

qui vivait en Amérique du Nord jusqu'il y a environ 10 000 ans, l'analyse morphologique de ces éléments donne lieu à des interprétations opposées. L'analyse du collagène fossile de cet animal permet de trancher (le collagène est la principale protéine des os) : il était carnivore.

L'ours à face courte géant de 800 kilogrammes mesurait deux mètres au garrot. Que mangeait-il ? De la viande, affirment des paléontologues qui se fondent sur la ressemblance entre son museau court, qui lui donne son nom, et celui de félins, carnivores : le museau des omnivores est allongé par le développement des molaires, dents broyeuses. Non, contestent d'autres, il était végétarien : les muscles étaient raccordés sur sa mâchoire comme sur celle de son lointain cousin actuel, l'ours à lunettes qui se nourrit de végétaux. Le même mode

de mastication impliquerait un régime identique pour les deux espèces.

En parallèle avec P. Matheus, de l'Université d'Alaska, nous avons mesuré les proportions relatives des isotopes du carbone et de l'azote (les isotopes d'un élément diffèrent par le nombre de neutrons que contient leur noyau) du collagène fossilisé dans des os d'ours à face courte de différents sites d'Alaska et du Yukon. Les rapports entre le carbone 13 et le carbone 12, d'une part, et l'azote 15 et l'azote 14, d'autre part, au sein du collagène, dépendent de ceux des protéines contenues dans la nourriture, donc de sa nature. Ainsi, les rapports isotopiques distinguent-ils les herbivores, les carnivores et les piscivores.

Les signatures isotopiques du collagène des ours à face courte géants sont proches de celles des carnivores actuels,

mangeurs d'animaux terrestres : les ours suivaient donc un régime plutôt carné. Cette spécialisation alimentaire est confirmée par la comparaison avec l'ours brun actuel. Tandis que la signature isotopique de l'ours à face courte dépend peu du site d'origine des fossiles, celle de l'ours brun indique un régime variable en fonction des ressources disponibles : carnivore, herbivore, voire piscivore (consommation de saumon).

Les proies potentielles de l'ours à face courte abondaient : herbivores de grande taille, tels les mammoths et les paresseux géants, ou ongulés (rennes, bisons, chevaux, chameaux). Sa taille gigantesque lui permettait-elle de courir pour les attraper ? Peut-être se contentait-il de la consommation de charognes.

Hervé BOCHERENS, UMR 162, CNRS-INRA-Université Paris 6

Une anomalie génétique du cortex

Un gène nécessaire à la migration des neurones pendant l'embryogenèse a été isolé.

Les circonvolutions cérébrales augmentent la surface du cortex, la surface des aires cérébrales fonctionnelles et le nombre des connexions entre neurones, améliorant les performances cognitives. Chez quelques personnes, le cerveau est « lisse », dépourvu de circonvolutions ; chez d'autres, les circonvolutions existent, mais

le cortex est malformé. Vincent des Portes, Jamel Chelly et leurs collègues de l'équipe de l'Unité INSERM U 129 ont découvert un gène responsable de ce type de pathologies.

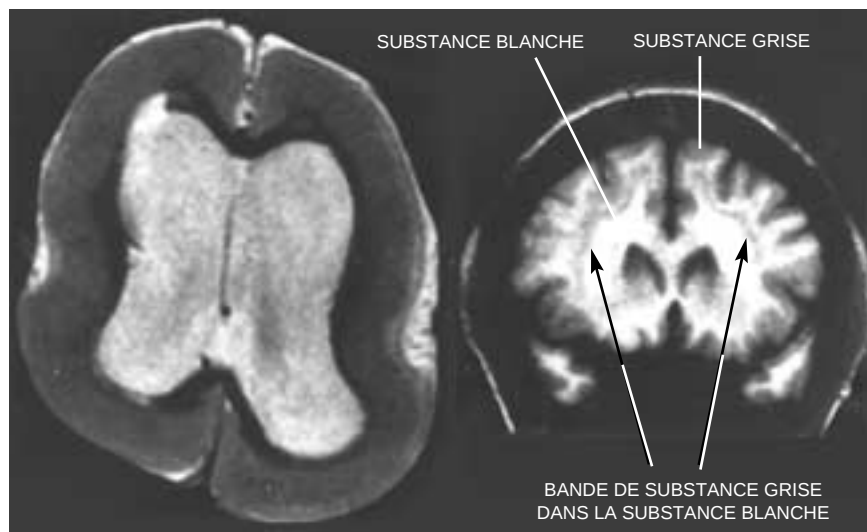
Au cours de l'embryogenèse, les neurones qui ont cessé de se multiplier migrent. Beaucoup de neurones meurent au cours de l'embryogenèse ; c'est le cas de la moitié des neurones moteurs. Seuls subsistent ceux qui trouvent une cible (un autre neurone), les autres dégèrent. Lorsque les mécanismes d'apoptose (le suicide des cellules) et de migration sont normaux, les neurones se regroupent dans le cortex, tandis que la substance blanche, sous-corticale, contient uniquement les axones, les prolongements

