant avec des zones opaques. La détermination de l'âge de certains poissons pourrait améliorer la gestion des ressources halieutiques.

Naine blanche et matière noire

Plus de 90 pour cent de la matière de l'Univers n'est pas détectable par la lumière qu'elle émet et ne se manifeste que par ses effets gravitationnels. On sait que, dans notre galaxie, une grande partie de cette matière est localisée dans le halo, une sphère de gaz et d'étoiles. Les astronomes pensaient qu'une partie de la matière noire s'y trouvait sous forme d'étoiles peu lumineuses, notamment des naines blanches, des restes très denses d'étoiles de type solaire. Toutefois, Céline Reylé, Annie Robin, de l'Observatoire de Besançon et Michel Crézé, de l'Université de Bretagne-Sud, viennent d'établir un modèle de notre galaxie, et ont montré qu'un grand nombre de naines blanches que l'on croyait localisées dans le halo appartiennent, en fait, au disque de la Voie lactée. Les naines blanches ne semblent pas constituer plus de un pour cent de la mystérieuse masse sombre du halo galactique. La question de l'origine de la masse noire reste ouverte.

Hibernatus avait des puces!

Le corps gelé de cet homme, surnommé l'Homme de Hauslabjoch, Ötzi ou Hibernatus, a été découvert dans les glaces des Alpes italiennes en 1991. Il vivait il y a 5 300 ans à la frontière entre l'Autriche et de l'Italie. Une équipe de paléontologues de l'Université d'Innsbruck l'ont rapidement décongelé, puis recongelé en 1999, pour prélever des échantillons de peau, d'ADN, ou encore de vêtements. Deux puces de la même espèce, parasite de l'homme, ont été retrouvées sur ces vêtements. L'analyse ne dit pas si elles étaient savantes.



Obésité et diabète

De nombreux obèses développent un diabète, cependant, on ignorait le lien entre les deux maladies. Les équipes de Philippe Froguel, de l'Institut Pasteur de Lille, et de Takashi Kadowaki, de l'Université de Tokyo, ont mis en évidence le rôle d'une hormone, l'adiponectine, sécrétée par le tissu adipeux, dans l'apparition d'un diabète chez les obèses. En effet, quand le gène de cette hormone est muté, d'une part, les graisses s'accumulent dans la ceinture abdominale, d'autre part, l'organisme résiste à l'action de l'insuline, qui normalise la concentration en sucre dans le sang. De nouveaux médicaments devraient être fondés sur ces résultats.

Mélodie au piano

Comment une mélodie se dégage-t-elle de toutes les notes jouées par un pianiste? Inconsciemment, il joue les notes de la mélodie en attaquant légèrement plus fortement les touches du piano, révèle une étude menée par Werner Goebel, de l'Institut de recherche en intelligence artificielle, à Vienne. Ce dernier a équipé les touches d'un piano de capteurs, et il a calculé la vitesse des marteaux, pour deux morceaux joués par 22 pianistes. Il a montré que les notes de la mélodie sont jouées 20 à 30 millièmes de seconde en avance par rapport aux autres notes.

Baby-blues avant l'accouchement

La dépression post-natale est reconnue, mais elle serait moins fréquente que celle qui touche les femmes avant l'accouchement. Le baby-blues est fréquent avant l'accouchement, d'après une étude menée par une équipe de psychiatres et d'obstétriciens de Bristol, sur 14 000 femmes ayant accouché : 13,5 pour cent des femmes présentent de signes de dépression après 32 semaines de grossesse, contre neuf pour cent huit semaines après l'accouchement.

Méditer nuit à la santé

La fréquentation des temples et des églises pourrait se révéler dangereuse pour la santé. D'après une étude faite par des chimistes de l'Université de Cheng Kung, à Taiwan, la combustion de l'encens dégage des hydrocarbures aromatiques polycycliques, qui sont des substances cancérigènes : dans un temple bouddhiste, ils ont mesuré que la concentration en benzopyrène était presque 45 fois supérieure à celle qui règne au domicile des fumeurs. Méditez, mais aérez!



Tendre calcaire et vieilles gravures

Ornée de nombreuses gravures, la grotte de Cussac livre de nouveaux trésors de l'art pariétal.

