

Dessins couverture et corps du texte : illustrations de John Tenniel pour *Alice in Wonderland* (1866)

Du même auteur :

L'Âme des Molécules – Une histoire de la « mémoire de l'eau »

Collection Mille Mondes (2007)

ISBN : 978-1-4116-6875-1

www.mille-mondes.fr

Ouvrages disponibles sur [Lulu.com](https://www.lulu.com)

© 2012 Francis Beauvais
beauvais@mille-mondes.fr

4^{ème} trimestre 2012
(Edition 2023 revue et corrigée)
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-7466-2859-5

Le code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective sans consentement de l'auteur (articles L.335-2 et suivants).

Francis BEAUVAIS

A TRAVERS LE MIROIR

Au-delà de la « mémoire de l'eau »

≡ Collection Mille Mondes ≡

Avant-propos

Ce livre fait suite à l'ouvrage intitulé « *L'Âme des Molécules* » dans lequel nous avons relaté la polémique scientifique connue dorénavant sous le nom d'« affaire de la mémoire de l'eau ».

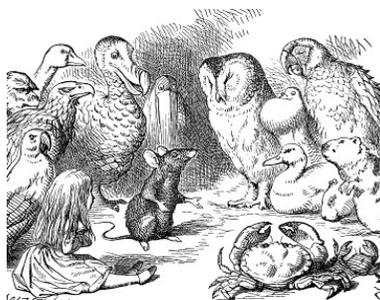
Ayant terminé la lecture de ce précédent texte, le lecteur pouvait à bon droit se sentir insatisfait. En effet restait l'interrogation principale : l'eau avait-elle réellement une « mémoire » comme semblaient le suggérer certaines expériences ? Que fallait-il penser des « discordances cohérentes » que nous avons relevées tout au long du récit ?

Conscient que la conclusion de l'ouvrage ne répondait pas au besoin de catharsis du lecteur, nous avons tenu néanmoins à ne pas dissiper la tension générée. Ce procédé permettait en effet de souligner que « l'affaire de la mémoire de l'eau » était une « histoire vraie » qui – contrairement à ce que pourrait laisser penser la lecture de certains comptes-rendus relatant cette polémique – n'avait toujours pas trouvé d'issue satisfaisante.

De plus, nous tenions également à séparer ce qui relevait de la description et ce qui était du ressort de l'interprétation. En effet, si on peut être d'accord sur les événements rapportés et sur l'absence d'une explication triviale qui permettrait d'en rendre compte, on peut à partir des mêmes matériaux tenter d'autres interprétations. Le lecteur peut en effet ne pas partager la grille de lecture proposée dans le présent ouvrage. Nous avons donc souhaité que cette possible différence de vue n'empiète pas sur le récit des événements rapportés antérieurement. Même si des interprétations différentes de la nôtre restent bien entendu possibles, il convient toutefois d'accepter que l'ensemble des faits avérés devra être pris en compte. Et, comme nous aurons l'occasion de le développer, donner une « explication » à ces expérimentations singulières exige de s'écarter des catégories habituelles des sciences biologiques.

La thèse centrale de ce texte postule en effet que les « phénomènes de Clamart » ne relèvent pas d'une hypothétique « mémoire de l'eau ». Afin de rendre compte néanmoins des phénomènes observés, une modélisation probabiliste est proposée.

L'un des principaux mérites de cette grille de lecture est qu'elle permet de rendre compte de ces phénomènes avec un minimum d'hypothèses et de pallier l'insuffisance des interprétations passées. En particulier, l'aspect le plus délicat de cette page de l'histoire de sciences – à savoir la difficulté à faire reproduire ces expériences de façon indépendante et l'existence de « discordantes cohérentes » – en découle simplement.



« L'univers est non seulement plus étrange que nous ne l'imaginons mais encore plus étrange que nous ne pouvons l'imaginer. »

John Haldane. *Possible Worlds* (1927)

« Nous sommes arrivés au seuil d'un monde dont nous ne soupçonnons rien ; et où toutes nos préconceptions doivent être reformulées. »

D'Arcy Thompson. *On Growth and Form* (1942)

« Pas de panique »

Douglas Adams. *Le guide du voyageur galactique* (1979)

Première Partie

Les faits

Introduction

Il existe une statue dans les locaux universitaires de la rue de l'École de médecine à Paris dont le socle porte l'inscription « *La Nature se dévoilant à la Science* »¹. Cette œuvre représente une jeune femme qui écarte le voile qui la couvre, offrant ainsi son buste – inévitablement généreux – aux regards de ses admirateurs. Cette allégorie fixe dans la pierre l'essence du réalisme scientifique qui considère que l'observation d'un phénomène naturel ne fait que dévoiler un « objet » dont l'état préexiste à l'observation. Cette idée d'une réalité « déjà là » persiste encore de nos jours dans la plupart des esprits, y compris ceux des scientifiques. Comme le promeneur « découvre » des crabes en soulevant des pierres sur la plage, le chercheur selon cette perspective ne fait que révéler l'objet étudié tel qu'il était avant de l'exposer au jour. Force est de reconnaître le caractère opérationnel de cette conception naïve qui consiste à confondre la construction d'un discours sur la réalité avec la réalité elle-même. De plus, ce qui a fait le succès de cette conception ne peut être que renforcé dans un environnement social où la production technologique et la fabrication d'objets sont valorisées.

Sans adopter le point de vue extrême – difficilement tenable – de certains sociologues des sciences pour lesquels toute production scientifique n'est rien d'autre qu'une construction sociale, l'idée que le chercheur fait partie intégrante de l'expérience fait petit à petit son chemin dans la démarche scientifique. Si cette notion a été bien intégrée dans les sciences humaines – en particulier en psychologie expérimentale avec le fameux effet Pygmalion² – les sciences plus

¹ Il s'agit d'une statue datant de 1899 due à Louis-Ernest Barrias (1841–1905) ; un exemplaire en est également visible au musée d'Orsay.

