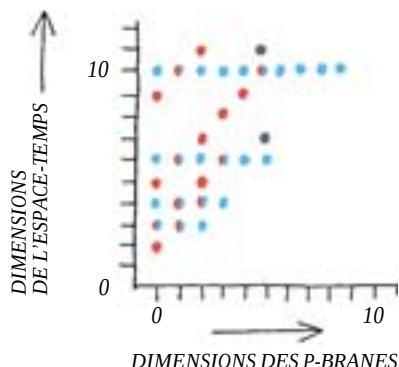




**5. LES MEMBRANES** que l'espace-temps peut accueillir dépendent de la dimension de cet espace-temps. Les 0-branes, à zéro dimension, sont des particules ponctuelles ; les 1-branes, à une dimension, sont des cordes, et les membranes, ou 2-branes, à deux dimensions, sont des feuilles ou des bulles. Certaines *p*-branes, à *p* dimensions, sont dépourvues de spin (en rouge), mais les *p*-branes de Dirichlet ont un spin égal à 1 (en bleu).

interactions forte, faible et électromagnétique convergent, à une énergie  $E$  égale à  $10^{16}$  gigaélectronvolts. En outre, ces intensités diffèrent alors peu du nombre sans dimension  $GE^2$ , où  $G$  est la constante de gravitation. Cette quasi-égalité, qui n'est certainement pas fortuite, appelle une explication que les physiciens ont longtemps cherchée.

Dans l'espace-temps envisagé par P. Horava et par E. Witten, on peut choisir la taille de la onzième dimension de sorte que les quatre forces se rencontrent à cette énergie commune. Elle est bien inférieure à l'énergie de Planck de  $10^{19}$  gigaélectronvolts, à laquelle on pensait précédemment que la gravité devenait forte (une énergie élevée correspond à une courte portée). Ainsi les effets de gravitation quantique apparaîtraient à des énergies inférieures à celles que les théoriciens prévoyaient ; cette découverte imposerait des modifications des théories cosmologiques.

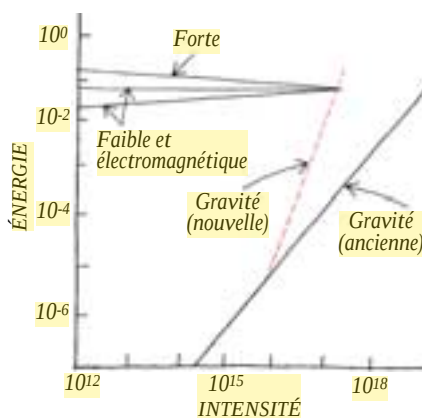
Récemment, à l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, Joseph Polchinski a montré que certaines *p*-branes ressemblent à une surface découverte au XX<sup>e</sup> siècle par le mathématicien allemand Peter Gustav Lejeune-Dirichlet. Dans certaines circonstances, ces *p*-branes peuvent être interprétées comme des trous noirs ou, plutôt, comme des membranes noires, des objets hors desquels rien ne sort, pas même la lumière.

Les cordes ouvertes, par exemple, seraient comme des cordes fermées dont certaines parties sont cachées par des membranes noires. Les progrès récents ont conduit à supposer que les trous

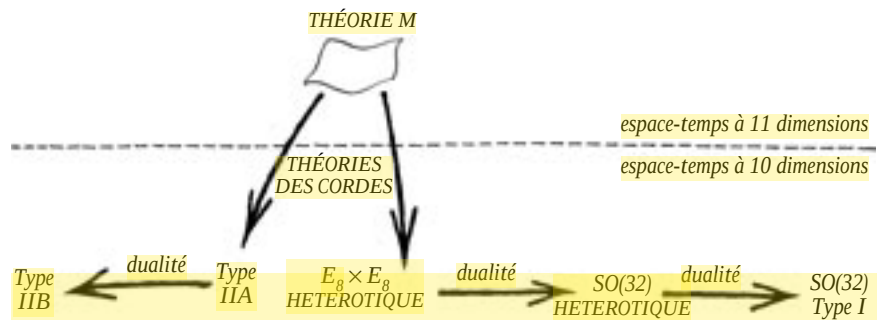
noirs sont des membranes noires qui se coupent, enveloppant sept dimensions compactifiées : les cosmologistes espèrent que la théorie *M* éclaircira les paradoxes des trous noirs soulevés par Stephen Hawking, de Cambridge.

En 1974, ce dernier avait calculé que les trous noirs ne sont pas totalement noirs : ils rayonneraient de l'énergie. Dans cette hypothèse, les trous noirs posséderaient une entropie non nulle (l'entropie mesure le désordre ; elle se définit à partir du nombre d'états quantiques disponibles). Pourtant l'origine microscopique de ces états quantiques restait un mystère. Grâce aux membranes de Dirichlet, A. Strominger et Cumrun Vafa, de Harvard, ont compté le nombre d'états quantiques dans les membranes noires : ils déterminent une entropie en très bon accord avec les prédictions de S. Hawking, corroborant la théorie *M*.

