

gné un autre article qui utilise des données confidentielles : le texte envisage la possibilité qu'une grosse météorite s'écrase sur la Terre.

La crainte d'un tel impact météoritique avait déjà conduit l'armée de l'air à publier les données des 17 premières années du programme *DSP*, depuis 1970. Les satellites *DSP* détectent l'énergie infrarouge libérée par des explosions dont l'intensité est supérieure à celle qui est libérée lors de la destruction d'un avion. Aussi, lorsqu'une météorite assez grosse pénètre dans l'atmosphère terrestre, elle explose en émettant une signature infrarouge spécifique, détectable par les satellites *DSP*.

Ayant accès aux mesures *DSP* plus récentes et à d'autres données, T. McCord a décrit une météorite qui a pénétré dans l'atmosphère le 1^{er} février 1994, au-dessus de l'océan Pacifique, non loin de l'île de Kosrae. Selon T. McCord, la masse de cette météorite était comprise entre 500 et 9 000 tonnes.

T. McCord a publié l'analyse de l'événement le 25 février 1995 dans le *Journal of Geophysical Research* : à partir des enregistrements des *DSP* et d'autres détecteurs, il a estimé l'orbite, la masse, la fragmentation et l'énergie libérée par la météorite (entre 34 et 630 kilotonnes). L'article précisait l'endroit où la météorite a été détectée pour la première fois (à 54 kilomètres d'altitude), sa trajectoire, son angle de pénétration dans l'atmosphère, sa désintégration, et comment les auteurs ont calculé son orbite et l'énergie libérée.

En revanche, T. McCord n'a pas décrit les capteurs utilisés ni mentionné leur embarquement dans les satellites *DSP*. Il indiquait seulement que les données provenaient de capteurs sensibles aux infrarouges et à la lumière visible, embarqués dans des engins du ministère américain de la Défense.

Renseignements d'urgence

Les membres du comité Médée ont aidé la communauté du renseignement à évaluer les dégradations environnementales et les catastrophes naturelles. Ces études écologiques sont devenues importantes, en 1993, lorsqu'une directive présidentielle décréta que les problèmes d'environnement sont des facteurs importants de la politique des États-Unis.

Par ses études de la Russie et de l'Europe de l'Est, le comité Médée a aidé les services de renseignements à évaluer les effets d'une série de marées noires dans la région de Komi, en Russie, et de la mise en décharge des armes chimiques russes dans l'Arctique. Selon un membre du NRO, les spécialistes du Bureau de cartographie et d'imagerie du ministère américain de la Défense ont appris quelques méthodes astucieuses de combinaison des données recueillies à différentes longueurs d'onde, pour créer une image unique contenant plus d'informations que chacune des images initiales.

Plusieurs membres du comité ont aussi participé au Groupe de travail sur l'environnement, présidé par le vice-président Al Gore et par le Premier ministre russe Viktor Chernomyrdine. Le groupe de travail a notamment échangé des images satellites, afin d'aider au nettoyage des zones entourant les installations militaires russes.

Puis, ensemble, les services secrets américains et le comité Médée ont étudié les inondations de l'hiver 1996-1997, en Californie du Nord, les dégâts causés par les ouragans dans le Sud-Est des États-Unis et les changements de régime du volcan de Montserrat, peu avant qu'il n'entre en éruption, en 1995. Dans ce dernier cas, ils ont alerté le gouvernement de l'île, qui a évacué 4 000 personnes de la zone dangereuse.

Enfin le comité a aidé les services forestiers américains qui n'avaient pas assez d'avions pour déterminer l'étendue des incendies en Alaska, en juin 1996. La tâche était aisée pour les satellites *DSP* et de reconnaissance.