² L'effet Pygmalion (appelé parfois aussi prophétie auto-réalisatrice) a été découvert par le psychologue américain Rosenthal qui avait réalisé une expérience où il confiait des rats à des étudiants qui devaient soumettre les rongeurs à un test de labyrinthe. A un premier groupe d'étudiant, Rosenthal expliquait que les rats étaient particulièrement doués pour ce test pour des raisons génétiques. A un deuxième groupe d'étudiants, il attribuait d'autres rats qui selon lui avaient des performances médiocres. Les rats avaient été attribués selon le hasard aux deux groupes d'étudiants et si les mesures étaient

« dures » non seulement répugnent à intégrer cette perspective mais surtout elles n'en perçoivent pas même l'intérêt.

Pourtant la physique – modèle de « scientificité » s'il en est – a depuis la révolution de la physique quantique attribué un rôle central à l'« observateur ». Et, si nous souhaitons progresser dans la compréhension de ce que nous appellerons dorénavant les « phénomènes liés à la mémoire de l'eau », nous devons nous affranchir d'une conception classique de la « réalité » car, comme nous l'avons dit, les résultats des expériences censées rendre compte d'une supposée « mémoire de l'eau » résistent aux catégories habituelles. L'exercice en sera d'autant plus délicat que les sciences biologiques dans leur pratique quotidienne n'ont absolument pas intégré ces données concernant la place de l'observateur dans toute mesure ou observation. En particulier, les biologistes continuent de pratiquer une démarche expérimentale qui a pour cadre une physique qui se satisfait de concepts et d'une vision du monde qui remontent à Newton, Laplace et Maxwell.

Sans qu'il soit question de renier ses succès, l'avènement de la biologie moléculaire par son approche réductionniste et mécanistique a contribué à renforcer ces conceptions. L'étape ultime de la description du Vivant repose alors sur l'inventaire des molécules qui composent les organismes et sur le recensement des interactions de ces composants élémentaires entre eux. Les molécules biologiques y sont assimilées à de minuscules fragments de « matière » soumis aux lois de la mécanique newtonienne ; tout « mécanisme » s'explique alors par un « contact » immédiat entre molécules adjacentes. Ces contacts sont réalisés par l'établissement de « liaisons » de nature chimique dont la « solidité » et la durée peuvent varier. Les liaisons ne se font pas au hasard mais sont autorisées par les « spécificités » des molécules en présence, la spécificité d'une liaison résultant d'une complémentarité des structures moléculaires. C'est ainsi que l'on explique la fixation d'une molécule biologique sur un « récepteur ». Faire le catalogue de ces interactions est le programme de la biologie d'aujourd'hui. Il s'agit donc d'une vision totalement « horlogère » du monde vivant reposant avant tout sur la description de « rouages ». C'est la *somme des événements « locaux »* qui est censée expliquer le *comportement global* des édifices biologiques ; chaque niveau de description doit s'expliquer par le niveau sous-jacent.

réalisées sans biais et sans être influencées par le dispositif expérimental on devait s'attendre à ce que les performances des deux groupes soient en moyenne identiques. En fait les performances des deux groupes furent conformes aux *a priori* sur les prétendues aptitudes des rats qui avaient été volontairement communiquées aux étudiants ! Les résultats de cette expérience ont été confirmés dans d'autres situations expérimentales.

Introduction

Les tenants de cette vision du monde vivant – c'est-à-dire la plupart des biologistes – avaient été heurtés frontalement par les interprétations que J. Benveniste proposait de ses expériences. Pourtant nous verrons dans cet ouvrage que ce qui va nous faire abandonner l'idée d'une « mémoire de l'eau » ne réside pas dans les arguments des « adversaires » des travaux de J. Benveniste, mais est la conséquence de certaines étrangetés inhérentes à ces expériences « scandaleuses ». Ces anomalies n'ont jusqu'à présent jamais été pointées comme telles et n'ont par conséquent jamais été analysées.¹ Elles font – selon nous – s'effondrer l'interprétation habituelle des résultats des « hautes dilutions » et de la « biologie numérique » qui imaginait une structuration de l'eau permettant de mimer l'action de molécules biologiques. L'interprétation « hydromnésique » ayant été abandonnée, restent néanmoins des résultats expérimentaux orphelins d'une explication.²

Le but de ce texte est donc de proposer une grille de lecture originale permettant d'interpréter ces phénomènes. Arrivé au terme de cet ouvrage, le lecteur saisira alors pourquoi – fascinés qu'ils étaient par l'eau – les observateurs de cette « mémoire » n'avaient pas compris que ce qu'ils scrutaient à travers leurs instruments de mesure était le reflet dans le miroir liquide de leur propre pensée en action.



¹ Peut-être ces anomalies auraient-elles été mises en évidence plus tôt si un débat « normal » avait eu lieu. La course à l'expérience « définitive », d'une part, et le refus d'envisager ces expériences avec un minimum de bienveillance, d'autre part, ont empêché une approche scientifique sereine et dénuée de tout *a priori*.

² Comme nous l'avons déjà souligné dans notre précédent ouvrage (chap. 25 de la première partie), J. Benveniste lui-même avait une vision de la biologie qui restait « moléculaire » même s'il dénonçait le « tout moléculaire » de la recherche en biologie. Ses recherches sur la « mémoire de l'eau » ne faisaient que compléter selon lui l'univers des interactions biochimiques. En ce sens, sa vision globale de la biologie et sa conception de la « mémoire de l'eau » restaient dans un cadre classique.

