

le risque zéro, la protection totale n'est jamais atteinte. La conduite à tenir n'est pas la même en situation normale et en situation à haut risque infectieux, par exemple lors d'une épidémie de dengue ou en zone impaludée. Une approche bénéfice-risque est ainsi nécessaire pour définir la meilleure stratégie préventive. L'existence ou non d'un traitement des maladies mises en jeu est également à considérer. Par exemple, un recours thérapeutique est presque toujours possible en cas de maladies bactériennes, alors que ce n'est pas le cas pour les encéphalites ou les fièvres hémorragiques virales. Et des vaccins existent pour certaines maladies (fièvre jaune, encéphalite à tiques).

Face à ce constat, les scientifiques s'efforcent d'améliorer la connaissance des mécanismes d'identification et de reconnaissance de l'hôte par l'arthropode vecteur, pour mieux les contrarier, et imaginent des procédés novateurs pour pallier les limitations actuelles. En l'état actuel des recherches, on espère disposer d'ici quelques années de nouvelles familles de composés

actifs contre les arthropodes, composés notamment issus du fantastique réservoir de molécules que constitue l'ensemble des plantes et des micro-organismes.

■ BIBLIOGRAPHIE

Haut conseil de la santé publique, **Recommandations sanitaires pour les voyageurs 2013** (à l'attention des professionnels de santé), *Bulletin Épidémiologique Hebdomadaire*, n° 22-23, 4 juin 2013 (téléchargeable sur <http://www.invs.sante.fr>).

G. Duvallet et L. de Gentile, **Protection personnelle antivectérielle**, IRD Éditions, 2012.

P. Carnevale, V. Robert *et al.*, **Les anophèles – Biologie, transmission du *Plasmodium* et lutte antivectérielle**, IRD Éditions, 2009.

D. Fontenille *et al.*, **La lutte antivectérielle en France – Disease control in France**, IRD Éditions, 2009.

Logiciels d'identification (identiciels) disponibles sur www.mivegec.ird.fr.

Quels sont les effets à long terme ?

Les scientifiques s'intéressent aussi à l'effet à long terme des mesures de protection individuelle sur la santé. La difficulté est d'évaluer l'impact de faibles expositions pendant une longue période. Cette difficulté est accrue lors d'exposition à des cocktails de substances actives, ce qui est le cas en pratique. Les chercheurs étudient aussi l'effet des moyens de protection personnelle sur l'environnement : leur utilisation peut conduire à une accumulation de substances toxiques dans les chaînes alimentaires, à des déséquilibres écologiques, à l'apparition de résistances aux produits insecticides. Autant de questions qui restent à éclaircir et qui rappellent que toute action contre certains organismes vivants peut avoir des effets indésirables sur d'autres. ■

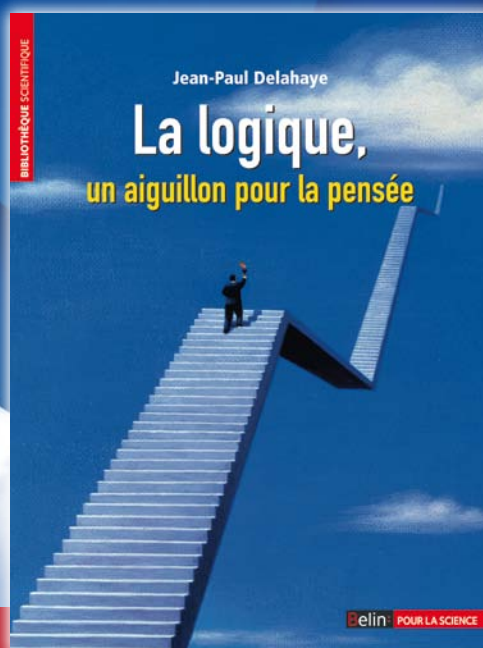
La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique – prise au sens large – a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'infinie variété des infinis, les étranges hyperensembles, l'indécidabilité de Turing, les déconcertants paradoxes probabilistes... Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux, intrigués par le monde abstrait des raisonnements !