L'avenir de Médée

Doit-on intensifier le programme Médée? Le gouvernement américain craint que l'utilisation de données secrètes par des organismes civils ne perturbe la discussion démocratique de leur politique : une telle utilisation interdirait aux responsables de donner l'ensemble des informations nécessaires aux prises de décision, de sorte que les experts extérieurs n'auraient pas accès aux données sur lesquelles ces politiques sont fondées. L'utilisation de systèmes de renseignements pour la recherche environnementale pourrait aussi freiner l'utilisation de satellites com-

merciaux de résolution suffisante pour la recherche environnementale – dont les résultats seront immédiatement disponibles pour un auditoire beaucoup plus vaste. Enfin, certains ont craint que les services de renseignements ne passent trop de temps à des tâches qui ne sont pas de leur ressort, mais selon Bo Tumas, directeur du programme Renseignement et environnement à la CIA, la collecte de données pour l'environnement occupe moins de un pour cent du temps des satellites de reconnaissance.

Malgré les difficultés, le comité Médée prépare une base de données importante sur l'environnement pour les scientifiques du XXI^e siècle. Au sein de la CIA, il promeut l'élargissement de la diffusion des données. Par exemple, les scientifiques de Médée ont déjà proposé de publier toutes les images satellites en rapport avec l'environnement jusqu'à aujourd'hui, quitte à réduire la résolution des satellites actuels en fournissant des images plus grossières. Les responsables de la CIA ont rejeté cette proposition, mais, sans le programme Médée, une telle possibilité n'aurait même sans doute jamais été envisagée.

Médée est autant une expérience que le fruit du travail de ses participants. Comme pour chaque expérience, il y aura des théories, des découvertes inattendues et, espère-t-on, des progrès à mesure que la collaboration entre les scientifiques et les espions mûrira.

Jeffrey RICHELSON travaille aux Archives pour la sécurité américaine, à Washington D.C.

Atlas de géographie de l'espace, sous la direction de Fernand Verger, éditions Belin, 1997.

Robert A. MACDONALD, *Corona : Success for Space Reconnaissance : A Look into the Cold War*, in *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, n° 6, pp. 689-720, juin 1995.

Gregg EASTERBROOK, *A Moment on the Earth : The Coming Age of Environmental Optimism*, Viking, 1995.

Scientific Utility of Naval Environmental Data, Medea Program Office, McLean, Va., 1995 (tel : 703-883-5265).

Scott PACE et al., *Using Intelligence Data for Environmental Needs : Balancing National Interests*, Rand, Santa Monica, Calif., 1997.

Les nouvelles théories des cordes

MICHAEL DUFF

Les physiciens qui cherchent à décrire tous les types de forces par un même formalisme ont amalgamé la théorie des cordes à une théorie des membranes et à une théorie des trous noirs.

La science serait un édifice achevé ? Toutes les découvertes importantes auraient déjà été faites ? C'est douteux : les deux principaux piliers de la physique du XX^e siècle, la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale, restent incompatibles : la relativité générale ne se plie pas aux lois quantiques, qui décrivent le comportement des particules élémentaires, tandis que les trous noirs ne sont pas décrits par la mécanique quantique. Cette difficulté est la promesse d'une révolution scientifique à venir.