1.2

En guise de résumé des phénomènes liés à la « mémoire de l'eau »

*« J'ai déjà vu un chat sans sourire,
mais jamais un sourire sans chat ! »*

Lewis Carroll, *Alice au pays des merveilles*

Le lecteur qui aborde cet ouvrage est censé connaître l'histoire de la « mémoire de l'eau ». Dans ce chapitre nous rappellerons néanmoins les événements saillants du point de vue scientifique qui ont structuré cette histoire en laissant de côté l'aspect de l'« affaire » qui relève davantage de la sociologie des sciences et qui concerne l'acceptation des nouvelles idées scientifiques, les stratégies de publication, les luttes d'influence, la relation des événements par la presse, etc. Nous abrègerons par *ADM 1* et *ADM 2* les références aux deux parties de « *L'Âme des Molécules* ».

A l'origine étaient les « hautes dilutions » et les basophiles... (1983–1991)

Au début il y eut donc les fameuses expériences avec les « basophiles » (*ADM 1 chapitres 3 à 6*). Nous avons vu comment les expériences avec ces cellules sanguines qui paraissaient réagir en présence de dilutions « extrêmes » de substances biologiques diverses avaient déconcerté la communauté scientifique et même au-delà de cette dernière. Ce qui paraissait le plus étrange était la persistance d'un effet biologique dans ces dilutions en série alors que la limite calculée grâce au nombre d'Avogadro était largement dépassée. En d'autres termes, plus aucune des molécules initiales n'était présente et on ne diluait plus que de l'eau dans de l'eau. Tout se passait comme si une « activité biologique » persistait alors que la « matière » qui lui était en principe nécessairement associée avait depuis longtemps disparu. Comme le Chat du Cheshire d'*Alice au pays des merveilles*, un « sourire » persistait après la disparition du corps. L'idée que le solvant – l'eau – puisse garder une trace de l'« information » correspondant à la molécule initialement dissoute fut alors défendue. L'idée d'une mémoire s'ancre

d'autant plus facilement qu'il apparut que certains traitements physiques (dont le chauffage était le plus simple) permettaient d'effacer cette hypothétique « trace mnésique ». L'eau paraissait se comporter comme une bande magnétique.

Le contre-argument d'une contamination fut toutefois abondamment exploité pour expliquer ces résultats inattendus qui, de surcroît, paraissaient conforter la pratique de l'homéopathie dont les bases scientifiques étaient – c'est une litote – également questionnées. Nous avons vu cependant en quoi l'idée que des traces infinitésimales d'anticorps dues à une contamination – mais non détectables par les méthodes classiques – pourraient suffire à expliquer les résultats controversés n'était pas tenable (*ADM 1 Chapitre 15*). Nous avons vu également que cet effet avait toutes les apparences de la spécificité.

Tout ceci restait néanmoins très intrigant, en particulier pour les macromolécules telles que les anticorps. Garder la « mémoire » d'édifices aussi complexes était problématique. De plus, lorsque les substances dissoutes étaient des « soupes » biologiques (l'abeille écrasée d'*Apis mellifica* par exemple), les structures aqueuses permettant de garder le souvenir de l'ensemble des constituants était difficilement concevable. Mais l'argument du « pourtant ça marche » avait pour lui la force de l'évidence.

Une autre des caractéristiques des effets à hautes dilutions qui perturbait beaucoup les commentateurs était leur aspect en « vagues » selon la hauteur des dilutions. Cet argument était toutefois moins crucial et nous avons vu comment un nombre limité d'hypothèses permettait de rendre compte de tels comportements oscillatoires (*ADM 1 Chapitre 3*).

Surtout, s'il y eut polémique, ce fut parce que la reproductibilité des expériences fut mise en cause. Nous ne reprendrons pas l'ensemble des arguments échangés, mais nous insisterons sur ce qui constitue à notre sens la leçon essentielle de cette première partie de l'histoire.

En effet, lorsque des « démonstrations » destinées à convaincre les sceptiques de la réalité du phénomène furent entreprises, elles confirmèrent que – d'un point de vue statistique – les hautes dilutions « actives » paraissaient se comporter de façon différente de hautes dilutions « inactives » ou de solutions « contrôles ». Mais curieusement les fameuses vagues avaient disparu dans la brume des analyses statistiques (*ADM 1 chapitres 17 et 23*). En conséquence, un effet « chat du Cheshire » se manifestait : le félin disparaissait mais un « sourire » moqueur persistait...

... puis vinrent les intermittences du cœur isolé (1990–1998)

Le modèle des basophiles restait peu commode pour des démonstrations destinées à convaincre les autres scientifiques de la réalité des effets des hautes

dilutions. J. Benveniste et son équipe utilisèrent alors un système expérimental qui s'était avéré réagir lui aussi aux hautes dilutions de différentes molécules. Ce dispositif permettait de garder en survie un cœur de rat ou de cobaye (système de Langendorff). Le résultat essentiel de ces expériences de physiologie était une variation significative du débit des artères coronaires qui irriguent le muscle cardiaque en présence de hautes dilutions de diverses substances pharmacologiques (*ADM 2 Chapitre 3*).

Puis un pas décisif fut franchi. J. Benveniste qui avait des indications indirectes sur la nature électromagnétique de la supposée « empreinte » dans l'eau, utilisa un amplificateur électronique muni de bobines électriques (*ADM 2 chapitres 1 et 2*). Dans ces nouvelles expériences tout se passait comme s'il était possible de recueillir l'« activité biologique » de substances pharmacologiques en solution et de la transférer à un échantillon d'eau « naïve ». Les résultats étaient très prometteurs et ils permettaient de planter le décor d'une future biologie « électromagnétique ». De plus, ce nouveau modèle avait l'intérêt, contrairement au modèle des basophiles, de permettre des démonstrations « en direct » devant un public d'observateurs.