des corps cellulaires entourés de myéline (la myéline, qui participe à la conduction des signaux neuronaux, confère à la substance blanche sa couleur).

Parmi les rares enfants où ces phénomènes de migration des neurones sont anormaux, les neuropédiatres des équipes de Jean-Marc Pinard, à l'Hôpital Raymond Poincaré, à Garches, et de Jacques Motte à Reims, ont décrit, grâce à l'imagerie par résonance magnétique (IRM), un nouveau syndrome : dans une même famille, des garçons sont atteints de lissencéphalie (le cortex est dépourvu de circonvolutions) et des filles ont des hétérotopies en bandes, ou double cortex. Dans cette dernière pathologie, le cortex est apparemment normal, mais des bandes de substance grise, dites hétérotopiques, sillonnent la substance blanche (la substance grise est constituée des corps neuronaux) ; au cours de l'embryogenèse, les neurones n'ont pas migré correctement et se sont arrêtés avant d'atteindre leur but, au sein de la substance blanche. L'identification de plusieurs mutations génétiques dans les familles atteintes a conduit l'équipe de l'INSERM à démontrer la responsabilité du gène dénommé *Doublecortine* dans ces pathologies.

Les garçons ont un retard mental profond et des crises d'épilepsie réfractaires à tout traitement. Chez les filles, la variabilité est extrême : certaines sont quasi asymptomatiques, avec un retard mental léger, et une ou deux crises d'épilepsie dans l'enfance ; d'autres ont des symptômes aussi graves que les garçons.

Quelle est l'origine de cette variabilité ? Elle tient à la localisation du gène *Doublecortine* sur le chromosome X. Chez les filles, l'un des deux chromosomes X



Images obtenues par résonance magnétique d'un cerveau présentant une lissencéphalie (à gauche, coupe horizontale) et d'un cerveau ayant une hétérotopie en bandes (à droite, coupe verticale). Sur l'image de droite, les circonvolutions existent, mais deux bandes de substance grise traversent la substance blanche (les flèches).

est inactivé dans chaque cellule de l'œuf (au stade de quelques cellules) de façon aléatoire, mais définitive. Si, dans l'embryon précoce, c'est le chromosome qui porte la mutation qui est inactivé, le chromosome normal s'exprime, et cette cellule (et ses cellules filles) se développe normalement. Au contraire, dans les cellules issues d'une cellule où le chromosome X sain a été inactivé, et où le gène *Doublecortine* est anormal, aucune des deux copies du gène ne s'exprime : la migration est incorrecte. Chez les garçons, qui n'ont qu'un chromosome X, le gène *Doublecortine* qui s'exprime est toujours anormal : les anomalies de migration (cortex lisse et trop épais) sont plus graves que chez les filles.

Ce gène code une protéine inconnue ; c'est une protéine vraisemblablement intracellulaire qui ressemble, en partie, à une protéine connue dont l'activité est régulée par la concentration en ions calcium. Bien que l'on sache que les ions calcium participent à la migration des cellules et à l'apoptose, on ignore encore les mécanismes physiopathologiques déclenchés par les mutations du gène *Doublecortine*.

Les hétérotopies en bandes et les lissencéphalies sont parfois héréditaires, mais nombre de ces maladies sont sporadiques. Elles sont transmises par une cellule de la reproduction mutée, le plus souvent par un spermatozoïde ayant subi une mutation aléatoire sur le gène *Doublecortine*. Lorsqu'une fille hérite de cette mutation, elle n'a parfois qu'une mince bande de cortex hétérotopique observée à l'IRM, mais peu de signes cliniques. En revanche, devenue adulte, elle risque d'avoir des garçons ayant une lissencéphalie et des filles ayant des hétérotopies en bandes plus ou moins graves.

