

Zeitschrift: Revue de Théologie et de Philosophie
Herausgeber: Revue de Théologie et de Philosophie
Band: 25 (1975)
Heft: 2

Artikel: Déterminisme et indéterminisme dans la nature physique
Autor: Jauch, Joseph M. / Bobin, J.-L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-381054>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

DÉTERMINISME ET INDÉTERMINISME DANS LA NATURE PHYSIQUE ¹

par † JOSEPH M. JAUCH
traduit de l'anglais par J.-L. BOBIN

SALVIATI — Nous avons pris à la fin de la quatrième journée de 1638, année mémorable, la résolution de nous réunir à nouveau lorsqu'il nous conviendrait pour satisfaire notre désir de mieux comprendre les problèmes qu'il nous restait à discuter.

Je propose que nous débattions aussi exactement et concrètement que possible des raisons naturelles auxquelles font appel d'une part les tenants d'une philosophie déterministe et d'autre part ceux qui suivent l'interprétation de l'Ecole de Copenhague de la mécanique quantique.

¹ Le texte présenté ici est tiré d'un volume, à paraître prochainement en langue française, paru en version originale aux Etats-Unis, en 1973, sous le titre « A Galilean Dialogue 'Are Quanta Real ?' », puis en traduction allemande au Hanser-Verlag à Munich, sous le titre « Die Wirklichkeit der Quanten, ein zeitgenössischer galileischer Dialog ». Josef M. Jauch y expose l'essentiel de la théorie quantique sous la forme aimable d'un dialogue galiléen. Les mêmes personnages s'y retrouvent et revêtent les mêmes caractères que dans les dialogues de Galilée. Salviati, défenseur des idées nouvelles de Copernic dans l'œuvre de Galilée, représente pour Jauch l'interprétation de la théorie quantique dite de Copenhague, telle qu'elle a été conçue par Bohr et Heisenberg. Sagredo est le personnage qui dans Galilée pousse à fond les questions soulevées par l'astronomie copernicienne. Jouant également chez Jauch le rôle d'un *advocatus diaboli*, il formule les doutes et les hésitations que le développement de la théorie quantique ne peut manquer de susciter. Quant à Simplicius, son nom évoque celui du grand commentateur d'Aristote et dans l'esprit de Galilée le simplisme un peu buté de ses adversaires scolastiques. Dans le dialogue de Jauch, il a opéré un demi-tour à gauche et défend avec une assurance imperturbable la nouvelle orthodoxie des tenants inconditionnels de la nécessité physique. La discussion entre les trois amis se déroule pendant quatre jours dans un jardin genevois au bord du lac Léman. Tout en présentant au lecteur une manière agréable de pénétrer dans les arcanes de la physique quantique, elle anime d'un art consommé ses personnages et en module finement la psychologie au gré des questions et des réponses.

Ce dialogue subtil et raffiné fut lu à trois voix en automne 1971 à la Pennsylvania State University, au cours d'une journée d'études consacrée aux problèmes philosophiques suscités par la théorie quantique. Seule la *Première Journée* est reproduite ici.

En retirant la réalité objective aux propriétés dont la présence simultanée ne pouvait être vérifiée que dans des situations physiques qui s'excluent l'une l'autre, BOHR remet en question cette même notion de réalité, qui fut la pierre angulaire de tout le développement de la physique depuis notre dernière discussion jusqu'à aujourd'hui.

Il serait par conséquent opportun de commencer notre discussion en examinant d'où vient la force des arguments des matérialistes et quelle en est l'intensité lorsqu'ils prétendent que l'hypothèse faite par BOHR de la complémentarité est inacceptable à leurs yeux.

Ils disent que le monde existe indépendamment de nos observations, que notre science se doit de révéler la réalité de ce monde et de déterminer ses lois qui sont absolues et immuables.

Ils donnent de nombreuses raisons qui vous sont familières, et la moindre n'est pas que nous vivons en pratique en accord avec ce point de vue, et qu'elle est de ce fait confirmée par le bon sens.

SIMPLICIO — Ce n'est pas seulement du bon sens, mais la réalité du monde peut être prouvée par la logique la plus subtile aussi bien que par l'expérimentation.

SAGREDO — Ne préjugeons pas, mes très respectables amis. Quant à moi, je ne suis pas assez savant pour suivre ces très subtils arguments que vous, SIMPLICIO, citez à l'appui de votre thèse de la réalité du monde, et en ce qui concerne les expériences que vous invoquez, je dois admettre que je n'en ai jamais entendu parler.

Vous deux semblez plus versés dans ces matières que je ne pourrai jamais espérer l'être ; cependant, je m'aventure à deviner d'après vos premiers propos que vous n'avez pas les mêmes vues sur la question de la réalité du monde et des objets qui le composent. Aussi n'attendez de moi aucune opinion définitive en cette matière avant que j'aie entendu vos arguments pour ou contre les points litigieux.

SALVIATI — Bien dit, cher ami, et je vous remercie de nous rappeler qu'il convient d'avancer plus prudemment et d'exposer nos points de vue avant d'invoquer des preuves sur des sujets qu'il nous faut examiner avec le plus grand soin et la plus grande ouverture d'esprit.

En conséquence, commençons d'abord par considérer l'une des situations les plus simples qui nous révèle la complémentarité de certaines propriétés physiques.

J'ai apporté deux morceaux de polaroid, matériau que vous connaissez tous et dont vous avez certainement fait usage en maintes occasions.

SIMPLICIO — Oui, je connais très bien ; mes lunettes de soleil sont faites d'un tel matériau.

SALVIATI — Certaines de leur propriétés vous sont alors familières. Par exemple, si nous regardons le ciel à travers, nous voyons des parties claires ou obscures suivant l'orientation du polaroïd par rapport à la ligne de visée.

SIMPLICIO — Nous connaissons tous cela depuis l'école primaire ; et tout le monde sait bien que le caractère transverse des ondes lumineuses en est responsable, ainsi que l'a montré FRESNEL dans son célèbre mémoire de 1822 ¹.