Mais, après des débuts prometteurs, il s'avéra que très souvent le système « se prenait les pieds dans le tapis » au cours d'expériences à l'aveugle réalisées avec la collaboration d'« observateurs » extérieurs à l'équipe de J. Benveniste (*ADM 2 Chapitre 4*). Pourtant les résultats étaient conformes aux attentes pour la partie de l'expérience « en ouvert ». De nombreuses explications (« transferts sauvages », environnement électromagnétique, effet « rémanent ») furent avancées pour expliquer ces bizarreries perturbantes.

Nous avons alors utilisé le terme de « discordance cohérente » pour caractériser les résultats de ces expériences. Tout se passait en effet comme si les expérimentateurs ne retrouvaient dans les résultats de ces expériences que les informations qu'ils connaissaient déjà (*ADM 2 Chapitre 9*).

Enfin J. Benveniste « inventa » la « biologie numérique » qui n'était rien d'autre que le transfert de la « mémoire de l'eau » à celle d'un l'ordinateur (en quelque sorte de la mémoire *in aquo* à la mémoire *in silico*) (*ADM 2 Chapitre 12*). Ce pas conceptuel et expérimental demandait une certaine audace que J. Benveniste osa franchir d'autant plus facilement qu'il pensait se débarrasser dans le même temps des « transferts sauvages » et autres étrangetés. Le succès fut au rendez-vous et on ne pouvait que se rendre à l'évidence : « ça marchait ». Comparée au « transfert électromagnétique », la « numérisation » n'était somme toute qu'un enregistrement avec reproduction différée. Le parallèle avec l'industrie musicale était immédiat et J. Benveniste usera de la métaphore à l'envi.

Mais à nouveau, en dépit des perfectionnements progressifs du système de « captation » de l'hypothétique rayonnement censé être émis par les substances en solution, des « inversions » et autres « transferts sauvages » perturbèrent les conclusions des démonstrations publiques (*ADM 1 Chapitre 16*). Pourtant un grand nombre des artefacts qui avaient été suggérés antérieurement avaient été écartés par ces nouveaux dispositifs.

Un ultime perfectionnement permit alors de transmettre le « signal électromagnétique » directement à la colonne d'eau qui perfusait le cœur isolé sans passer par un échantillon d'eau intermédiaire. On se trouvait alors face à un dispositif expérimental extrêmement épuré. Mais à nouveau les performances « chutaient » de façon étonnante et déstabilisante dès lors que l'on cherchait à utiliser ce dispositif pour transmettre des informations selon un code convenu.

Exit donc le chat du Cheshire, restait une fois de plus le sourire narquois... Pourtant les résultats n'étaient pas « n'importe quoi » et une cohérence dans les résultats persistait, difficile à expliquer.

Enfin le chant du cygne avec la coagulation plasmatique (à partir de 1999)

Le système de Langendorff, pour spectaculaire qu'il fût, s'avéra lui aussi peu commode à « exporter » vers d'autres laboratoires. Un nouveau système biologique émergea fort à propos, étonnamment facile à mettre en œuvre (*ADM 2 Chapitre 21*). Il s'agissait d'une expérimentation basée sur la coagulation plasmatique. A nouveau les divers procédés, que ce soit les hautes dilutions ou les « transmissions électromagnétiques », se révélèrent capables de « moduler » ce système biologique, relançant ainsi l'enthousiasme et faisant une fois de plus naître l'espoir d'aboutir rapidement. Le chat du Cheshire redevenait visible dans ses moindres détails.

C'est alors qu'un phénomène inédit tout aussi imprévu que déconcertant dans sa simplicité apparut : avec certains expérimentateurs le « phénomène » refusait de se manifester. Selon la logique en vigueur dans le laboratoire de J. Benveniste, tout se passait comme si certaines personnes « effaçaient le signal » (*ADM 2 Chapitre 22*). Afin de minimiser cet « effet effaceur », le système fut automatisé grâce à un robot de façon à ce que l'expérimentateur n'ait plus qu'un rôle de presse-bouton.

La perplexité fut à son comble avec les expériences réalisées dans le cadre d'une expertise mandatée par la DARPA, une agence liée au département de la Défense US. Les experts qui se penchèrent avec attention sur le robot automatique qui réalisait l'expérience restèrent perplexes : le système fonctionnait bien comme prévu mais seulement lorsque l'un des membres de

l'équipe de Clamart – manifestement plus « doué » pour appuyer sur le bouton de départ – était présent... (*ADM 2 Chapitres 23 et 24*). Publiés en 2006, les résultats de l'expertise montraient que le chat du Cheshire s'était évanoui comme à son habitude. Mais cette fois son sourire s'était crispé définitivement.

Pour en finir avec les sourires sans leur chat...

Si nous souhaitons pouvoir rendre compte de ces phénomènes et si possible généraliser notre grille de lecture, nous devons être capables de rendre compte de l'ensemble des « bizarreries » constatées : réussite fréquente des expériences « en interne » mais « discordances cohérentes » dans d'autres circonstances, présence nécessaire d'un expérimentateur donné (et parfois maintien à distance d'un autre...), etc.

Mais peut-être le lecteur se dit-il qu'une explication triviale liée à la connivence entre les membres de l'équipe reste encore l'explication la plus probable et la plus « raisonnable ». Revenons une dernière fois sur ce type d'argument. Certes, les facteurs qui conduisaient à l'échec des expériences à l'aveugle avec un observateur externe paraissent être en premier lieu liées à l'éloignement physique entre l'expérimentateur et cet observateur. Dit de cette façon, cet argument pourrait sembler de mauvais augure quant à la « scientificité » des résultats rapportés, pour ne pas dire plus. Ceci évoque en effet plus une affaire de compérage qu'une recension objective de faits scientifiques. J'ai toutefois sur le lecteur un avantage pour écarter cette hypothèse : si compères il y eut, il faut me ranger parmi ces derniers. L'« explication » des phénomènes de Clamart par – « au mieux » – l'incompétence et – au pire – la tricherie ne tient donc pas et nous n'y ferons plus référence dans la suite de cette analyse.