Éditions Belin / Pour la Science 2012
200 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8

Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr



HISTOIRE DES SCIENCES

Erreurs fécondes

En 1982, l'Américain Nick Herbert imagine un télégraphe plus rapide que la lumière. Dans les années 1940, l'Allemand Max Delbrück explore la nature des gènes en étudiant des virus. Bien qu'erronées, leurs hypothèses ont entraîné des avancées majeures.

David Kaiser et Angela Creager

Comme la majorité des êtres humains, la plupart des scientifiques font nombre d'erreurs au long de leur parcours. Toutes, cependant, ne revêtent pas la même importance. Parmi les innombrables erreurs insignifiantes, les historiens ont découvert plusieurs exemples d'idées fausses qui se sont révélées fécondes. Ces erreurs, ayant trait à des caractéristiques fondamentales du monde, ont entraîné de nouvelles recherches qui ont débouché sur des percées majeures.

Le modèle atomique conçu par le physicien danois Niels Bohr en 1913, par exemple, s'est révélé faux, mais a ouvert la voie à la mécanique quantique. En 1912, le météorologue allemand Alfred Wegener exposait sa théorie de la dérive des continents, expliquant ces mouvements par des forces centrifuges. Le mécanisme d'action était erroné, mais le phénomène, alors décrié, a été confirmé, et ses travaux ont conduit à la théorie de la tectonique des plaques. Deux autres exemples, l'un en physique dans les années 1970, l'autre en biologie dans les années 1940, illustrent particulièrement bien l'impulsion que certaines erreurs peuvent donner aux sciences.

Les auteurs de ces erreurs – Nick Herbert et Max Delbrück –, tous deux chercheurs, avaient chacun tenté de répondre à des questions profondes et peu traitées. En combinant des idées qui n'avaient alors été examinées que par de rares scientifiques, ils ont réalisé des travaux préparatoires essentiels pour les domaines aujourd'hui prolifiques de l'information quantique et des biotechnologies.

La première erreur a contribué à éclairer un désaccord né aux premiers jours de la mécanique quantique, en 1927, lorsque Einstein et Bohr ont engagé une série de débats sur la nature et les implications de la théorie quantique. Einstein s'était attaqué à plusieurs étrangetés de la théorie. Les équations de la mécanique quantique, par exemple, ne donnaient que des probabilités de présence d'une particule et non des résultats définitifs. Comment pouvaient-elles suffire à décrire le monde ? Dieu ne joue pas aux dés, disait Einstein. La question en était restée là pendant 30 ans. Aucun des deux hommes n'avait pu convaincre son opposant.

Le commutateur supraluminique FLASH

Des décennies plus tard, un jeune physicien d'Irlande du Nord, John Bell, revient sur les échanges entre Einstein et Bohr. Bell revisite une expérience de pensée publiée en 1935 par Einstein et deux collègues, Boris Podolsky et Nathan Rosen. Souhaitant montrer que la mécanique quantique ne décrivait pas toute la réalité physique d'un système, les trois physiciens avaient imaginé une source projetant des paires de particules quantiques couplées – des photons, par exemple – dans des directions opposées. Leur expérience de pensée illustrait une étrange conséquence de la mécanique quantique : lorsque deux particules sont couplées d'une certaine façon (on dit aujourd'hui qu'elles sont « intriquées »), leurs propriétés restent corrélées. Dans l'expé-

rience de pensée, il suffisait ainsi de mesurer une grandeur physique de l'une pour connaître la valeur de la même grandeur pour l'autre. Pour les trois physiciens, cette corrélation était telle qu'elle impliquait l'existence d'une propriété commune aux deux particules, non décrite par la mécanique quantique. Mais Bell conçoit une variante de l'expérience de pensée où la mécanique quantique elle-même contredit cette idée.

En 1964, dans un article bref et élégant, il démontre qu'il existe certaines corrélations partielles qui ne s'expliquent que par la mécanique quantique. Il suffirait de les observer expérimentalement pour mettre en défaut la thèse d'Einstein, Podolsky et Rosen. De plus, conclut Bell, la corrélation entre les deux mesures étant instantanée, toute théorie capable de reproduire les corrélations quantiques à l'aide de « paramètres supplémentaires » impliquerait que le signal responsable de cette corrélation se propage instantanément d'une particule à l'autre.