SAGREDO — Je crois que les remarquables phénomènes évoqués par SALVIATI en montrent plus. Il nous faut voir aussi que la lumière du ciel est partiellement polarisée, de sorte qu'elle a perdu la symétrie de révolution autour de la ligne de visée. Le polaroïd révèle cette asymétrie.

SALVIATI — Voilà qui est bien dit ! Décidément votre intelligence aiguë transforme cette discussion en un plaisir et justifie les espoirs de déboucher sur une meilleure compréhension des problèmes que nous rencontrons.

Ce que nous venons de voir pourrait être rendu plus frappant encore en utilisant non pas une seule mais deux lames de polaroïd l'une derrière l'autre. Regardant une source de lumière quelconque à travers elles, nous voyons que l'intensité dépend de leur orientation relative autour de l'axe de vision.

Il existe une orientation pour laquelle l'intensité transmise est maximum. Partant de cette position, je tourne la deuxième feuille de polaroïd autour de l'axe et vous pouvez voir que l'intensité transmise diminue. Elle atteint un minimum, obscurité complète, lorsque le second polariseur a été tourné de 90° par rapport au premier. Au-delà la lumière revient et atteint une nouvelle fois le maximum à 180° .

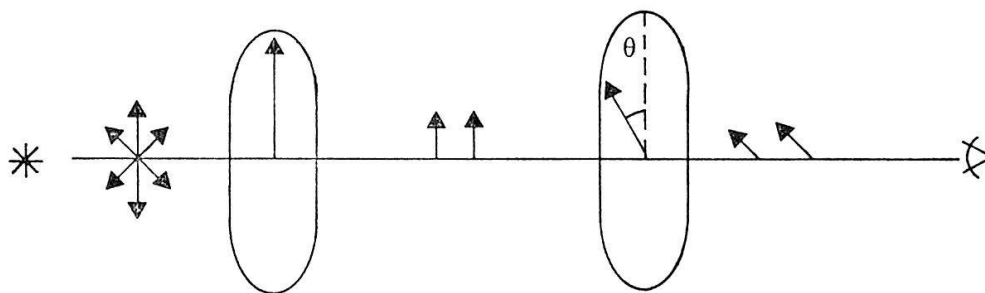


Fig. 1 : Observation d'une source lumineuse à travers deux feuilles de polaroïd.

¹ Référence est faite ici au mémoire : « Sur la double réfraction que les rayons lumineux éprouvent en traversant les aiguilles de cristal de roche, suivant les directions parallèles à l'axe. » Il contient les premières descriptions et interprétations correctes de la polarisation de la lumière.

Comment pouvons-nous comprendre ce remarquable comportement de la lumière lorsqu'elle traverse nos feuilles de polaroïd ?

SIMPLICIO — On comprend maintenant parfaitement ces phénomènes, depuis que FRESNEL a établi que la lumière se compose de vibrations transversales, puisque MAXWELL a montré qu'il s'agit d'un champ électromagnétique se propageant dans l'espace avec la vitesse de la lumière.

SAGREDO — Si je vous comprends bien, la lumière est un mouvement ondulatoire qui se propage dans l'espace comme les ondes se propagent à la surface de l'eau et les ondes sonores à travers l'atmosphère ?

SIMPLICIO — Exactement. La seule différence est que les ondes électromagnétiques se propagent dans un espace *vide* et qu'elles sont *transversales* comme le montre l'expérience de SALVIATI avec ses deux polariseurs ¹.

SAGREDO — Je remarque avec un certain étonnement que vous avez complètement rejeté l'enseignement d'ARISTOTE que vous aviez défendu avec tant de vigueur.

Vous n'êtes pas sans savoir qu'ARISTOTE déniait toute existence au vide, et que son espace est rempli d'une certaine substance. Comme tout serait plus facile si nous avions cette substance à notre disposition pour servir de support aux ondes lumineuses, de même que l'eau est le support des ondes à sa surface, ou l'air, le support des ondes sonores. Pourquoi refusez-vous d'admettre qu'une substance puisse servir de support aux ondes lumineuses ² ?

SIMPLICIO — Il est vrai que j'ai tenu autrefois ARISTOTE pour le plus grand philosophe de tous les temps. Mais vous ne pouvez pas me reprocher d'avoir activement soutenu sa thèse de l'espace plein. J'ai depuis longtemps reconnu que DÉMOCRITE a été bien plus près de la vérité en cette matière et qu'un vide peuplé d'atomes réels et traversé de champs d'espèces diverses est une représentation correcte de notre univers physique.

¹ SIMPLICIO se classe ici parmi les relativistes. Il rejette définitivement l'éther comme porteur des vibrations lumineuses, notion qui domina la pensée de la deuxième moitié du XIX^e siècle. L'expérience cruciale fut faite par MICHELSON et MORLEY. Elle ne put détecter aucun « vent d'éther » dû au mouvement de la terre. Ce fut le point de départ de la théorie de la relativité développée par EINSTEIN en 1905.

² Le SIMPLICIO originel du dialogue de GALILÉE était le héraut de la philosophie d'ARISTOTE qui au XVII^e siècle jouait un rôle comparable à celui du matérialisme dialectique aujourd'hui. SAGREDO, en rappelant à SIMPLICIO son retournement de veste, souligne à cette occasion le fait que nos notions scientifiques ne sont pas indépendantes de nos idéologies.

SAGREDO — Si je comprends bien, il existe selon vous deux sortes de réalités dans l'univers physique : des atomes et des champs ¹.

SIMPLICIO — C'est correct. Et l'une comme l'autre de ces réalités sont soumises à des lois d'évolution dynamique que nous ne connaissons qu'en partie aujourd'hui et que nous découvrirons finalement dans leur totalité, ce qui nous donnera une connaissance complète des structures physiques du monde.