Cussac est le «Lascaux de la gravure» et Lascaux «la Chapelle Sixtine de la peinture pariétale». Ces citations, du conservateur de la grotte de Lascaux, Jean-Michel Geneste, et de l'Abbé Breuil, le pionnier de l'étude de l'art pariétal, résument en quelques mots l'intérêt et l'importance de la grotte de Cussac, en Dordogne.

Lorsqu'en octobre 2000, le spéléologue Marc Delluc emmène Norbert Aujoulat, du Centre national de la préhistoire, à Périgueux, et son confrère Christian Archambeau, reconnaître une grotte, aucun des deux ne s'attend à une découverte de cet intérêt. L'entrée, fort petite, est située à trois kilomètres de la rivière Dordogne. Après avoir rampé le long d'un étroit tunnel, puis s'être faufilés sous un éboulis instable, les préhistoriens parviennent dans une grande galerie de 15 mètres de largeur sur dix mètres de hauteur, apparemment très longue. Là, plus d'une centaine de gravures, à l'évidence très anciennes et d'un style nouveau, les attendent. Tout le bestiaire de l'art pariétal y est représenté : bisons, mammoths, bouquetins, chevaux, rhinocéros. À cela s'ajoutent des représentations animales rares (oiseaux, bêtes au mufler allongé,...) ainsi que des images de femmes et de triangles pubiens.

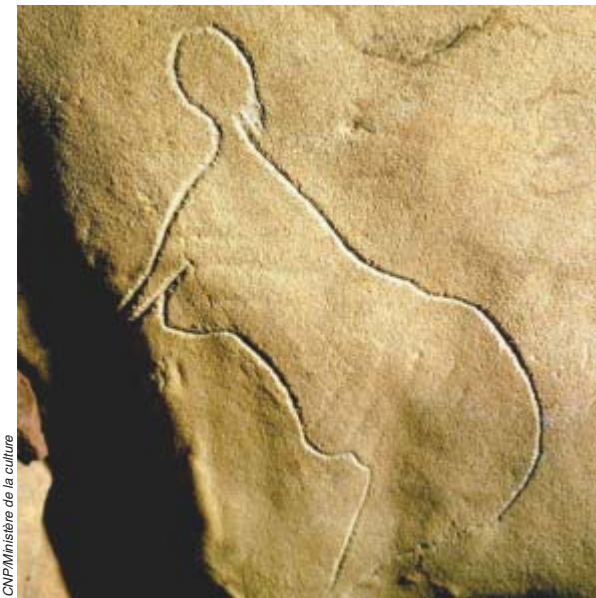
Quoique primitives, ces gravures sont très esthétiques. Elles sont inscrites dans un calcaire ocre, assez tendre pour que les anciens artistes l'aient incisé à l'aide d'une pointe de bois ou de silex, voire avec les ongles. Elles sont d'une taille inhabituelle dans l'art pariétal : les grands panneaux combinent des figures dont certaines mesurent plusieurs mètres de hauteur. Elles ont été réalisées sur des pans rocheux mis à nu par la chute d'énormes blocs. Les surfaces lisses et planes ainsi formées s'élèvent en surplomb. Sans doute les artistes paléolithiques se juchaient-ils sur le bloc effondré afin d'atteindre les parties les plus élevées du panneau.

Les préhistoriens associent le caractère archaïque des figures et certaines des conventions graphiques qu'elles contiennent à une période ancienne du Paléolithique. Ils estiment qu'il s'agit probablement du Gravettien, une période allant de -28 000 à -22 000 ans (cette période doit son nom à celui de Gravette, situé à seulement quatre kilomètres). Le Gravet-

tien a précédé le dernier maximum glaciaire qui a eu lieu vers -20 000 ans.