L'article de Bell reçoit un accueil mitigé. Plusieurs physiciens remarquent que la propagation instantanée de signaux violerait les lois de la relativité restreinte d'Einstein, solidement étayées, qui énoncent qu'aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Nick Herbert est de ceux-là. Physicien dans le secteur industriel de la baie de San Francisco, il participe à un groupe de discussion informel, le Groupe de physique fondamentale. Les participants, pour la plupart de jeunes physiciens ayant obtenu leur doctorat dans des universités prestigieuses,

sont sans emploi ou sous-employés, victimes d'une crise sans précédent.

Disposant de temps, N. Herbert et ses camarades se réunissent chaque semaine au milieu des années 1970 pour chercher des solutions originales à des problèmes complexes de la physique moderne ayant fait l'objet de peu d'attention au cours de leur formation en physique. En particulier, le théorème de Bell et l'intrication quantique les fascinent. Un autre membre du groupe, John Clauser, a mené en 1972 la première expérience visant à tester le théorème de Bell. Les résultats semblaient corroborer les prévisions de la mécanique quantique, mais le montage, peu fiable, devait être amélioré (l'expérience décisive sera réalisée en 1982 par l'équipe d'Alain Aspect, de l'Institut d'optique théorique et appliquée, à Orsay). Le groupe s'intéresse notamment à ce que Bell a décrit comme des signaux instantanés entre particules quantiques. Si de tels signaux sont possibles, pourraient-ils

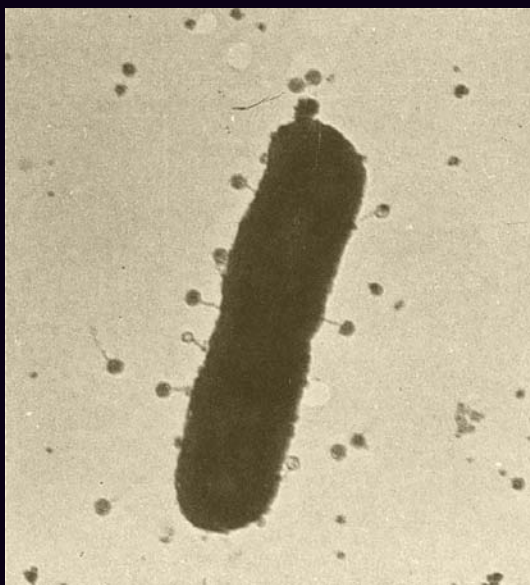
être utilisés pour transmettre des messages plus vite que la lumière ?

N. Herbert dresse les plans de ce qu'il nomme le communicateur supraluminique, un dispositif qui vise à exploiter cette propriété... en violant au passage la relativité et donc les lois de la physique. En janvier 1981, après quelques faux départs, N. Herbert finalise son projet, nommé FLASH pour première connexion supraluminique amplifiée par laser (voir l'encadré page 76).

Le projet paraît infaillible. Plusieurs examinateurs du journal auquel il a soumis son article sont convaincus par son argument. « Nous n'avons pu identifier aucun défaut fondamental dans l'expérience proposée, qui révélerait l'origine du paradoxe », écrivent deux arbitres. Un troisième, Asher Peres, adopte une position plus audacieuse : il indique que l'article doit contenir une erreur – et qu'il faut donc le publier. Puisqu'il n'a pu trouver la faille, soutient-il, l'erreur doit être importante, du genre à produire de nouvelles avancées.

La position de Peres est vite corroborée. Trois groupes de physiciens – Gian Carlo Ghirardi et Tullio Weber en Italie, Wojciech Zurek et Bill Wootters aux États-Unis, et Dennis Dieks aux Pays-Bas – soumettent l'article de N. Herbert à un examen attentif. Ils montrent tous que N. Herbert a commis une erreur subtile dans le calcul du signal que le destinataire doit voir en sortie de son dispositif. N. Herbert a supposé que le laser amplificateur de son appareil serait capable d'émettre de grandes quantités de lumière dans le même état que la lumière originale. Les physiciens s'aperçoivent que le laser ne peut pas produire de telles copies d'un seul photon, mais seulement un mélange aléatoire d'états quantiques qui produirait un signal confus inexploitable.