SAGREDO — Oui, mais je vous en prie, vous ne nous avez pas encore expliqué pourquoi vous refusez l'existence d'une substance support des ondes lumineuses.

SIMPLICIO — Vous savez bien que je ne suis pas physicien, mais des physiciens de mes amis m'ont dit que l'hypothèse d'une telle substance non seulement n'était pas nécessaire, mais en plus conduit à des difficultés lorsque l'on étudie la propagation de la lumière du point de vue de plusieurs observateurs en mouvement les uns par rapport aux autres.

SALVIATI — Ne nous égarons pas, car il nous reste beaucoup de chemin à parcourir et la route est mal pavée. Nous sommes heureux d'entendre les questions stimulantes et pénétrantes de SAGREDO et de profiter de l'érudition de SIMPLICIO. Mais bien que ses réponses aient l'apparence de la perfection par leur clarté et leur précision, il nous faut revenir à la réalité des phénomènes, juge en dernier ressort de toutes les représentations théoriques que nous proposons.

Reprenons notre expérience avec les deux feuilles de polaroid, et faisons décroître l'intensité de la lumière. Que va-t-il se passer ?

SIMPLICIO — L'intensité de la lumière transmise décroît en proportions égales pour toutes les positions relatives des lames.

SALVIATI — Vous avez raison et il est en effet facile d'observer cela. Cependant, je reste préoccupé par le point de savoir si cette observation tient toujours aux plus faibles intensités possibles.

SIMPLICIO — Je ne vois pas où vous voulez en venir, à moins que vous ne pensiez me demander ce qui va se passer lorsque la nature corpusculaire de la lumière est mise en évidence.

SALVIATI — C'était bien mon idée et puisque vous avez déjà anticipé ma question, laissez-moi être plus précis. Je choisis pour

¹ Voici le premier d'une série de pièges. Particules et champs sont des notions complémentaires. Une théorie unifiée, contenant les deux entités en même temps, exige la renonciation aux attributs de la réalité, ce que SIMPLICIO n'est pas préparé à admettre. Sa réponse montre qu'il ne voit pas les chausse-trapes, et il affirme naïvement sa foi dans la réalité de ces concepts.

source de lumière un seul atome qui va passer d'un état excité d'énergie E_1 à un état fondamental d'énergie E_0 , émettant de la sorte un unique quantum de lumière, un photon de fréquence

$$\nu = \frac{E_1 - E_0}{h}$$

(h étant la constante de PLANCK)

Le photon arrive sur les deux lames de polaroïd et je pose maintenant la question : passera-t-il à travers les deux ou sera-t-il absorbé dans la seconde ¹ ?

SAGREDO — Cette question est des plus embarrassantes. Bien que je ne sache pas toujours évaluer les réponses de notre ami SIMPLICIO, l'histoire des sciences depuis notre discussion en 1638 a montré qu'il s'était magistralement trompé sur bien des points. Cependant, je ne peux dire que son explication par les ondes électromagnétiques transverses et polarisées m'ait déplu. Ce qui me trouble est que je ne puis trouver dans cette image de réponse à votre question, SALVIATI ².

SALVIATI — La question est restée difficile et j'irai même plus loin que vous, SAGREDO, car je suis finalement convaincu non seulement de la difficulté de lui trouver une réponse, mais bien de l'impossibilité de le faire par la théorie de l'onde transverse de SIMPLICIO.

SAGREDO — Qu'entendez-vous par là ? La théorie de la propagation de la lumière par des ondes transversales s'appuie sur des centaines d'expériences plus raffinées les unes que les autres, de YOUNG et FRESNEL à nos jours. Une théorie si puissante, si efficace et si belle peut-elle être fausse ? Vous remettez en cause cent cinquante ans d'optique physique !

SALVIATI — Je ne prétends aucunement que les expériences d'optique physique auxquelles vous faites allusion sont fausses. Je dis que la théorie des ondes que SIMPLICIO nous a si bien expliquée, est incapable de prédire ce qui va arriver à un *unique photon* quand il doit traverser deux polariseurs croisés. Si vous ne me croyez pas, prouvez-moi le contraire. Je serai le premier à reconnaître ma défaite si vous y réussissez.

¹ Voici le point où l'aspect complémentaire des particules et des champs est exploité pour défier SIMPLICIO.

² Le commentaire de SAGREDO est sans aucun doute d'une sincérité douteuse. Il sert trop bien les idées de SALVIATI.

Aucun de vos physiciens qui ont établi l'optique physique n'a jamais travaillé avec un photon isolé, de sorte qu'aucun ne pouvait découvrir que la théorie tombe lorsqu'on l'applique au photon individuel.

En effet, la notion même du photon comme une sorte d'atome de lumière est entièrement étrangère à la structure d'un champ telle que nous l'imaginons. Celui-là est une entité discrète, indivisible, celle-ci un continu. Il est difficile de réconcilier ces deux notions dans un seul et même objet physique.

SAGREDO — Cette rupture de l'unité de la science que vous indiquez dans vos remarques me dérange profondément. C'est comme s'il existait une dualité fondamentale dans la nature qui nous fournit des descriptions complémentaires d'un seul et même objet.

Car si je réponds à votre question en affirmant que le photon va pénétrer la deuxième feuille de polaroïd, je ne vois pas de raison pour avoir aucun affaiblissement de lumière en fonction de l'orientation relative du polarisateur entre 0 et 90°. Si d'autre part je réponds en affirmant que le photon *ne va pas* pénétrer, il devrait y avoir obscurité complète derrière le deuxième polariseur. Comme on n'observe ni l'un ni l'autre, aucune de ces deux réponses ne doit être correcte.

SALVIATI — Effectivement, aucune n'est correcte, ou plutôt toutes deux sont correctes et toutes deux sont fausses.

SIMPLICIO — Vous n'êtes évidemment pas sérieux.

SALVIATI — Oh ! que si ! Et je le prouve !