Connaissant ce nouveau gène du développement, les généticiens vont fabriquer des modèles animaux où le gène *Doublecortine* sera inactivé. Ce nouveau gène sera un élément essentiel pour la compréhension des mécanismes de l'organisation du cortex. De surcroît, la recherche des mutations potentielles que contient ce gène offrira un diagnostic moléculaire de la maladie. Un conseil génétique pourra établir si les filles d'une famille atteinte portent ou non le gène muté, et un diagnostic prénatal sera offert aux familles qui le souhaitent.

Pourtant, aux questions éthiques que pose tout diagnostic prénatal, s'ajoute la grave question du pronostic de la gravité de l'atteinte chez les filles : si l'anomalie est toujours dramatique chez un garçon, chez une fille, le handicap est parfois léger. On n'a aucun moyen de prévoir la gravité de la maladie qui résulte d'une anomalie génétique localisée sur l'un des deux chromosomes X.

PIERRE THUILLIER
**La revanche
des sorcières**
L'irrationnel et la pensée scientifique

BELIN

La science, nous dit-on, est «objective» et «neutre». Un fossé pratiquement infranchissable séparerait la rationalité scientifique du domaine maudit de «l'irrationnel».

Le puritanisme rationaliste, pourtant, risque fort de dissimuler la profondeur et la multiplicité des relations qui unissent le monde de la science à celui de la religion, pis encore à celui de la magie. Maints exemples, dont le plus fameux est sans doute fourni par Newton, sont là pour le confirmer : la science expérimentale a une dette envers les sciences dites «occultes».

Pierre Thuillier est philosophe et historien des sciences. Il enseigne à l'université Paris VII.

code 2110 – 160 pages

Prix : 132 F

Voir bon de commande p. 98

BELIN

La téléportation quantique

Copie d'une particule à distance.

Albert Einstein, fondateur de la relativité, n'admettait pas l'idée d'une action instantanée à distance. Or la mécanique quantique prévoit des actions de ce type. De nombreuses expériences confirment aujourd'hui que, dans une paire de photons dont les états quantiques sont corrélés, la mesure de l'état d'un photon entraîne instantanément une modification de l'état de l'autre photon, quel que soit leur éloignement.

Une paire de photons corrélés peut être représentée par une paire de cartes, l'une noire, l'autre rouge. Donnons ces cartes retournées à deux voyageurs qui s'éloignent. Le premier voyageur décide de retourner sa carte et trouve une carte rouge. Nécessairement, l'autre carte est noire. On comprend que si le premier voyageur ne prévient pas le second de la couleur de sa carte, ce dernier ne peut pas savoir qu'il la verra noire s'il la retourne. Comme le résultat de la mesure du premier voyageur est imprévisible (il aurait pu avoir une carte noire) et que le premier voyageur ne communique pas avec le second à une vitesse infinie, le second ne peut recevoir instantanément l'information.

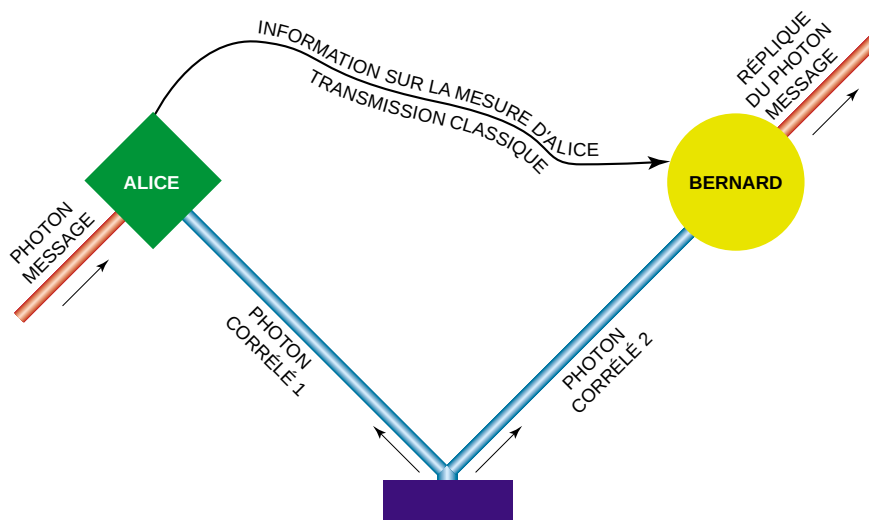
Le corrélation quantique diffère cependant de cette analogie classique :

la couleur de la carte est n'importe quel mélange de rouge et de noir et cette couleur n'est pas fixée tant que la carte n'est pas retournée ; puis, lorsque la carte est retournée, elle affiche une couleur, qui détermine la couleur opposée de l'autre carte (par exemple, rouge + noir pour la première carte devient, pour la seconde carte, rouge – noir).