Au cours de leur étude, les trois groupes découvrent une caractéristique fondamentale de la mécanique quantique : la théorie interdit la copie – le « clonage » – d'un état quantique inconnu sans perturber l'état en



DANS LES ANNÉES 1940 AUX ÉTATS-UNIS, le physicien allemand Max Delbrück (ci-contre à Cold Spring Harbor dans les années 1950) et son collègue Salvador Luria (au second plan) se sont lancés dans l'étude de la réplication du bactériophage, un virus infectant des bactéries (ci-dessus, sur un cliché de microscopie électronique réalisé en 1953 par Thomas Anderson). Ils espéraient découvrir la nature des « atomes » porteurs de l'hérédité, les gènes.



Collection personnelle de Daniel D. Luria. US National Library of Medicine

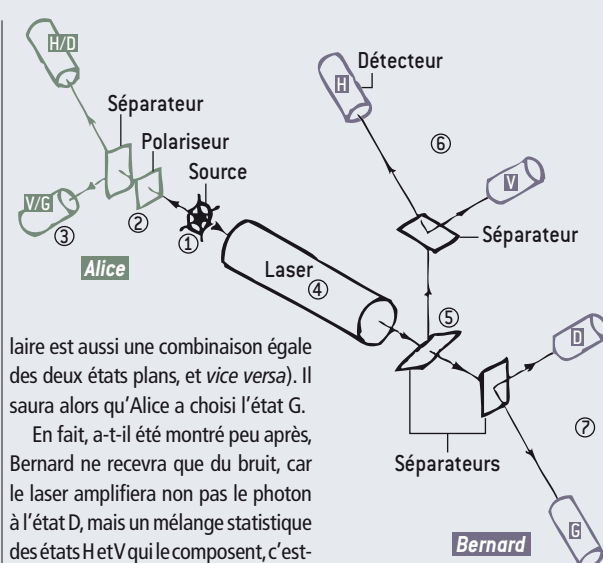
Un télégraphe plus rapide que la lumière ?

Le commutateur supraluminique FLASH imaginé par Nick Herbert en 1981 était inspiré de l'expérience de pensée d'Einstein, Podolsky et Rosen. Une source ① envoie des paires de photons intriqués dans des directions opposées. La propriété considérée est la polarisation des photons, c'est-à-dire la direction d'oscillation du champ électrique associé : la polarisation d'un photon peut être plane, avec un champ électrique oscillant soit horizontalement (H) soit verticalement (V), ou circulaire, où le champ décrit une hélice orientée vers la droite (D) ou vers la gauche (G).

À gauche, à l'aide de polariseurs ②, Alice choisit de donner au photon reçu une polarisation plane ou circulaire, qu'elle contrôle avec des détecteurs ③. Les deux photons étant intriqués, la polarisation du second, qui se dé-

place vers Bernard, est alors instantanément imposée : si l'un est dans l'état H, l'autre doit être dans l'état V (*idem* avec les états D et G). Reste à décoder l'information, et elle aura été transmise plus vite que la lumière.

Pour ce faire, N. Herbert ajoute un laser ④ sur le chemin du photon destiné à Bernard. Les lasers ont la propriété de produire en sortie un faisceau de photons de même polarisation que le signal entrant. En séparant le faisceau de photons en deux ⑤, Bernard peut en envoyer une moitié vers un détecteur mesurant la polarisation plane ⑥ et l'autre vers un détecteur mesurant la polarisation circulaire ⑦. Et si Alice a choisi une polarisation G, conclut N. Herbert, Bernard trouvera que la moitié des photons sortants sont dans l'état D, aucun dans l'état G, un quart dans l'état H et un quart dans l'état V (car un état circu-



laire est aussi une combinaison égale des deux états plans, et vice versa). Il saura alors qu'Alice a choisi l'état G.

En fait, a-t-il été montré peu après, Bernard ne recevra que du bruit, car le laser amplifiera non pas le photon à l'état D, mais un mélange statistique des états H et V qui le composent, c'est-à-dire que les photons produits seront soit dans l'état H, soit dans l'état V, avec une probabilité de 50 pour cent...

D'après N. Herbert, *Foundations of Physics*, vol. 12, n° 12, pp. 1171-1179, 1982

question. C'est à cause de cette propriété, connue depuis sous le nom de théorème de non-clonage, que le système FLASH ne fonctionnait pas. Ce théorème rend impossible l'utilisation de la théorie quantique pour construire des télégraphes plus rapides que la lumière. La corrélation de deux particules n'est pas une action à distance, mais la manifestation du fait que deux systèmes quantiques couplés ne sont pas séparables et doivent être considérés comme un tout. Intrication quantique et relativité d'Einstein ne sont donc pas incompatibles...