On pourrait également imaginer de dédouaner les différents acteurs d'une volonté consciente d'obtenir les résultats souhaités, mais suggérer que de façon inconsciente les expérimentateurs usaient d'un stratagème permettant de faire « bouger » le système. Ceci expliquerait pourquoi on ne retrouvait dans les expériences que les connaissances que l'équipe possédait déjà sur le protocole expérimental.

On pourrait suggérer par exemple que les « compteurs » de basophiles s'autosuggestionnaient au point de voir des cellules colorées qui n'existaient pas ou au contraire avaient des taches aveugles inconscientes qui les empêchaient de voir d'autres cellules colorées. Ceci pourrait en effet expliquer pourquoi certaines des expériences à l'aveugle étaient moins « spectaculaires » mais cette explication ne rend pas compte de la différence statistique qui persistait néanmoins.

Pour le système de cœur isolé, le même type d'explication est plus délicat car les effets étaient directement visibles par des observateurs. On pourrait imaginer néanmoins qu'une « manœuvre » inconsciente provoque une réaction du système biologique. Il faudrait toutefois expliquer comment était « extraite » l'information lorsque les échantillons étaient présentés masqués à l'expérimentateur sous forme codée par un membre de l'équipe. Surtout les expériences réalisées avec le robot automatique n'autorisent plus l'explication des phénomènes observés par un artefact de cet ordre. En effet, tous les échantillons étaient testés au cours de la même séance avec une sélection au hasard des conditions expérimentales « actives » et « inactives » par le logiciel qui pilotait le robot.

Les explications triviales ayant été écartées, la tâche n'est assurément pas simple et exigera des solutions – ou du moins des pistes de recherche – non classiques. Afin de parvenir à mettre sur pied une explication cohérente de ces phénomènes nous devons avancer pas à pas avec le souci de faire le moins possible d'hypothèses *ad hoc*.



« Mémoire de l'eau » : une hypothèse inutile ?

« Une explication pourrait être que les données ont été fabriquées par un mystificateur dans le laboratoire [de Benveniste]. »

John Maddox (1988) ¹

Boîtes noires et Cie : quel est le bon contrôle ?

Nous avons vu au cours de l'histoire de la « mémoire de l'eau » que certains dispositifs – que nous avons qualifiés de « boîtes noires » – étaient capables de « produire » les mêmes résultats que ceux obtenus grâce aux appareils élaborés par J. Benveniste qui étaient quant à eux soutendus par une explication plus rationnelle (*ADM 2 Chapitres 25 et 26*). En effet ces « boîtes noires » qui ne permettaient *a priori* que des « simulacres » d'expériences conduisaient à des résultats tout à fait semblables à ceux issus des « vraies expériences » avec les hautes dilutions, transmissions et autres numérisations. Les « boîtes noires » se comportaient par conséquent comme l'équivalent expérimental d'un placebo. Et si le « placebo » et le dispositif expérimental censé être « spécifique » produisaient les mêmes résultats alors on aurait pu en conclure que ces derniers n'étaient qu'une fiction et que par conséquent l'idée que quelque chose avait été « transmis » par le dispositif devait être abandonnée.²

¹ Waves caused by extreme dilutions. *Nature* 1988; 335:760.

² D'autres arguments viennent conforter l'idée que les dispositifs expérimentaux se comportaient en dernière analyse comme des « boîtes noires » à l'insu des expérimentateurs. Nous n'en citerons que quelques uns. Ainsi on se souvient que les fichiers numérisés – correspondant à quelques secondes d'enregistrement – étaient « joués » en boucle afin d'« imprégner » l'eau. J. Benveniste tenta de déterminer quelle était la taille minimale d'un fichier pour provoquer un effet biologique. Il parvint à une taille de quelques kilo-octets correspondant à une durée de 15 millisecondes. L'examen visuel à l'aide d'un logiciel approprié du « spectre » d'un tel « fichier son » – comparé à un fichier inactif ayant subi le même traitement – provoque la perplexité : où l'« information » correspondant à une molécule complexe peut-elle se nicher dans un

La question est toutefois un peu plus complexe. Comme nous l'avons dit, ce qui nous interdit de jeter aux oubliettes de l'histoire des sciences l'ensemble des résultats liés à la « mémoire de l'eau » est dû au fait que des dispositifs expérimentaux ont « bougé » de façon cohérente. Et, si on souhaite à tout prix sauver l'idée d'une « mémoire de l'eau », on peut néanmoins considérer : 1) que la « mémoire de l'eau » et les phénomènes de transmission électromagnétique sont une réalité et 2) que les effets rapportés avec les boîtes noires sont eux aussi une réalité mais indépendante de la « biologie numérique ». On peut imaginer par exemple que les effets observés sont une preuve du bien-fondé de certaines conceptions dites « bioénergétiques » (*ADM 2 Chapitre 26*). Pour dire les choses autrement, deux causes indépendantes peuvent conduire à des effets comparables.

Dans le paragraphe suivant nous envisagerons toutefois un argument – décisif selon nous – qui permet de conclure que les dispositifs expérimentaux qui ont soutenu l'hypothèse de la « mémoire de l'eau » se sont comportés comme des « placebos » et qu'il s'agissait bien par conséquent de « simulacres d'expériences ».