SIMPLICIO — Eh ! là, SALVIATI ! Votre ambition vous entraîne trop loin. Comment osez-vous espérer prouver quelque chose qui défie manifestement la raison ? Car ce photon, ou bien il entre, ou bien il n'entre pas dans les polariseurs et il me semble bien qu'il n'y a pas de troisième voie entre ces deux incompatibilités.

SALVIATI — Combien la raison humaine est limitée devant les mystères de la nature ! Nous avons atteint les limites de la raison et il nous faut avec humilité revenir à la nature. Elle seule peut répondre et sa réponse est plus vraie que celle que moi-même ou l'un de nous pourrait concevoir.

Alors dans ce but j'ai monté une petite expérience. La source de lumière est remplacée par un seul atome qui émettra un photon en passant de l'état excité d'énergie E_1 à l'état fondamental d'énergie E_0 . Après cette transition je remplace cet atome par un autre semblable,

puis par un troisième, etc. Je mets à la place de l'œil un instrument appelé tube photomultiplicateur dont le seul but est d'enregistrer l'arrivée du photon après le deuxième polariseur, dont l'axe est orienté à 45° de celui du premier. Un système automatique permet de recueillir les résultats sur une bande de papier qui porte imprimée une suite de 0 et de 1. 0 signifie que le photon n'est pas arrivé, 1 qu'il est bien arrivé sur la photocathode du tube. Je mets l'expérience en marche en agissant sur ce contacteur, et nous allons attendre la suite.

Voilà ! Le ruban sort et nous y lisons ceci :

110101101010100110

SIMPLICIO — Quelque chose ne doit pas coller dans votre machine, car elle ne semble pas nous donner de réponse bien définie.

SALVIATI — Mais, SIMPLICIO, vous n'attendez pas de réponse bien définie, car vous avez prouvé qu'aucune n'est possible, puisque toutes deux conduisent à une contradiction avec les observations faites à forte intensité.

SIMPLICIO — Cela est vrai, mais je n'espérais pas non plus une telle réponse. Peut-être y a-t-il dans cette suite de zéros et de uns, un ordre qui nous échappe. Certainement, ce ne peut être une simple alternance et je ne discerne aucun ordre caché qui s'impose avec plus d'évidence.

SALVIATI — Je vais laisser la machine en marche pendant que notre discussion continue et vous pouvez examiner les résultats en toute indépendance d'esprit. En fait pour vous rendre la tâche plus facile, je vais emmagasiner l'information dans cet ordinateur que je relie à la sortie du photomultiplicateur. L'ordinateur a un programme qui soumet les résultats à un certain nombre de tests de hasard au fur et à mesure qu'ils arrivent. De la sorte tout ordre sera mis en évidence.

SAGREDO — Cette suite de zéros et de uns que vous nous avez montrée ressemble tout à fait aux résultats d'une partie de pile ou face.

SALVIATI — Très juste et je peux bien vous dire que j'ai fait fonctionner ce montage bien des fois et que je n'ai jamais été capable de découvrir une différence entre la suite observée et une suite aléatoire que l'on obtiendrait comme vous l'avez dit.

SAGREDO — Ne faudrait-il pas en conclure que le même mécanisme qui produit la suite aléatoire à pile ou face, ou du moins un mécanisme analogue, est responsable de la suite aléatoire de votre expérience avec les polariseurs ?

SIMPLICIO — Nous savons tous bien sûr que différents effets doivent avoir des causes différentes. C'est un principe aussi fondamental que le principe de contradiction. Dans le jeu de pile ou face nous produisons la suite aléatoire en faisant varier un peu de façon inévitable les conditions initiales, de même qu'il y a de petites variations de conditions tant que la pièce est en l'air. Si nous étions suffisamment maîtres de ces conditions, le caractère aléatoire disparaîtrait et laisserait la place à une suite parfaitement ordonnée de « pile » ou de « face ». C'est une certitude, car les équations du mouvement sont déterministes et en accord avec cette affirmation. De plus je connais effectivement un homme dont la main est si experte qu'il peut presque toujours lancer la pièce de telle sorte qu'elle retombe sur le côté désiré. J'ai moi-même essayé et avec un peu d'entraînement j'arrive à obtenir le résultat cherché dans environ 80 % des cas, ce qui m'assure quelque gain dans des paris.

Ainsi je ne doute pas que chaque photon émis par la source est légèrement différent des autres, et que cette différence se manifesterait finalement par la transmission ou l'absorption dans la deuxième feuille de polaroïd.

Il n'y a rien par conséquent de mystérieux dans la suite aléatoire, résultat de l'expérience avec les photons. Cela prouve tout simplement qu'une description complète de l'état physique du photon nécessite une *variable cachée* et que cette variable cachée a différentes valeurs pour chacun des photons que nous observons isolément.

SALVIATI — Entendez-vous par *cachée*, inaccessible à toutes nos tentatives ultérieures de mesures ?

SIMPLICIO — Vous essayez de me coincer. Je connais très bien la difficulté de donner l'une ou l'autre réponse à votre question. J'ai dit naturellement *cachée* simplement parce que comme à pile ou face il serait très difficile de fixer les conditions de la source lumineuse avec une précision telle qu'elles déterminent complètement le résultat de toute future mesure. Mais vous n'allez tout de même pas prétendre que les conditions de l'atome qui émet les photons sont complètement reproductibles. Il reste donc de la place pour une variété plus fine de conditions initiales que l'on pourrait corrélérer au résultat de l'expérience.

SALVIATI — J'ai bien peur, SIMPLICIO, que vous ne passiez à côté d'un point important dans la comparaison de l'expérience de polarisation avec le jeu de pile ou face.

SIMPLICIO — Et lequel ?

SALVIATI — Dans l'expérience de polarisation, nous avons deux polariseurs. Seul le second correspond à la mise en évidence du résultat « pile » ou « face ».

SIMPLICIO — Qu'à cela ne tienne ! Il nous suffit d'inclure la première lame dans cette partie de l'expérience qui prépare l'état du photon et alors nous retrouvons l'analogie.