Très vite, quelques autres physiciens s'aperçoivent que le théorème de non-clonage offre plus qu'une simple réponse à l'article de N. Herbert ou qu'une base de conciliation de l'intrication et de la relativité. En 1984, l'Américain Charles Bennett et le Canadien Gilles Brassard s'en inspirent pour concevoir le tout premier protocole de cryptage quantique, une nouvelle méthode pour protéger les signaux numériques contre d'éventuels systèmes espions. Le fait que la mécanique quantique interdise à quiconque de faire des copies d'un état quantique inconnu signifie que des partenaires pourraient encoder

des messages secrets dans des photons intriqués et les transmettre en envoyant ces photons. Si quelqu'un interceptait un photon au passage et en faisait une copie, il détruirait immédiatement le signal recherché et trahirait en même temps sa présence.

Aujourd'hui, le cryptage quantique connaît un essor mondial. Plusieurs équipes, telles celles d'Anton Zeilinger en Autriche, Nicolas Gisin en Suisse et Philippe Grangier en France, ont réalisé des démonstrations en situation réelle de transferts de données sécurisés avec cryptage quantique. Un héritage plus qu'honorable du projet impossible de N. Herbert...

Qu'est-ce qu'un gène ?

Notre second exemple concerne les travaux de Max Delbrück (1906-1981), professeur à l'Université Vanderbilt puis à l'Institut de technologie de Californie, aux États-Unis. Ancien élève de Bohr, Delbrück avait tiré d'une conférence de son maître, en 1932, l'idée que la compréhension des processus biologiques engendrerait de nouveaux paradoxes dont la résolution pourrait conduire à la découverte de nouvelles lois de la physique.

Qu'est-ce qu'un gène ? Telle est l'une des questions majeures que l'on se pose dans les années 1940. Au début du XX^e siècle, à la suite de la redécouverte des lois de l'hérédité énoncées en 1866 par le moine morave Gregor Mendel, les biologistes sont convaincus que l'hérédité est portée par des facteurs – des gènes – dotés de deux propriétés : la capacité de se dupliquer et celle de produire des variations ou mutations qui se dupliquent aussi fidèlement que le gène original. Cependant, dans les années 1940, on ne sait toujours pas de quoi les gènes sont constitués, ni comment ils se dupliquent. On ne connaît aucun système physique qui s'autoréplice, écrit Erwin Schrödinger, pionnier de la physique quantique, dans son ouvrage *Qu'est-ce que la vie ?* (1944). Cette capacité des gènes paraît défier les lois de la thermodynamique.

Delbrück cherche le gène atomique, le système physique indivisible responsable des mystères de l'hérédité. En bon physicien, il pense que l'approche la plus fructueuse serait d'étudier les organismes les plus petits et les plus simples connus, les virus. Il choisit les bactériophages (ou phages). Ces virus qui infectent des bactéries sont parmi les

plus faciles à isoler et leur croissance est la plus rapide. Bien qu'à l'instar de tous les virus, les bactériophages ne se multiplient qu'à l'intérieur d'une cellule hôte, Delbrück est convaincu que la réplication des phages est un processus autonome, et il décide de se concentrer sur eux.

Pour résister ainsi aux changements chimiques constants de leur environnement, pense-t-il, les gènes doivent être constitués de molécules d'une grande stabilité, donc de protéines. Il devrait donc être possible d'observer leur duplication pendant la réplication des phages. Mais comment isoler des virus au moment de leur réplication ? La durée de réplication variant d'un phage à l'autre, Delbrück et son collègue Salvador Luria ont l'idée d'infecter la même bactérie avec deux souches d'un phage, l'une se reproduisant plus vite que l'autre. Ils espèrent ainsi isoler des formes intermédiaires de la réplication de la souche « lente » au moment où la bactérie éclate à cause du phage « rapide ».