Un cœur d'humeur égale

Pour illustrer notre argumentation nous nous baserons essentiellement sur les expériences réalisées avec le système de Langendorff. Le même raisonnement peut être appliqué aux autres systèmes biologiques mis en œuvre (basophiles, coagulation plasmatique), mais c'est le système de cœur isolé qui est le plus démonstratif sous cet aspect et c'est avec ce système qu'ont été réalisées le plus de démonstrations considérées comme autant de « preuves de concept ». Point important, ces démonstrations ont fait l'objet de protocoles expérimentaux et de comptes-rendus précis et circonstanciés.

Le raisonnement est le suivant. Si l'on considère les expériences réalisées sur le système de Langendorff, l'effet obtenu était toujours *du même ordre de grandeur quel que soit le procédé utilisé* qui était censé « structurer » l'eau. En effet, nombreux ont été les procédés utilisés au cours de cette recherche qui devaient permettre de transmettre à l'eau une « activité » capable de modifier le système biologique. Nous avons vu ainsi à l'œuvre les hautes dilutions de diverses substances, le transfert électromagnétique, la numérisation, les granules homéopathiques dissous dans l'eau, les « faibles dilutions » (de l'ordre de 10^{-12} mol/L) actives

fichier comportant un nombre aussi ridiculement faible de « bits » ? De même, dans les premiers temps des expériences de « numérisation », l'amplification appliquée au « signal » était considérable, bien au-delà des capacités du système électronique. Le « signal » en sortait terriblement « écrêté ». En dépit de cette distorsion importante du signal, « ça marchait »...

après agitation, etc. De façon anecdotique, les transmissions d'information de tube à tube par faisceau laser ou par l'intermédiaire de l'effet piézo-électrique furent également des « succès ». Par ailleurs, au cours des années, différents types de dispositifs électroniques avec des caractéristiques très différentes sur le plan électrotechnique conduisirent à des résultats qui, au fond, étaient très voisins. Et nous avons insisté également au cours du récit pour dire que les différentes améliorations du système d'enregistrement et de restitution du « signal » n'avaient guère d'impact sur les caractéristiques de l'effet biologique observé.¹ Ce fut le cas en particulier avec le « perfectionnement » qui consista à administrer le « signal électromagnétique » directement à la colonne de liquide physiologique qui perfusait le cœur sans passer par un échantillon d'eau intermédiaire (*ADM 2, Chapitre 17*). Là aussi cette modification importante dans le dispositif de transmission impliquait *a priori* certains réglages. On aurait pu s'attendre à une période plus ou moins longue de mise au point prenant en compte, entre autres, la nouvelle bobine aux caractéristiques physiques différentes et le fait d'« irradier » du liquide en mouvement. Il n'en fut rien. A peine la nouvelle bobine était-elle fixée sur l'appareil que les profils habituels de variation du débit coronaire étaient observés.

Et pourtant, en dépit de ces nombreux moyens très différents d'un point de vue physique, l'effet biologique observé était toujours dans la même gamme de variation (de l'ordre de 20–30% de variation de l'effet de base). De façon étonnante on était donc toujours dans la bonne « gamme de sensibilité » du système expérimental. On pourrait penser que le « signal » nécessite dans certains cas d'être plus ou moins « amplifié » (ou même pourquoi pas atténué) selon son « intensité » d'origine. En effet, quoi de commun entre des granules que l'on dissout dans de l'eau ou un « signal » que l'on a enregistré sur une disquette et que l'on restitue à de l'eau « naïve » ou encore une haute dilution ? De plus les signaux utilisés dans les transmissions électromagnétiques correspondaient à des substances variées (acétylcholine, histamine, etc.) à diverses concentrations. Pourtant, ça « marchait » toujours et avec des effets d'amplitudes comparables (Figure 1).²

¹ Sauf peut-être dans les premiers temps où les nouveaux procédés – censés apporter une solution définitive – étaient d'une amplitude inhabituelle. Puis passée la phase d'enthousiasme, les amplitudes de l'effet observé rejoignaient la moyenne habituelle.

² Précisons pourtant que ce type de système ne réagit pas obligatoirement en « tout ou rien » ; on peut en effet réaliser ce que les pharmacologues appellent des « doses-réponse » où la réponse du système est fonction de l'intensité du stimulus.

« Mémoire de l'eau » : une hypothèse inutile ?

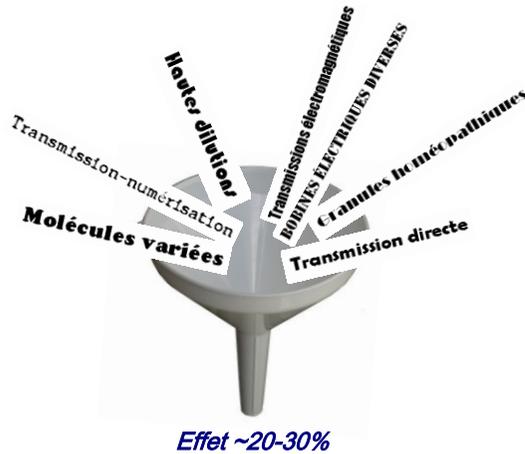


Figure 1. *Un sujet d'étonnement.* De nombreux procédés et dispositifs destinés à « informer l'eau » ont été utilisés (« transmission-numérisation », hautes dilutions, « transmission électromagnétique », transmission « directe », granules homéopathiques dissous). L'eau ainsi « traitée » était ensuite testée sur un système biologique. Comment un appareil de mesure peut-il avoir une gamme de sensibilité aussi large ? Comment des conditions expérimentales et des « stimuli » aussi variés peuvent-ils conduire à des effets mesurés aussi monotones ?