SALVIATI — Très bien, très bien, mais alors dites-moi, attribuez-vous le résultat donné par la deuxième lame à la source ou à la première lame ?

SIMPLICIO — Je dirai : la source, car le premier polariseur est un système simple qui reste identique à lui-même, alors que l'état de la source change pour chaque photon émis.

SALVIATI — Voilà qui semble raisonnable. Mais voyons si cela tient debout. Pour le vérifier j'ai ici une troisième feuille de polaroïd que je place derrière les deux autres et je l'oriente de telle sorte que son axe de polarisation fasse un angle de 45° avec celui de la seconde et 90° avec celui de la première. Voyons ce qui va se passer. Voilà, ça vient. Nous trouvons encore une suite de zéros et de uns qui a une allure quelque peu différente.

01000100000100000101000101000100

Il n'y a pas de doute, cette suite montre beaucoup moins de « un » que de « zéro », en fait 8 « un » seulement et 24 « zéro ».

SIMPLICIO — Oui, je vois bien.

SAGREDO — C'est comme à pile ou face, lorsque pour gagner il faut avoir deux fois de suite « face ». Je pense que cela donnerait la même distribution.

SALVIATI — Parfaitement vrai. Mais n'oublions pas que cette expérience était destinée à vérifier si des variables cachées sont associées à la source de lumière, ou si nous devons rendre les polariseurs responsables des valeurs qu'elles pourraient prendre.

SIMPLICIO — Comment pouvons-nous le savoir par cette expérience ?

SALVIATI — Très simplement. Par une légère modification de l'expérience présente qui, par parenthèse, a continué à marcher et à sortir une centaine de chiffres pendant que nous parlions.

Vous voyez que les « un » continuent d'apparaître mais à peu près une fois sur quatre seulement.

Ne changeons rien à la source et enlevons la lame du milieu. Il nous reste deux polariseurs croisés. Je vous rappelle sur ce croquis la disposition des lames.

responsables des valeurs des paramètres cachés. Et cela me fait penser à quelque chose qui n'est pas du domaine de la science, mais qui présente une certaine analogie avec notre situation.

Ceux qui ont le privilège de vivre dans une nation où la loi est respectée, sont accoutumés à l'idée que tout individu accusé d'un crime est présumé innocent tant que l'on n'a pas de preuve de sa culpabilité.

On m'a dit que dans certains pays, c'est juste le contraire. Là vous êtes supposé coupable tant que vous n'avez pas vous-même prouvé votre innocence de façon satisfaisante pour l'accusation.

Dans une certaine mesure, la deuxième version facilite le travail de l'accusation, de même que la théorie des variables cachées de SIMPLICIO facilite le travail du physicien. Mais quiconque connaît le premier système sera d'accord pour dire qu'il offre une meilleure chance d'aboutir à un verdict juste.

SIMPLICIO semble avoir choisi une solution du second type pour expliquer la suite aléatoire qui apparaît dans l'expérience de SALVIATI sur le photon. Il semble agir plus ou moins comme le procureur pressé, car il trouve que la suite aléatoire est aussi inacceptable qu'un crime et qu'un coupable doit être immédiatement trouvé. Il a choisi le plus simple : la source de lumière. Mais votre expérience avec les trois polariseurs montre que le crime ressemble plutôt à une conspiration. Du moins avons-nous la preuve tangible que celui du milieu porte quelque responsabilité dans le crime. Et puisque les autres lui sont identiques dans leur structure physique, il existe de bonnes raisons de les soupçonner aussi. Mais la situation devient embarrassante quand nous avons tant de coupables à la fois.

Peut-être n'avons-nous découvert qu'une petite partie d'une conspiration beaucoup plus vaste destinée à nous embarrasser dans des suites aléatoires en certains points déterminants de notre recherche.

SIMPLICIO — Je ne crois pas que votre analogie soit correcte ni d'ailleurs de bonne foi. Tout ce que j'ai dit à propos des suites aléatoires, c'est que le photon qui passe à travers le polariseur et celui qui y est absorbé doivent avoir des propriétés physiques différentes. Et une description théorique de la nature qui n'inclut pas de notions relatives à cette différence me semble parfaitement incomplète.

Dans le jeu de pile ou face nous trouvons une telle notion avec les conditions initiales. Dans le cas du mouvement brownien qui fut également un défi au bon sens, nous la trouvons dans la constitution atomique de la matière. Le concept est d'une importance capitale et personne n'oserait aujourd'hui remettre en cause sa valeur scientifique.

Dans l'expérience avec le photon, nous avons une fois de plus révélé un processus aléatoire qui n'est pas tellement différent du mouvement brownien. Alors il me paraît naturel et bien dans la

tradition d'une science saine, de chercher une explication de l'expérience du photon analogue au mouvement brownien.

SALVIATI — Vos arguments sont aussi convaincants que décevants. En effet, vous attribuez une grande importance à la *similitude* des situations entre l'expérience du photon et le mouvement brownien mais vous avez choisi de laisser toutes les différences. Vous prétendez donc convaincre le vulgaire sur la base d'une telle similitude.

Or nous ne devons pas décider à la majorité, car dans les sciences la démocratie est remarquablement inefficace. Les idées fortes et courageuses des non-conformistes ont toujours été les facteurs véritables du progrès scientifique. Vous vous rappelez trop bien notre dernière discussion pour ne pas le savoir. Il s'agissait du problème de l'origine des marées et de l'opinion du célèbre Académicien sur ce sujet. Nous savons aujourd'hui qu'il était très loin de la vérité, mais s'il n'avait pas eu le courage de défendre son point de vue qui était nouveau, original et fructueux, nous en serions encore à nous demander si la lune est faite d'une cinquième substance ayant la perfection du verre.

SIMPLICIO — Vous parlez de différences que j'aurais choisi d'ignorer. Quelles sont-elles ? Je voudrais les connaître pour voir par moi-même si elles ne sont pas des différences de degré plutôt que des différences essentielles.