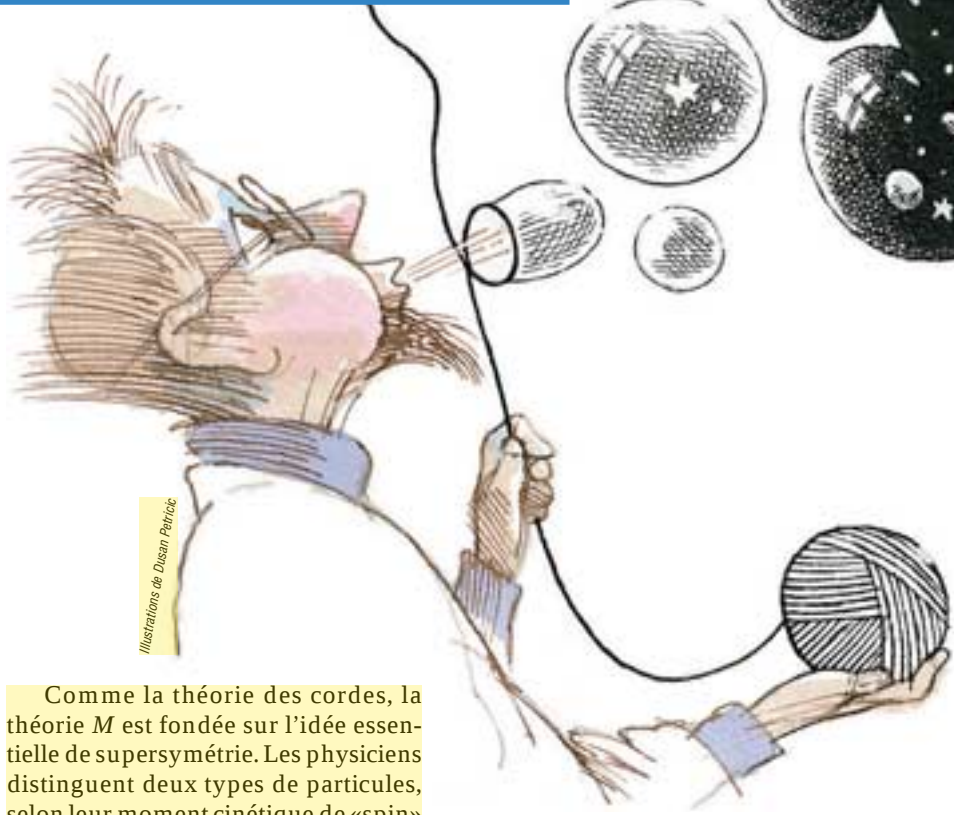
Encore récemment, on espérait que la théorie des cordes unifierait la gravitation et la mécanique quantique, et décrirait tous les phénomènes physiques à l'aide du même formalisme : les cordes sont des objets à une dimension dont on utilise les modes de vibration pour représenter les particules élémentaires. Puis, au cours des deux dernières années, la théorie des cordes a été détrônée par la théorie *M*, ou théorie des membranes, que nous examinerons plus loin. Chaque jour, cette théorie semble de plus en plus assurée : depuis l'apparition de la théorie des cordes, jamais la physique théorique ne s'est sentie aussi près du but.

Comme la théorie des cordes, la théorie *M* est fondée sur l'idée essentielle de supersymétrie. Les physiciens distinguent deux types de particules, selon leur moment cinétique de « spin » (le spin est un moment cinétique de rotation intrinsèque, comme si les particules tournaient sur elles-mêmes, à la façon de toupies). La supersymétrie stipule que, pour chaque particule connue dont le spin est un multiple entier de la constante de Planck (0, 1, 2, 3), il existe une particule de même masse ayant un spin demi-entier ($1/2$, $3/2$, $5/2$...), et vice versa.

Pourquoi les physiciens n'ont-ils découvert aucun de ces superpartenaires ? Ils supposent que la symétrie existe, mais qu'elle est « brisée » : les particules postulées seraient trop massives pour être observées dans les accélérateurs actuels. Malgré l'absence de confirmations de la supersymétrie, les théoriciens ont conservé leur foi en l'hypothèse, parce qu'elle permet d'unifier les interactions faible, électromagnétique et forte à la force de gravitation.

La supersymétrie transforme les coordonnées d'espace et de temps, de sorte que les lois de la physique soient les mêmes pour tous les observateurs. Comme la théorie de la relativité générale découle de cette condition, la supersymétrie peut décrire la gravitation. La supersymétrie prédit même la « supergravité », où une particule de spin égal à 2 – le graviton – transmet les interactions gravitationnelles et possède le gravitino comme partenaire supersymétrique de spin égal à $3/2$.

Cependant la relativité générale peut être généralisée à n'importe quel nombre de dimensions d'espace-temps (notre Univers a trois dimensions d'espace et une dimension de temps) : en principe, ses équations peuvent être écrites dans un espace à plus de quatre dimensions. En revanche, la super-



Illustrations de Dusan Petrovic



1. L'UNIVERS résulte-t-il de l'interaction de cordes, de bulles et de feuilletés dans des dimensions supérieures d'espace-temps ?

Witten (lauréat de la médaille Fields, en 1990) et d'autres physiciens observèrent que cette «hélécité» ne s'expliquait pas par une réduction du nombre de dimensions de onze à quatre.

