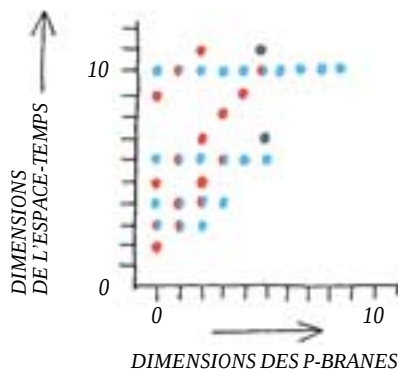




**5. LES MEMBRANES** que l'espace-temps peut accueillir dépendent de la dimension de cet espace-temps. Les 0-branes, à zéro dimension, sont des particules ponctuelles ; les 1-branes, à une dimension, sont des cordes, et les membranes, ou 2-branes, à deux dimensions, sont des feuilles ou des bulles. Certaines *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.

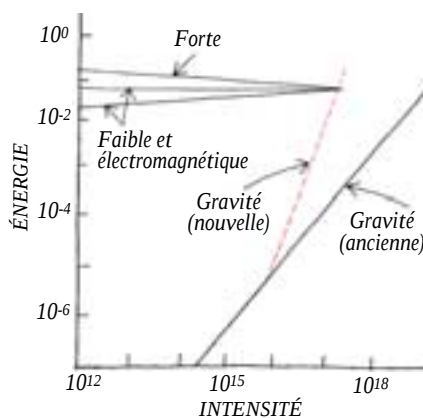
Récemment, à l'Institut de physique théorique de Santa Barbara, Joseph Polchinski a montré que certaines *p*-branes ressemblent à une surface découverte au XX<sup>e</sup> siècle par le mathématicien allemand Peter Gustav Lejeune-Dirichlet. Dans certaines circonstances, ces *p*-branes peuvent être interprétées 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 compacifiées : 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.