Selon N. Aujoulat, les formes des gravures, les thèmes et les associations thématiques permettent de rapprocher la grotte de Cussac de celle de Pech Merle, dans le département du Lot. Découverte en 1922, cette grotte contient de nombreuses gravures et peintures très bien conservées, dont certaines ont été réalisées vers -25 000 ans. Les points communs entre les styles des deux grottes intéressent les préhistoriens, car les grottes de Cussac et de Pech Merle se trouvent dans la même zone interfluviale, qui sépare le Lot et la Dordogne. Toutefois, la comparaison approfondie des styles artistiques des deux grottes ne se fera qu'après l'évaluation scientifique de celle de Cussac. Pour le moment, le site a seulement été protégé (dans des conditions exemplaires grâce à son découvreur M. Delluc). Les préhistoriens vont y faire installer une plateforme de circulation en inox suspendue au niveau du sol. Cette précaution prise, ils ne pénétreront plus dans la grotte qu'en chaussons quand ils iront répertorier les œuvres et étudier les traces de passage dans la grotte. Celles-ci comprennent notamment les restes de sept squelettes d'adultes, des traces de pas, des griffures d'ours, mais apparemment aucun objet ou autre mobilier préhistorique.

Presque intact, l'un des squelettes semble être celui d'un homme mort couché sur le ventre. Très incomplets et sans connexions anatomiques, les autres ossements sont disposés en tas dans des cuvettes qui semblent avoir été des bauges à ours. Les archéologues ont prélevé un peu de matière sur chaque squelette afin de les dater. Les résultats permettront de confirmer que ces ossements datent bien du Gravettien, ou d'une période postérieure.



Une des gravures de la grotte de Cussac.

Stalagmites sous-marines

Un nouveau type de sources hydrothermales a été découvert dans l'Atlantique.

Au milieu des océans, la croûte océanique se sépare en deux plaques qui s'éloignent l'une de l'autre, laissant remonter du magma des entrailles de la Terre. Ce magma, lors de sa remontée, se refroidit et se solidifie, donnant naissance à de vastes reliefs, les dorsales océaniques, qui sont le siège d'une activité hydrothermale : l'eau de mer pénètre dans la croûte à travers des réseaux de fissures et descend à quelques kilomètres de profondeur où la roche est chaude. Là, au contact des roches, elle se charge en minéraux, qui, quand l'eau remonte à la surface de la dorsale, précipitent et forment par accréation des structures solides aux formes variées : les sources hydrothermales. Les plus spectaculaires sont des cheminées de plusieurs dizaines de mètres de hauteur, sortes de vestiges d'une cité engloutie. Une équipe composée d'océanographes et d'un minéralogiste vient de découvrir un nouveau type de sources hydrothermales qui se distinguent de celles déjà répertoriées par leur distance à la dorsale médio-atlantique (les sources ne sont pas situées sur la dorsale même, mais à une quinzaine de kilomètres) et par un environnement chimique original.

C'est au large du Sud du Maroc, que l'équipe menée par Deborah Kelley de l'Université de l'État de Washington a découvert ce nouveau type de sources hydrothermales. Descendus sur le plancher océanique, à 700 mètres de profondeur, à bord du sous-marin d'exploration *Alvin*, ils ont été les premiers à contempler un ensemble de structures qui se détachent du fond par leur blancheur. La «Cité perdue» regroupe des sources actives ou éteintes : flèches, monticules, cheminées (dont l'une, de 60 mètres de hauteur, est la plus haute répertoriée à ce jour). Les sources présentent une arborisation importante sur leurs flancs, et une couche blanche les recouvre (signe de jeunesse de la couche minérale).

La majorité des sources hydrothermales connues naissent sur le sol jeune des dorsales océaniques composé de magma fraîchement solidifié, et émettent des fluides hydrothermaux chauffés à plus de 300 °C. Les sources de la Cité perdue, à 15 kilomètres de la dorsale, laissent échapper un fluide dont la température est inférieure : entre 40 et 75 °C.

Sur une dorsale océanique, la croûte nouvellement formée repousse la plaque océanique de part et d'autre. La vitesse d'écartement de la plaque océanique sur laquelle repose la Cité perdue est faible (1,2 centimètre par an) comparée à celle de la plaque pacifique (15 centimètres par an au niveau de l'île de Pâques). Les sources hydrothermales situées en dehors des dorsales et découvertes précédemment sont localisées dans des zones qui se déplacent à des vitesses intermédiaires entre ces deux valeurs. Or, cette vitesse détermine le type de roches présentes dans la croûte. Ainsi, pour des vitesses élevées, seules des roches issues de la fusion des couches superficielles du manteau terrestre (des basaltes) constituent la croûte, tandis que pour des vitesses inférieures, par exemple celles de la Cité perdue, des roches magmatiques dont la composition est proche des roches du manteau (des péridotites) affleurent. Quand un fluide hydrothermal s'échappe d'un sol basaltique, il est très acide. Au contraire, dans le cas de la Cité perdue, le sol est riche en péridotites et le fluide est basique.