SAGREDO — Oui, SALVIATI, dites-nous quelles différences nous obligent à adopter une autre raison que les variables cachées pour l'apparition de la séquence aléatoire dans votre expérience. Je dois avouer que j'ai souvent entendu discuter ce point. Il me semble capital pour la structure logique et phénoménologique de la microphysique. BOHR appelait cette autre solution le *principe de complémentarité* et c'est peut-être l'une des plus grandes découvertes de l'histoire scientifique de l'humanité, qui a des ramifications dans tous les niveaux de la science.

Mais je crains de trop parler. Je préfère recourir à SALVIATI, beaucoup plus versé que moi dans ces matières. Ce sera un plaisir de l'entendre expliquer ce principe une fois de plus avec la lucidité et la pénétration que nous avons appris à apprécier.

SALVIATI — C'est trop d'honneur que vous me faites. Vous savez très bien que je n'ai jamais caché un profond sentiment d'humilité lorsque je parle de la complémentarité. Il me semble que nous avons atteint une sorte de limite des possibilités de l'esprit, qui apparaît comme bien d'autres contingences auxquelles nous sommes soumis. Pourquoi avons-nous deux mains et deux pieds ? Pourquoi vos yeux voient-ils une si faible partie du spectre ? Pourquoi notre terre est-elle

faite ainsi que nous la connaissons ? Et pourquoi la constante de PLANCK a-t-elle la valeur révélée par nos mesures ?

C'est bien là d'où tout est parti : cette étrange histoire du quantum d'action. Histoire pleine de surprises, d'erreurs, de confusions et d'audaces, une véritable mutation scientifique¹.

Mais trêve de généralités. Vous êtes, SIMPLICIO, impatient de connaître ce qu'il y a d'essentiellement différent dans l'apparition de la suite aléatoire qui ne pourrait être expliqué par une représentation analogue à celle qui nous a servi pour le mouvement brownien.

Je suis sûr que vous êtes déjà averti de ces différences. Ce n'est que dans votre désir de trouver une explication qui soit conforme à votre idéologie que vous les avez fort à propos oubliées. Donc, si vous permettez, je vais vous poser quelques questions qui vous rafraîchiront la mémoire.

SIMPLICIO — Allez-y ! Je trouve toujours vos questions piquantes.

SALVIATI — Vous vous rappelez le point de départ de notre expérience : une simple observation avec des filtres polaroïd. Un enfant pourrait la faire.

SIMPLICIO — Bien sûr que je me le rappelle.

SALVIATI — De plus nous n'avions aucune difficulté particulière à expliquer l'expérience sur la base de la théorie ondulatoire classique de la lumière.

SIMPLICIO — Pas la moindre difficulté. De fait la théorie classique donne la variation correcte de l'intensité en fonction de l'angle θ , orientation relative des deux lames :

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

SALVIATI — Vous diriez donc que les difficultés ne sont apparues que lorsque nous avons voulu faire l'expérience avec des photons isolés.

SIMPLICIO — Assurément. C'est bien à ce point qu'apparaissent les difficultés.

SALVIATI — Ainsi l'existence des photons est la source de tous nos problèmes.

SIMPLICIO — Il me paraît qu'il en est effectivement bien ainsi.

SALVIATI — Dites-moi, SIMPLICIO, ne devrions-nous pas appeler le photon : un « atome » de lumière ?

¹ Ceci est une allusion à l'essai très perspicace de THOMAS S. KUHN : *La structure des révolutions scientifiques* (Chicago, University of Chicago Press 1962) où cet auteur insiste particulièrement sur l'aspect discontinu du progrès scientifique.

SIMPLICIO — Si vous entendez par « atome », indivisible au sens des anciens Grecs, cette dénomination me paraît appropriée.

SALVIATI — Vous avez mentionné il y a quelques instants le mouvement brownien comme une situation analogue au caractère aléatoire des systèmes physiques de petites dimensions. Comment a-t-on intégré le mouvement brownien au reste de la physique ?

SIMPLICIO — Nous appelons mouvement brownien la fluctuation aléatoire de la position et de la vitesse d'objets physiques très petits exposés aux impulsions désordonnées d'atomes et de molécules. Quand on a fait cette découverte, on peut non seulement l'expliquer mais encore vérifier la taille et le nombre des atomes qui causent ce mouvement désordonné.

SALVIATI — Vous diriez donc que l'hypothèse d'une nature atomique de la matière *explique* l'apparition des fluctuations aléatoires du mouvement brownien.

SIMPLICIO — A la vérité, il en est bien ainsi.

SALVIATI — Tandis qu'avec les photons et leur fluctuation aléatoire c'est le contraire ?

SIMPLICIO — Qu'entendez-vous par là ?

SALVIATI — Ne venez-vous pas il y a quelques minutes d'admettre que c'était la nature « atomique » de la lumière qui cause toutes les difficultés de l'expérience de polarisation ?

SIMPLICIO — Oui, en effet.

SALVIATI — Et ne nous avez-vous pas expliqué que la théorie qui ne tient pas compte de l'individualité des photons donne l'expression correcte pour la variation de l'intensité transverse ?

SIMPLICIO — Oui, bien sûr.

SALVIATI — Voyez-vous maintenant combien faible est votre raisonnement par analogie lorsque vous y regardez de plus près ?

SIMPLICIO — Je ne sais quoi dire ; vous avez réussi à m'embarasser, mais cela prouve simplement que vous vous défendez mieux que moi dans cette sorte de discussion. J'ai besoin d'y réfléchir plus longuement.

SALVIATI — Vous avez tout votre temps. Je n'aime pas tellement vous mettre dans l'embarras. En un sens nous y sommes tous face aux propriétés étonnantes de la lumière et des objets microscopiques.