Les membranes noires seront-elles la clé d'un des plus grands problèmes de la théorie des cordes ? Comme il semble exister des milliards de façons de réduire le nombre de dimensions de dix à quatre, les comportements possibles du monde réel prévus par la théorie sont en nombre excessif, et ils ne peuvent pas être testés. Cependant la masse d'une membrane noire peut s'annuler quand le trou qu'elle enveloppe se contracte. Cette propriété modifie l'espace-temps, permettant à un espace-temps qui contient un certain nombre de trous internes (ressemblant à un morceau de gruyère) de



**6. LES INTERACTIONS** électromagnétiques, faibles et fortes convergent vers la même intensité quand l'énergie des particules qu'elles lient atteint  $10^{16}$  gigaélectronvolts. Les physiciens pensaient naguère que la gravitation ne passait pas par le point de convergence, mais des calculs qui tiennent compte de la onzième dimension de la théorie *M* suggèrent que la gravité converge vers le même point.



**7. LA THÉORIE M**, qui décrit un espace-temps à onze dimensions, engendre cinq théories des cordes à dix dimensions. Quand les dimensions excédentaires se referment en cercle, la théorie *M* engendre les supercordes de type IIA, qui sont reliées aux cordes de type IIB par une opération nommée dualité. Cependant, si les dimensions excédentaires se contractent en un segment, la théorie *M* devient la théorie des cordes hétérotiques  $E_8 \times E_8$ , physiquement plausible. Cette dernière est reliée aux théories des cordes  $SO(32)$  par des dualités.

se transformer en un autre avec un nombre différent de trous, violant les lois de la topologie classique.

Si tous les espaces-temps sont ainsi reliés, la recherche de l'espace-temps où nous vivons devient un problème abordable. Les cordes peuvent se placer dans l'espace-temps d'énergie minimale, par exemple. Leurs ondulations engendreraient alors les particules élémentaires et les interactions que nous connaissons, c'est-à-dire le monde réel.

## De onze à dix

Malgré ces succès, les physiciens n'ont encore que des fragments de la théorie *M*. Récemment Thomas Banks et Stephen Shenker, de l'Université Rutgers, Willy Fischler, de l'Université du Texas, et Leonard Susskind, de l'Université de Stanford, ont proposé une définition rigoureuse de la théorie *M*. Leur théorie «matricielle» est fondée sur un nombre infini de 0-branes (c'est-à-dire de particules). Les coordonnées, ou positions, de ces particules, au lieu d'être des nombres ordinaires, sont des matrices (des tableaux de nombres) qui ne commutent pas : le produit  $XY$  de deux matrices  $X$  et  $Y$  n'est pas égal au produit  $YX$ . Dans cette représentation, l'espace-temps est un concept flou où les

coordonnées ne sont plus des nombres usuels, mais des matrices.

Les physiciens soupçonnent depuis longtemps que l'unification de la relativité (la géométrie de l'espace-temps) et de la physique quantique conduira à un espace-temps mal défini, au moins jusqu'à ce qu'une nouvelle définition soit découverte. L'approche matricielle a beaucoup intéressé les théoriciens, mais elle ne semble pas parfaitement adaptée. Au cours des prochaines années, nous espérons découvrir ce qu'est réellement la théorie *M*.

E. Witten s'amuse parfois à imaginer comment la physique se développerait sur une autre planète, où l'on aurait découvert la relativité générale, la mécanique quantique et la supersymétrie dans un ordre différent de celui que nous avons connu. De même, on peut imaginer comment, sur une planète plus logique que la nôtre, onze dimensions d'espace-temps ont constitué le point de départ pour l'élaboration d'une théorie des cordes à dix dimensions. Les historiens de demain auront peut-être le sentiment que les physiciens du XX<sup>e</sup> siècle ont été comme des enfants sur une plage : ils ont joué avec les fragments de supercordes les plus lisses ou les plus beaux, tandis que l'immense océan de la théorie *M* s'étendait, inexploré, à leurs pieds.

Michael DUFF est professeur de physique à l'Université du Texas.

Michael DUFF et Christine SUTTON, *The Membrane at the End of the Universe*, in *New Scientist*, vol. 118, n° 1619, pp. 67-71, 30 juin 1988.

Paul TOWNSEND, *Unity from Duality*, in *Physics World*, vol. 8, n° 9, pp. 1-6, septembre 1995.

Madhusree MUKERJEE, *Explaining Everything*, in *Scientific American*, vol. 274, n° 1, pp. 72-74, janvier 1996.

Edward WITTEN, *Reflections on the Fate of Spacetime*, in *Physics Today*, vol. 49, n° 4, pp. 24-30, avril 1996.

Edward WITTEN, *Duality, Spacetime and Quantum Mechanics*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 5, pp. 28-33, mai 1997.