À cause de la température peu élevée et du caractère basique, les minéraux qui précipitent sont des carbonates et des hydroxydes. La couleur blanche de ces minéraux contraste avec

celles des autres sources de l'Atlantique, où le fluide hydrothermal, chaud et acide, riche en fer et en composés du soufre, s'échappe des cheminées sous forme de grandes fumées noires.

La découverte, à la fin des années 1970, des premières sources hydrothermales se doublait d'une trouvaille importante : la vie foisonne dans ces régions plongées dans l'obscurité. Une multitude d'organismes tirent leur énergie de réactions chimiques qui ont lieu dans cet environnement, *a priori* hostile du fait de l'obscurité, des températures élevées et de la présence de composés toxiques dans les fluides émis. D. Kelley et ses collègues ont découvert que la Cité perdue abrite aussi des communautés microbiennes. Ces dernières sont combinées en filaments de plusieurs centimètres de longueur ou plaquées à la surface des cheminées. Des analyses du patrimoine génétique de ces micro-organismes préciseront s'ils sont spécifiques du site.

La question a longtemps été débattue de savoir comment s'étaient assemblées à la surface terrestre les premières molécules du vivant malgré l'intense rayonnement ultraviolet qui frappait la planète dans sa prime jeunesse. L'une des hypothèses est aujourd'hui que la vie serait apparue dans l'océan, près des sources hydrothermales. À des profondeurs certes abritées du rayonnement ultraviolet, mais privées d'énergie lumineuse, les sources représentent des oasis où les réactions chimiques qui ont enfanté la vie auraient été possibles. En outre, les sources sont riches en certains minéraux qui facilitent la formation de molécules biologiques (en servant notamment, sur les surfaces cristallines, de support pour la constitution de longues molécules à partir d'atomes isolés ou bien de catalyseurs de réactions chimiques). La Cité perdue, avec ses conditions favorables (fluide basique, présence de composés carbonés, température peu élevée), constitue l'un des environnements où la vie a pu apparaître.



Washington University/Woods Hole Oceanographic Institution

Structures découvertes à la Cité perdue (en haut une cheminée, en bas des cristallisations désordonnées). Elles sont recouvertes d'une couche minérale blanche.

Capture en plein vol

Les grandes noctules, des chauves-souris vivant en Europe, volant jusqu'à 500 mètres d'altitude, se nourrissent exclusivement d'insectes. Du moins le croyait-on. Une équipe espagnole a montré qu'elles apprécieraient aussi les petits oiseaux migrateurs nocturnes. L'analyse de leurs excréments a révélé de nombreux restes d'oiseaux passériformes, immense groupe de petits oiseaux auxquels appartiennent, notamment les moineaux, et qui survolent par millions l'Espagne durant leur migration. Les noctules ont une envergure qui peut atteindre 60 centimètres, elles ne pèsent pas plus de 50 grammes : ces conditions semblent leur permettre de capturer en vol les oiseaux dont elles se nourrissent. On croyait la capture des proies en vol l'apanage de certains rapaces, mais les noctules semblent l'utiliser.

Un anticorps contre le VIH

Un anticorps humain, nommé b₁₂, inhiberait l'activité du virus responsable du SIDA. Cet anticorps a été découvert dans la moelle osseuse d'un homme de 31 ans, séropositif, mais qui ne manifeste aucun symptôme de la maladie depuis six ans. Cet anticorps se lierait à un récepteur de surface du virus et l'empêcherait d'interagir avec ses cellules cibles.