Tout ce que j'essaie de faire est d'éliminer autant de fausses routes que possible, ce qui nous laisse beaucoup moins de possibilités parmi lesquelles trouver la bonne, celle qui mène à comprendre la complémentarité fondamentale qui prévaut dans tout l'univers physique.

Mais nous devons accorder à SAGREDO une chance d'épiloguer sur ce sujet, car il a une manière originale de considérer nos problèmes qui nous ouvre souvent de nouvelles perspectives.

SAGREDO — Mon cher SALVIATI, vous me rappelez un peu l'un de ces procureurs intelligents capables de faire dire n'importe quoi à un témoin rétif. Vous avez presque réussi à me convaincre du caractère douteux de l'analogie entre la suite aléatoire de l'expérience des photons et le mouvement brownien. Mais ne devrions-nous pas aller plus loin et admettre du moins en théorie la possibilité pour la réalité physique de se manifester différemment à différents niveaux et que découvrir les structures atomiques nous fait simplement passer d'un niveau, le continu classique, à un autre : les états microscopiques quantifiés.

Or, au niveau atomique, nous observons des suites aléatoires inexplicables d'événements que nous ne pouvons corrélérer à rien d'autre qui soit observable au même niveau. N'est-il pas alors naturel de postuler qu'il existe un niveau entièrement nouveau de réalité que nous découvrons ainsi, peut-être de façon incomplète jusqu'ici, et qu'il nous appartient d'expliquer d'autres phénomènes qui pourraient nous éclairer sur un éventuel substrat de cette réalité.

Je me rends compte du vague de mes propos qui n'ont peut-être après tout aucun sens. Je sollicite cependant votre indulgence, car je ne suis pas autant que vous habitué à la rigueur des discussions scientifiques et suis plus enclin à l'imagination et à la rêverie. Mais je reste hanté par les soucis de SIMPLICIO. Je me sentrais plus à l'aise si je voyais une représentation physique cohérente qui nous donnerait une description causale cohérente de la suite aléatoire des photons.

SALVIATI — On ne peut qu'être d'accord avec cet éloquent plaider, et vos propos sont frappés au coin du bon sens. Je vous suis très reconnaissant de votre intervention et je vois que notre ami SIMPLICIO s'est lui-même remis de l'état dépressif qui était le sien il y a quelques minutes.

SIMPLICIO — SAGREDO a très bien rendu ce que je désirais dire d'entrée. Seulement je m'y suis pris si maladroitement que vous, SALVIATI, n'avez eu aucune peine à réfuter mes arguments. Mais, entendant SAGREDO, je me suis souvenu de ce grand maître et homme

d'Etat¹ qui nous a enseigné une vérité fondamentale : il existe une liaison interne entre tous les événements naturels et il est incorrect de considérer les objets et les événements comme isolés les uns des autres. En d'autres termes, il n'existe pas de phénomènes séparés, mais chacun d'eux perçu individuellement appartient à un tout auquel il est intégré.

Ainsi, après un regard superficiel, nous pourrions penser que les photons se conduisent en individus capricieux, mais si nous pouvions pénétrer plus profondément dans la structure interne du monde, nous découvririons qu'ils s'intègrent à une structure réelle plus vaste, qui jusqu'ici nous échappe. Leur comportement nous apparaîtrait alors comme l'effet des propriétés physiques de cette plus vaste structure.

Si nous étions capable de percevoir ce lien causal, nous découvririons en plus qu'il n'est qu'une faible partie du réseau général de relations causales qui lient les différentes parties de l'univers matériel. Cela enrichirait considérablement notre connaissance des phénomènes observés comme de ceux dont l'observation est encore à venir.

SALVIATI — Dites-moi, SIMPLICIO, croyez-vous à l'astrologie ?

SIMPLICIO — Certainement pas. L'astrologie n'est qu'une superstition que des individus sans scrupules utilisent pour façonner et contrôler l'opinion publique et exploiter d'autres individus. Elle n'a aucune valeur pour un scientifique qui ne doit pas s'occuper d'une telle supercherie. Mais voyons, pourquoi cette question ?

SALVIATI — Parce qu'à vous entendre, il m'est revenu un passage du *Timée* de PLATON². Je ne suis pas sûr de m'en souvenir exactement mais il me semble que l'argumentation était la même que la vôtre. Car PLATON tient l'univers pour un être vivant unique dont toute partie n'est que la partie d'un tout. Les âmes des hommes sont des étoiles qui pénètrent dans l'homme à sa naissance et retournent à leur place à sa mort. Ainsi le destin des hommes est intimement entremêlé avec le reste de l'univers, en particulier avec les étoiles.

SAGREDO — Cela ne s'applique pas qu'à l'astrologie. J'ai entendu dire qu'avant même que les Chaldéens aient proposé de faire dépendre les hommes des étoiles, bien des méthodes de divination étaient en usage pour établir des liens entre des événements apparemment

¹ Référence est faite ici à l'ouvrage de LÉNINE sur le *Matérialisme et la critique empirique*.

² Le dialogue de PLATON, *Le Timée*, était le seul ouvrage du philosophe grec connu au début du Moyen Age par une traduction en latin. Il eut une influence extraordinaire sur la pensée médiévale et donna une image complètement distordue de la philosophie grecque que l'on identifiait avec son contenu.

indépendants. Par exemple, on a découvert que, versant de l'huile sur de l'eau, les différentes formes prises lorsque la couche d'huile s'étend, révélaient les événements à venir.

Il y avait aussi une technique très avancée d'hépatoscopie servant à prédire l'avenir aux hommes. Elle consistait à recueillir et interpréter les figures, structures ou lignes apparemment erratiques à la surface du foie des animaux sacrifiés.

Encore une autre forme de divination qui a toujours beaucoup de succès : celle du Chinois I-CHING dans « Le livre des métamorphoses ». Ici l'arrangement au hasard d'une ligne brisée et d'une ligne fermée représentant les deux principes opposés « YIN » et « YANG » est relié au destin des hommes.