Pour le lecteur qui n'est pas accoutumé à l'expérimentation scientifique, prenons plusieurs exemples dans différents domaines pour bien faire comprendre les raisons de cet étonnement. Supposons un électricien face à des fils électriques sous différentes tensions qu'il doit évaluer. Comme il n'a aucune idée des tensions réelles, il commence par placer son appareil de mesure sur le calibre le plus élevé et s'il voit que l'aiguille ne bouge pas ou peu, il utilise un calibre plus faible jusqu'à obtenir une déflexion de l'aiguille permettant de lire une valeur.

Prenons un autre exemple plus biologique. On sait mesurer la quantité de matériel génétique de certains virus pour évaluer le nombre de virus hébergés par un individu. Les quantités de virus sont insuffisantes le plus souvent pour les méthodes de détection usuelles. Il existe toutefois des techniques qui permettent d'« amplifier » au préalable le matériel génétique en le « dupliquant » en un grand nombre d'exemplaires. Le matériel génétique est alors suffisamment abondant pour être mesuré.

De même, pour prendre un dernier exemple, le courant qui oscille dans une antenne de réception doit lui aussi être amplifiée afin d'être audible dans un

haut-parleur. Trop faible, le signal ne peut être détecté ; trop intense, l'appareil de mesure est saturé.

Ces quelques exemples sont destinés à montrer qu'il est souvent nécessaire *d'ajuster le « signal »* que l'on souhaite détecter en l'amplifiant ou en l'atténuant. On parle ainsi de la « gamme de sensibilité » d'un appareil de mesure qui est la gamme des signaux pour lesquels l'appareil fonctionne correctement. Dans le cas des « phénomènes de Clamart », nous sommes face à un « appareil de mesure » dont la *gamme de sensibilité est étonnamment large* et qui donne imperturbablement une réponse uniforme *quels que soient les mécanismes mis en jeu*. On peut certes avoir parfois de la chance dans le domaine de l'expérimentation scientifique. Que cette chance soit systématiquement au rendez-vous a de quoi laisser perplexe. Nous avons ainsi signalé à plusieurs reprises que la nouveauté était presque toujours un gage de réussite pour les expériences liées à la « mémoire de l'eau », sans mises au point particulièrement longues. Et il faut ici encore garder à l'esprit les diverses « boîtes noires » qui se manifestèrent avec plus ou moins de bonheur (*ADM 2 Chapitres 25 et 26*). Ce qui étonne est donc la faculté de réaction du système à des « stimuli » qui mettent en jeu des *processus physiques extrêmement différents* (tant en énergie, fréquences, etc.) et de surcroît avec une *réponse univoque du système*. Afin d'illustrer cette idée nous reprenons dans le Tableau 1 les communications à des congrès faites par l'équipe de J. Benveniste de 1991 à 1999, c'est-à-dire au cours de la période d'utilisation du système de Langendorff.

Sur la Figure 2, les résultats du Tableau 1 sont résumés sous forme d'histogramme. Nous constatons donc, comme nous l'avions déjà signalé, que les différents procédés donnent des résultats centrés sur 20–30%. Si, quel que soit le procédé mis en œuvre, des résultats aussi voisins sont obtenus, c'est peut-être que ces procédés – censés provoquer une structuration de l'eau, c'est-à-dire imprimer une trace, une mémoire – ne sont qu'*apparemment* la cause de l'effet biologique observé. Ceci suggère donc fortement qu'une autre « cause » – unique et par conséquent plus monotone dans ses effets – se manifestait lors de ces diverses expériences (Figure 2).

En résumé, l'observateur tout à la fois bienveillant et impartial qui analyse ces résultats est surpris de constater que les mesures se font toujours dans la bonne « gamme de sensibilité » sans réglage particulier de l'« appareil de mesure ». Et sa perplexité s'accroît lorsqu'il constate une distribution unimodale des résultats des mesures en dépit de conditions expérimentales extrêmement différentes.

« Mémoire de l'eau » : une hypothèse inutile ?

Titre de la communication	Procédé utilisé pour « informer » l'eau	Variation du débit coronaire des échantillons « actifs »
Hadji L, Arnoux B, Benveniste J. Effect of dilute histamine on coronary flow of guinea-pig isolated heart. Inhibition by a magnetic field. <i>Faseb J</i> 1991; 5: A1583.	Hautes dilutions	33 %
Effects on the isolated heart of water preexposed to a permanent magnetic field. Benveniste J, Aïssa J, Jurgens P and Pham D. <i>Faseb J</i> 1992; 6: A425.	Eau « magnétisée »	25 % - 24 %
Benveniste J, Arnoux B, Hadji L. Highly dilute antigen increases coronary flow of isolated heart from immunized guinea-pigs. <i>Faseb J</i> 1992; 6: A1610.	Hautes dilutions	21 %
Litime MH, Aïssa J, Benveniste J. Antigen signaling at high dilution. <i>Faseb J</i> 1993; 7: A602.	Hautes dilutions	31 % - 24 %
Aïssa J, Litime MH, Attias E, Allal A, Benveniste J. Transfer of molecular signals via electronic circuitry. <i>Faseb J</i> 1993; 7: A602.	Transfert électromagnétique	34 % - 34 % 40 %
Benveniste J, Aïssa J, Litime MH, Tsangaris G, Thomas Y. Transfer of the molecular signal by electronic amplification. <i>Faseb J</i> 1994; 8: A398.	Transfert électromagnétique	27 % - 26 % 22 % - 23 %
Aïssa J, Jurgens P, Litime MH, Béhar I, Benveniste J. Electronic transmission of the cholinergic signal. <i>Faseb J</i> 1995; 9: A683.	Transfert électromagnétique	17 % - 23 %
Benveniste J, Jurgens P, Aïssa J. Digital recording/transmission of the cholinergic signal. <i>Faseb J</i> 1996; 10: A1479.	Numérisation	16 % - 20 %
Benveniste J, Jurgens P, Hsueh W, Aïssa J. Transatlantic transfer of digitized antigen signal by telephone link. <i>J Allergy Clin Immunol</i> 1997; 99: S175.	Numérisation	24 %
Benveniste J, Aïssa J and Guillonnet D. Digital biology: specificity of the digitized molecular signal. <i>Faseb J</i> 1998; 12: A412.	Numérisation	22 % - 15 %
Benveniste J, Aïssa J, Guillonnet D. The molecular signal is not functional in the absence of "informed" water. <i>Faseb J</i> 1999; 13: A163.	Agitation des faibles concentrations	23 % - 18 %