Le résultat d'une mesure quantique étant fondamentalement impossible à prédire, cette action à distance, non locale, ne peut être utilisée pour propager une information déterminée plus vite que la lumière. Il est néanmoins possible d'utiliser les corrélations pour «téléporter» un photon à quelques centimètres de distance, comme viennent de le faire Anton Zeilinger et ses collègues de l'Université d'Innsbruck.

Imaginons qu'Alice veuille envoyer un message à son ami Bernard, à l'aide d'un canal de téléportation constitué d'une paire de photons corrélés émis par une source extérieure ; Alice et Bernard reçoivent chacun un élément de la paire. Lorsque le photon que détient Alice est modifié, le photon que détient Bernard est modifié instantanément. Ce lien invisible entre Alice et Bernard est fragile : pour maintenir la corrélation, les photons doivent être isolés de leur environnement.

Une tierce personne donne à Alice un photon dont l'état constitue le message. Selon les lois de la mécanique quantique, Alice ne peut connaître le message car toute mesure modifie l'état quantique du système mesuré. Dans ces conditions, comment Alice peut-elle transmettre le message à Bernard ?



Pour téléporter un photon message entre Alice et Bernard, on utilise une paire de photons corrélés. Alice reçoit le photon message et le premier photon corrélé de la paire. Lorsque ces photons arrivent en même temps, elle peut mesurer l'état quantique de la combinaison des deux particules. Cette mesure perturbe le photon corrélé 1. Comme le photon 2 est corrélé au photon 1, son état est instantanément modifié. Alice transmet alors classiquement à Bernard l'information sur la mesure effectuée. À l'aide de cette information, Bernard modifie son photon corrélé de sorte qu'il devienne une réplique exacte du photon message.

Alice mélange de manière indiscernable le photon message et le photon de la paire qu'elle détient. Ce système peut être dans quatre états quantiques possibles. Dans l'expérience réalisée à Innsbruck, Alice ne peut connaître l'état du système que lorsque celui-ci est dans l'un des quatre états. Quand elle fait la mesure et que le système est effectivement dans cet état favorable, elle connaît l'état du système. Au cours de sa mesure, le système est perturbé et le message est irrémédiablement détruit. Cependant, en raison de la corrélation de la paire de photons, la photon de Bernard est instantanément modifié, conformément à la mesure d'Alice.

Bernard ignore toutefois que son photon a été modifié et ne sait encore rien du message. Alice lui transmet alors, par un moyen de télécommunication classique, le résultat de sa mesure (qui à lui seul est insuffisant pour reconstruire le message). Grâce à l'information sur cette dernière, Bernard peut effectuer une expérience pour transformer le photon corrélé qu'il a reçu en un photon identique au photon message. Comme les photons sont indiscernables, sauf par leur état, le photon message que détenait Alice a été «téléporté» à Bernard. Notons cependant que, pour reproduire le message, Bernard a eu recours au résultat de la mesure d'Alice, transmis via un moyen de communication classique, de sorte que la copie de la particule peut se faire au mieux à la vitesse de la lumière.

L'expérience ne fonctionne que lorsqu'Alice reçoit simultanément sur son détecteur le photon message et le photon corrélé, émis indépendamment, ce qui se produit seulement pour une faible fraction des paires reçues. De surcroît, nous avons vu que l'information acquise par Alice, dans la mesure du système composé des deux photons, n'est suffisante pour reconstituer le message que dans un cas sur quatre. C'est un peu comme si, dans *Star Trek*, lors de la téléportation de Monsieur Spock, seuls un quart de ses atomes, pris au hasard, étaient téléportés.

Si cette expérience confirme une nouvelle fois la non-localité de la mécanique quantique, son intérêt pratique est limité. D'une part, un moyen de communication classique est nécessaire, ce qui empêche la simultanéité. D'autre part, seuls des photons ont été ainsi téléportés. Toutefois, on entrevoit maintenant la téléportation d'atomes, ce qui serait plus intéressant, et ces résultats pourraient être utilisés dans le domaine de la cryptographie quantique, une technique de transmission de messages dont la confidentialité est absolue.