Toutefois, l'expérience de la double infection ne se déroule pas comme prévu. Luria et Delbrück constatent que l'infection par une souche virale empêche l'infection par l'autre. À la même époque, Thomas Anderson, de l'Université de Pennsylvanie, examine au microscope électronique un échantillon de l'une des souches de phage de Delbrück et Luria. Il découvre que les virus sont bien plus complexes que les scientifiques l'avaient imaginé et qu'ils comportent donc certainement plus d'un gène atomique. Le phage se révèle une particule en forme de têtard, composée à la fois de protéines et d'acides nucléiques, et qui se fixe sur la surface externe de la bactérie pour déclencher une infection. La correspondance un virus/un gène envisagée par Delbrück bat de l'aile.

Le biologiste ne se laisse pas démonter pour autant. Pour comprendre comment certaines bactéries résistent à l'infection par les phages, il met au point avec Luria un « test de fluctuation ». Inspiré des calculs probabilistes de la mécanique quantique, ce test consiste à cultiver séparément quelques bactéries d'une même souche, puis à mettre chaque population obtenue en contact avec le phage. Les proportions de bactéries résistantes dans chaque cas indiqueront si les mutations sont

apparues aléatoirement ou en réaction au phage. L'expérience montre que les bactéries évoluent selon les principes darwiniens, au gré de mutations aléatoires qui, parfois, leur confèrent des avantages pour leur survie.

Le test de fluctuation n'a pas fait avancer la compréhension de la réplication des virus, au grand dam de Delbrück. De plus, il devenait clair que le phage utilisait les ressources cellulaires de la bactérie hôte pour se répliquer. Contrairement à l'hypothèse initiale de Delbrück, on ne pouvait pas ignorer l'hôte. Néanmoins, son intuition de se concentrer sur un système simple a été fructueuse. Elle a permis de montrer que le patrimoine des bactéries est transmis par des gènes et non acquis par un simple mécanisme d'adaptation au milieu, marquant les débuts de la génétique des bactéries et de la biologie moléculaire. Et le phage est devenu un organisme modèle pour toute une génération de biologistes, inspirant même James Watson dans sa quête de la structure de l'ADN. Quant à Delbrück et Luria, ils ont reçu (avec Alfred Hershey) le prix Nobel de physiologie et médecine en 1969, en partie pour ces travaux.

Et aujourd'hui ?

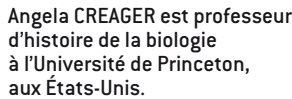
Dans ces deux exemples, des scientifiques ingénieux ont avancé des idées fausses. Ces erreurs, peu banales, ont entraîné des développements majeurs dans différents domaines de la science fondamentale, bientôt appuyés par des programmes de recherche de plusieurs milliards d'euros, et l'éclosion d'industries prospères.

Les erreurs de N. Herbert et Delbrück invitent à la réflexion. Delbrück a fait une carrière scientifique prestigieuse. Il a expertisé des approches non conventionnelles et soumis même la meilleure science à un examen critique. Il était assez reconnu par ses pairs pour se permettre l'hétérodoxie. N. Herbert, en revanche, peinait à joindre les deux bouts, allant parfois même à l'assistance publique. Qui sait si, aujourd'hui, son article aurait été publié ? Notre système d'évaluation des contributions scientifiques laisse-t-il une chance de reconnaître ces quelques erreurs qui pourraient susciter un bond créatif en science ? ■

■ LES AUTEURS



David KAISER est professeur d'histoire des sciences au Département de physique de l'Institut de technologie du Massachusetts, aux États-Unis.



Angela CREAGER est professeur d'histoire de la biologie à l'Université de Princeton, aux États-Unis.

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Kaiser, *How the Hippies Saved Physics*, W. W. Norton, 2011.

G. Holton [dir.], *Errors : consequences of big mistakes in the natural and social sciences*, *Social Research*, n° 72, 2005.

S. Bergia, Einstein. *Le père du temps moderne*, Belin, 2004.

M. Morange, *Les mousquetaires de la nouvelle biologie*, *Les Génies de la Science*, n° 10, 2002.

A. Creager, *The Life of Virus : Tobacco Mosaic Virus as an Experimental Model, 1930-1965*, University of Chicago Press, 2001.

M. et M. Delbrück, *Bacterial viruses and sex*, *Scientific American*, vol. 179(5), pp. 46-51, 1948.