Les *p*-branes

La théorie des supercordes à dix dimensions supplanta alors la supergravité. Plus précisément, cinq théories des supercordes s'opposaient : la théorie des cordes hétérotiques $E_8 \times E_8$, la théorie des cordes hétérotiques $SO(32)$, la théorie des cordes de type I $SO(32)$, les théories des cordes de type IIA et de type IIB. Une corde de type I est «ouverte», composée seulement d'un segment, tandis que les autres sont des cordes «fermées» qui forment des boucles. La théorie des cordes $E_8 \times E_8$ semblait – du moins en principe – expliquer les particules élémentaires et les interactions connues, y compris leur hélécité. Contrairement à la supergravité, les théories des cordes semblaient réconcilier la relativité et la mécanique quantique.

Après l'euphorie initiale, les partisans des théories des cordes ont toutefois déchanté. Tout d'abord, de nombreuses questions importantes semblaient insolubles par les méthodes classiques de calcul ; des techniques radicalement nouvelles étaient nécessaires. Ensuite, pourquoi cinq théories des cordes différentes ? Une seule est la bonne, mais laquelle ? Troisièmement, si la supersymétrie admet onze dimensions, pourquoi les théories de supercordes s'arrêtent-elles à dix dimensions seulement ? Enfin, pourquoi assimiler les particules ponctuelles à des cordes, et non à des surfaces ou, plus généralement, à des objets à p dimensions ?

Ainsi, alors que la plupart des théoriciens se préoccupaient de «super-spaghettis», un petit groupe préférait les «super-raviolis» et la théorie des membranes, ou théorie M . Une particule ponctuelle, de dimension nulle, laisse une trace unidimensionnelle, ou «digne d'Univers», quand elle évolue dans l'espace-temps (voir la figure 2). De même, une corde, à une dimension,

gravité limite le nombre de dimensions d'espace-temps à 11.

Au début des années 1920, le physicien polonais Theodore Kaluza et le physicien suédois Oskar Klein ont proposé que l'espace-temps ait une cinquième dimension cachée. Cette dimension supplémentaire ne serait pas infinie, contrairement aux autres ; elle se refermerait sur elle-même en un cercle où se propageraient des ondes quantiques de longueur d'onde appropriée. Selon la mécanique quantique, seules les ondes dont la longueur d'onde est un sous-multiple exact de la longueur du cercle s'y propageraient ; chacune correspondrait à une particule d'énergie particulière, de sorte que l'énergie des particules serait quantifiée.

Un observateur vivant dans les quatre autres dimensions verrait un ensemble de particules dont les charges, plutôt que les énergies, sont discontinues. Le quantum de charge, ou unité de charge, dépendrait du rayon du cercle. Voilà qui nous rapprocherait du monde que nous connaissons, où la charge électrique est quantifiée : elle est toujours un multiple de la charge e de l'électron. Pour que la théorie décrive la valeur correcte de e , on doit supposer que le cercle de la cinquième dimension est minuscule, avec un rayon de l'ordre de 10^{-33} centimètre seulement. La petite taille de la dimension invi-

sible explique pourquoi nous ne percevons pas cette dimension et pourquoi les atomes n'y sont pas sensibles. Pourtant l'électromagnétisme en découlerait, et la gravitation serait alors unifiée avec ce dernier.

En 1978, à l'École normale supérieure de Paris, Eugène Cremmer, Bernard Julia et Joël Scherk ont compris que la supergravité autorise jusqu'à sept dimensions supplémentaires et gagne en élégance dans un espace-temps à onze dimensions (dix dimensions d'espace et une dimension de temps). Le monde réel que la théorie décrit finalement dépend de la façon dont les dimensions complémentaires bouclent, telle la cinquième dimension de la théorie de Kaluza et de Klein. Comme les dimensions supplémentaires pouvaient expliquer à la fois l'électromagnétisme et les interactions nucléaires fortes et faibles, de nombreux physiciens étudièrent la supergravité à onze dimensions, dans l'espoir qu'elle serait la théorie unificatrice dont ils rêvaient.

Cependant la supergravité à onze dimensions fut abattue en 1984, quand on lui découvrit une grave insuffisance. Dans le monde réel, la gauche et la droite ont une importance : les lois qui décrivent l'interaction nucléaire faible se modifient quand on les examine dans un miroir ; les neutrinos, par exemple, ont toujours un spin gauche. Or Edward