Échec et maths

Apprendre en jouant n'est pas l'apanage des jeunes enfants. Dès la prochaine rentrée, les étudiants de l'Université d'Aberdeen, en Grande-Bretagne, vont pouvoir suivre des cours de doctorat en science des échecs. Pendant leur thèse, les étudiants, tous joueurs d'échecs, vont tenter de créer de nouveaux logiciels de jeu d'échecs, et de transposer les modes de raisonnement des joueurs à des programmes d'intelligence artificielle.

Trio en symbiose

Drôle de cohabitation dans les eaux bleues autour de l'île d'Elbe ! Les biologistes de l'Institut Max Planck, à Brême, en Allemagne, ont découvert des organismes qui vivent en symbiose, non pas à deux, mais à trois : un ver et deux bactéries. Le ver abrite les deux bactéries, qui, en échange, nourrissent leur

hôte dépourvu de tube digestif. La première transforme les sulfates de l'eau de mer en sulfures, que la seconde oxyde. Une première !



Les visions de la Pythie

On aurait découvert l'origine des gaz qu'inhalait la Pythie pour rendre les oracles.

En 480 avant notre ère, les Athéniens, en guerre contre les Perses, s'enquirent auprès de l'oracle de Delphes de la conduite à adopter devant l'offensive ennemie, mais ne reçurent en réponse que des promesses de malheur : « A la flamme furieuse, Arès (le dieu de la guerre) livrera bien des temples, où les images des immortels se dressent aujourd'hui couvertes de sueur, tremblantes d'effroi, et du haut des toits ruisselle un sang noir, présage du désastre fatal. » On venait de tout le pays consulter Apollon, le fils de Zeus, par l'intermédiaire de l'oracle de Delphes. L'écrivain romain Plutarque a rapporté comment la cérémonie de l'oracle se déroulait : la Pythie, celle par qui s'exprimaient les dieux, se retirait dans une pièce située sous le temple d'Apollon où, en inhalant des vapeurs, elle entraînait en transe. Elle rendait ensuite l'oracle en des propos incompréhensibles, que seuls des prêtres savaient interpréter. Selon Plutarque, les gaz inhalés par la Pythie provenaient d'une fissure dans le sol ou d'une source d'eau. Cependant, l'excavation du temple à la fin du XIX^e siècle ne révéla ni fissure, ni trace de source. Une équipe constituée d'un géologue, d'un géochimiste, d'un archéologue et d'un médecin, propose aujourd'hui, après analyse de la géologie du sol, que celui-ci est suffisamment perméable pour laisser passer des gaz. En outre, ils ont découvert dans les eaux qui s'écoulent à proximité du site des traces d'éthylène qu'on sait responsable d'hallucinations. La diffusion de ce gaz par les roches vers l'intérieur du temple aurait été responsable des transes de la Pythie.

Delphes est localisée le long du golfe de Corinthe, dans une zone de forte activité sismique. Le golfe est le fruit de la tectonique des plaques qui repousse la partie Nord de la Grèce, l'Attique, de la partie Sud, le Péloponnèse. De nombreuses failles, parallèles au golfe, découpent le sol de la région. L'une d'elles, la faille de Delphes, passe précisément sous le sanctuaire ; de larges zones en sont visibles en surface. Jelle Deboer et ses collègues du Département des sciences de la Terre et de l'environnement de l'Université de Midd-



Zeus consultant l'oracle de Delphes.

letown ont découvert une autre faille, la « faille de Kerna », perpendiculaire à la faille de Delphes, qui passe aussi sous le temple d'Apollon. À cause de la rencontre des deux failles, le sol y est riche en fissures, où certains gaz, vaporisés par la chaleur, pourraient remonter en surface. On ne connaît pas le lieu exact de l'intersection des deux failles, mais, par extrapolation, elle semble située à la verticale du temple.