SALVIATI — Ces choses sont loin d'être comprises et les ignorer comme pures sottises est assez contraire à l'esprit scientifique. Je voudrais ajouter que le test de RORSCHACH, qui ressemble à beaucoup d'égards à l'huile versée sur l'eau, est d'un usage universel chez nos psychiatres et qu'il se révèle un utile instrument de diagnostic.

Aussi, prenons au sérieux la suggestion de SIMPLICIO et essayons de nous en servir, sans oublier toutefois sa parenté avec la magie et les pratiques divinatoires, ce qui pourrait le laisser moins à l'aise qu'il ne l'espérait.

SIMPLICIO — J'admire votre esprit de tolérance, mais je sais d'expérience que ce n'est qu'une feinte pour détruire plus sûrement une théorie contraire à vos idées préconçues.

SALVIATI — Allons, SIMPLICIO. Vous vous montrez ici fort injuste. Je ne cherche que la vérité sous quelque forme qu'elle nous soit révélée.

N'avons-nous pas vu des centaines d'années qui comptaient parmi les plus exaltantes de l'histoire des sciences, depuis que notre grand maître, l'Académicien ¹ qui inspira notre premier débat, remplaça la physique d'ARISTOTE par une nouvelle physique, marquant ainsi le début de l'ère moderne de l'histoire des sciences.

Vous vous rappelez sans nul doute qu'il était fasciné par le cercle comme l'avaient été avant lui ARISTOTE, PTOLÉMÉE et ARCHIMÈDE. Or la véritable nature de la nouvelle physique qu'il a découverte contenait en germe la destruction de cette magie du cercle.

Je crois sincèrement que si notre grand maître était encore présent parmi nous, il serait le premier à reconnaître son erreur. Et avec son originalité habituelle qui nous a si souvent frappés, il nous conduirait encore à des idées plus profondes et plus fécondes.

Telle est l'essence du progrès scientifique. Il peut transcender ses propres frontières par un élargissement du domaine de la connaissance

¹ Galilée lui-même, membre de l'*Accademia dei Lincei* fondée par le prince Cesi.

consciente qui a pour point de départ des archétypes puisés dans notre plus profond subconscient.

Dans cette région de notre personnalité, la raison ne s'impose pas comme elle le fait au niveau conscient de la connaissance scientifique. Là, les différentes fonctions mentales se manifestent de façon non différenciée et fournissent des images au contenu symbolique. Celles-ci sont les degrés essentiels du processus d'individualisation ou d'individuation (Jung).

Je ne trouve pas déshonorant de reconnaître la source irrationnelle de nos plus belles et plus fécondes idées scientifiques, car la vie elle-même et tout ce qu'elle embrasse, reste pour nous un mystère malgré toutes les découvertes faites ces dernières années.

SAGREDO — Votre conception générale du progrès scientifique peut être illustrée par la célèbre découverte des nombres irrationnels par les Pythagoriciens. N'enseignaient-ils pas que les vérités éternelles se trouvent dans les harmonies du monde physique, qui peuvent s'exprimer en termes de nombres entiers ou de rapports de tels nombres ? Quand ils découvrirent que la diagonale du carré ne pouvait pas être reliée ainsi aux côtés, ils furent profondément troublés, car cette découverte remettait en cause les principes idéologiques sur lesquels en fait reposaient leurs croyances ¹.

SALVIATI — Exactement ! la découverte des nombres irrationnels est vraiment l'une des plus grandes que l'homme ait jamais faite. Elle suffirait à l'immortalité du nom de celui qui la fit.

¹ La première démonstration que $\sqrt{2}$ est irrationnel remonte à EUCLIDE (*Éléments* X, appendice 27), mais par tradition on attribue sa découverte aux Pythagoriciens, qui considéraient l'irrationnel comme un mystère et imposèrent le secret sur ce sujet aux membres de leur communauté. C'est une démonstration par l'absurde qu'ARISTOTE donne comme exemple de ce type de démonstration (*Premiers analytiques* I, 23). Elle est brève autant qu'élégante :

Supposons que $2 = m/n$ où m et n n'aient aucun diviseur commun. Il s'ensuit :

$$2n^2 = m^2$$

ce qui montre que m est un nombre pair, soit $m = 2p$. Ainsi :

$$2n^2 = 4p^2 \text{ ou } n^2 = 2p^2$$

Donc n est également pair, soit $n = 2q$. Alors m et n sont tous les deux pairs et admettent 2 comme diviseur commun. C'est en contradiction avec l'hypothèse. D'où 2 est irrationnel ; c.q.f.d.

Cette découverte mit les Pythagoriciens dans un grand embarras, car elle semblait en opposition avec leur conviction fondamentale que toute mesure peut finalement se réduire à des nombres entiers.

En dépit de cette erreur en théorie des nombres, le Pythagorisme, sous des formes variées, joue un rôle important dans l'histoire de la science jusqu'à nos jours et certaines des plus importantes découvertes furent faites sous son influence.

Aussi ne soyons pas effrayés par les idéologies et leurs systèmes d'images. Nous devons les prendre au sérieux en tant qu'expressions symboliques de la structure de l'esprit humain, source infiniment riche de nouvelles idées scientifiques ¹.

SAGREDO — Le moment me paraît bien choisi pour clore notre discussion d'aujourd'hui, car, mon cher SALVIATI, il nous faut méditer votre dernière remarque. Aussi prenons quelques loisirs et détendons-nous en contemplant cet admirable lac. Je vois qu'une légère brise du soir s'est levée et je vous invite à tirer quelques bordées sur mon voilier.

¹ Dans la psychologie de C. G. JUNG, les « archétypes » sont le contenu de l'inconscient collectif. Ce sont des images symboliques apparaissant spontanément à certains stades du développement de l'individu dans des rêves, des rêveries, ou des productions artistiques et littéraires. SALVIATI exprime l'opinion que ces symboles « irrationnels » sont aussi l'origine de certains concepts scientifiques apparus spontanément dans l'histoire des sciences.