Y a-t-il des gaz dans le sol de Delphes susceptibles de donner des hallucinations ? Les gaz viendraient directement des roches ou seraient véhiculés sous forme dissoute par une source d'eau. On connaît aujourd'hui à proximité du temple deux sources, mais des recherches géologiques et archéologiques montrent qu'il devait en exister, dans l'Antiquité, au moins huit : à plusieurs endroits du sanctuaire, on trouve des travertins, des dépôts de minéraux laissés par une source. L'équipe a analysé l'eau qui s'écoule en contrebas du temple, ainsi que des échantillons des travertins, qui portaient peut-être la trace des gaz dissous dans les anciennes sources. Ils ont trouvé de l'éthylène dans la source et, dans les travertins, des traces de méthane et d'éthane. Le méthane et l'éthane sont faiblement toxiques, mais en s'accumulant dans la pièce où se retirait la Pythie, ils pouvaient produire des hallucinations. Quant à l'éthylène, c'est une molécule anciennement utilisée comme anesthésique. À faible dose, elle donne une légère sensation d'euphorie. À doses plus élevées, elle provoque délire et inconscience. Ces constatations concordent avec ce que Plutarque relate sur les vapeurs prophétiques : elles avaient une odeur sucrée et elles ont entraîné la mort d'une Pythie qui en avait trop inhalé.

Trous noirs et sursauts gamma

Les sursauts gamma sont les explosions les plus violentes de l'Univers. La formation de trous noirs dotés d'un champ électromagnétique expliquerait leur origine.

Les sursauts gamma sont de brèves émissions de rayonnements gamma et X, découvertes accidentellement en 1969 par des satellites militaires américains. Ils sont souvent suivis d'une émission tardive de rayons X et de lumière visible qui peut durer de quelques jours à quelques mois. Étant donné leur fréquence et leur répartition uniforme sur le fond du ciel, les astronomes pensent qu'il se produit chaque jour, une explosion énorme quelque part dans tout le volume de l'Univers observable. Les sursauts gamma semblent être les images de cataclysmes assez puissants pour être détectables sur des distances de plusieurs milliards d'années-lumière, ce qui équivaut à la production, pendant les quelques secondes du sursaut, d'une énergie comparable à celle qui est rayonnée par toutes les étoiles contenues dans toutes les galaxies de l'Univers observable ! Nous avons élaboré un modèle selon lequel ces événements hors du commun signaleraient la naissance de trous noirs dotés d'un champ électromagnétique.

Nous avons étudié l'effondrement d'une étoile en rotation dotée d'un champ électromagnétique. Beaucoup d'étoiles, le Soleil, par exemple, sont entourées d'un champ magnétique produit par des courants électriques dus à la circulation de la matière stellaire dans leurs profondeurs. Lorsque les couches internes d'une étoile massive se contractent, les lignes de force de son champ électromagnétique suivent le mouvement de la surface à laquelle elles sont ancrées et se resserrent rapidement. En d'autres termes, le champ est « concentré ». Lorsque l'étoile forme un trou noir, cette amplification est énorme, parce que le diamètre de la sphère de matière à laquelle le champ est attaché passe de quelques dizaines de millions de kilomètres à environ un kilomètre.

Or, en 1935, Werner Heisenberg montra qu'au-delà d'une valeur critique, un champ électromagnétique doit provoquer un phénomène qu'il nomma polarisation du vide. En effet, en mécanique quantique, on montre que le vide est, en permanence, rempli de paires de particules et d'antiparticules qui surgissent spontanément, avant de s'annihiler mutuellement. On qualifie ces particules de « virtuelles » parce qu'elles disparaissent presque immédiatement après leur formation. Cependant, en présence d'un champ électromagnétique intense, les paires d'électrons (de charge négative) et d'antiélectrons (de charge positive) sont durablement séparées par l'action du champ et ne s'annihilent pas immédiatement. De virtuelles, ces particules deviennent réelles. Ainsi, lorsqu'un trou noir doté d'un champ électromagnétique se forme, il est entouré d'une sphère, nommée dyadosphère (du grec *duas*, qui signifie paire) à l'intérieur de laquelle, le champ électromagnétique est capable de créer une énorme quantité d'électrons et d'antiélectrons en quelques cent milliardièmes de nanoseconde.

En 1975, l'un d'entre nous (Remo Ruffini) et Thibault Damour, de l'Observatoire de Paris, ont démontré que ce phénomène est le plus efficace pour extraire de l'énergie d'un trou noir. Contrairement aux étoiles, dont seuls quelques pour cent de la masse sont convertis en énergie au cours de leurs dix milliards d'années d'existence, la dyadosphère entou-

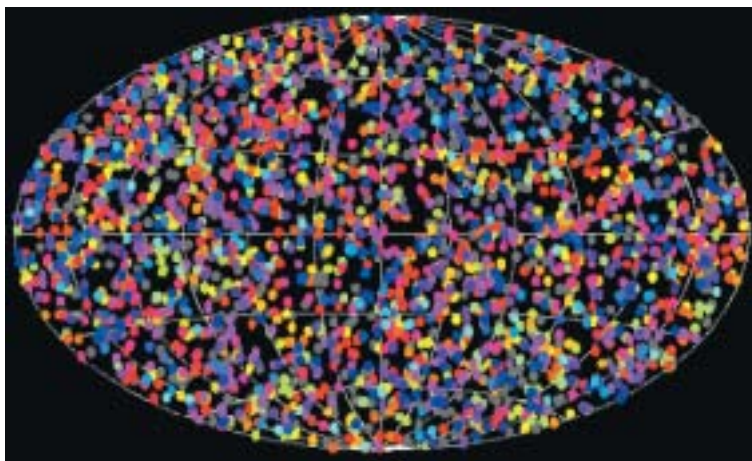
rant un trou noir doté d'un champ électromagnétique peut, en quelques secondes, convertir en énergie jusqu'à 50 pour cent de la masse de l'étoile qui lui a donné naissance.

La dyadosphère entre ensuite en expansion sous la forme d'une coquille de plasma formé d'électrons, d'antiélectrons et de photons gamma (produits par les collisions entre particules et antiparticules) que nous avons nommés impulsions électromagnétiques en paires. Expulsée à des vitesses proches de celle de la lumière, cette impulsion entre ensuite en collision avec les couches supérieures de l'étoile, essentiellement constituées d'hydrogène, qui n'avaient pas été absorbées par le trou noir. Ces restes enrichissent l'impulsion, en électrons, protons et neutrons, jusqu'à ce qu'elle arrive dans une région où le plasma est assez dilué pour être transparent : les photons gamma sont libérés brusquement et produisent le sursaut proprement dit. Par la suite, les protons, et autres particules lourdes accélérées par l'impulsion, viennent frapper le gaz raréfié du milieu interstellaire et provoquent un gigantesque feu d'artifice en rayons X, en lumière visible et en rayonnement radio responsable de l'émission tardive.

Nous avons comparé ce modèle avec les données fournies par trois observatoires spatiaux d'astronomie (BATSE, *X-Chandra*, et Rossi-XTE tous trois américains) pour un sursaut gamma intervenu le 12 décembre 1999. Les calculs s'accordent parfaitement aux observations.

Contrairement à la plupart des modèles proposés jusqu'ici pour expliquer les sursauts gamma, le nôtre ne dépend que de deux paramètres libres : l'énergie de la dyadosphère et la densité de matière dans les couches de l'étoile qui restent à l'extérieur du trou noir. Tous les autres (température, vitesse, densité du plasma, etc.) découlent directement de la théorie et sont parfaitement connus. Il est remarquable que ces prévisions soient valables aussi bien pour le sursaut proprement dit (qui se déroule sur des durées de l'ordre de la milliseconde et sur des distances de l'ordre du millier de kilomètres) que pour l'émission tardive (qui dure quelques mois et se produit à l'échelle de l'année-lumière). De surcroît, ce modèle explique pourquoi le satellite *Chandra* a détecté une raie spectrale du fer dans l'émission retardée de certains sursauts : elle serait produite par le fer contenu dans une étoile voisine lors de son explosion en supernova sous l'effet du choc avec le flash gamma. Il s'agirait là d'un nouveau mécanisme de formation des supernovae.

Remo RUFFINI, Carlo BIANCO, Federico FRASCHETTI, She-Sheng XUE, Université La Sapienza, Rome – Pascal CHARDONNET, IN2P3



La répartition des sursauts gamma (d'intensités différentes) sur le fond du ciel est uniforme d'après cette carte établie par le satellite BATSE. Les astronomes en déduisent qu'ils sont répartis de façon homogène dans l'Univers observable. Les sursauts sont les images de cataclysmes détectables à des milliards d'années-lumière.