Tableau 1. Ce tableau résume 11 communications présentées par l'équipe de J. Benveniste à différents congrès de 1991 à 1999 concernant le système de cœur isolé de Langendorff. Seules ont été reportées dans la dernière colonne les valeurs moyennes des échantillons « actifs » extraites de chacune de ces communications. Le propos de ce tableau est de montrer que *quel que soit le procédé* qui permettait d'« informer » l'eau, les valeurs des échantillons « actifs » étaient *toujours en moyenne du même ordre de grandeur* (voir Figure 2).

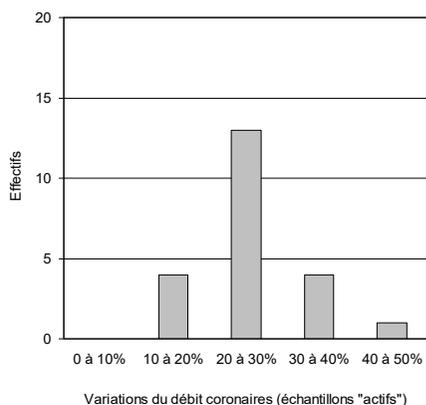


Figure 2. Ampleur de l'effet biologique mesuré dans différentes conditions expérimentales. Les valeurs de la dernière colonne du tableau précédent (« effet biologique ») sont présentées ici de façon synthétique. On constate que les variations du système biologique (variation du débit coronaire du système de Langendorff), sont du même ordre de grandeur autour de 20–30 %. Pourtant les systèmes mis en œuvre ont des caractéristiques *extrêmement différentes* mettant en jeu des énergies, des fréquences, des processus physiques très disparates. Tout se passe comme si les « causes » supposées n'étaient pas en définitive les véritables causes et que la focalisation sur ces dernières masquait en fait une *cause alternative unique*.

Imaginons que nous voulions donner rendez-vous à un ami. Plusieurs possibilités s'offrent à nous. Nous pouvons le faire en lui téléphonant, en lui envoyant un courrier électronique, en lui adressant une lettre par la poste, en demandant à un ami commun de transmettre l'invitation de vive voix, etc. Ces modalités de transmission d'un message sont très différentes, ne sont pas réductibles les unes aux autres ; les énergies, les fréquences, les supports matériels, les techniques mis en jeu en sont extrêmement différents. Il est même probable que les termes exacts du message initial soient modifiés tout en préservant son *sens*. Par exemple, si un ou plusieurs intermédiaires humains sont intercalés dans la chaîne qui conduit le message jusqu'au cerveau de notre ami, il y a de grandes chances que le message initial soit reformulé. Malgré tous ces obstacles potentiels – et c'est en cela que réside la puissance et la magie du langage – notre ami sera bien présent au rendez-vous.

Des dispositifs ventriloques ?

Un parallèle peut être tracé avec les expériences de J. Benveniste. Tout se passe apparemment comme s'il existait une *corrélation* entre un message initial et l'état final du système biologique. Le support du message semble toutefois n'avoir que peu d'importance. Comme si la dimension physique – qu'elle soit énergétique ou fréquentielle – des causes présumées était au fond sans

importance. Les « phénomènes liés à la mémoire de l'eau » ne paraissent pas être influencés par le substrat physique où est censé résider le message ni par les mécanismes physiques mis en jeu pour le transmettre. Les résultats semblent s'articuler entre eux plus *comme un langage* que comme les indices objectifs d'un phénomène physique sous-jacent. Car si bien entendu les lois de la physique sous-tendent les effets biologiques observés, ce qui est évalué et qui constitue *l'enjeu de l'expérimentation* ne paraît pas dépendant des procédures expérimentales (hautes dilutions, granules, « transmission électromagnétique du signal », « numérisation du signal », etc.) Ce « langage » fonctionne de façon binaire : « ça bouge » ou « ça ne bouge pas » (parfois ternaire : rien, plus, moins ; *ADM 2 Chapitre 20*).

Pourtant, pourrait-on argumenter, certaines expériences où une « spécificité » se manifestait étaient particulièrement impressionnantes et sont donc en faveur d'une « structuration » d'un substrat physique. Ainsi de l'atropine a bloqué l'effet d'un « signal acétylcholine » ou encore un « signal ovalbumine » a provoqué une réaction biologique chez des animaux immunisés vis-à-vis de cette molécule et ce même signal n'avait pas d'effet chez les animaux non immunisés. On peut également citer les expériences étonnantes où le « signal caféine » diminuait le débit coronaire alors que le « signal ionophore » l'augmentait (le « signal eau » étant quant à lui sans effet). L'argument de la spécificité n'est-il pas essentiel ? En fait non, car la « spécificité » en biologie n'est jamais directement « visible ». C'est toujours une construction intellectuelle et c'est par déduction que l'on y parvient. Seul l'« effet » – ou l'absence d'effet – est mesuré. Et si ce dernier est sous la dépendance d'une « cause » qui nous est inconnue et se comporte de façon cohérente, l'argument de la « spécificité » perd bien entendu de sa consistance.

Pour résumer, il semble que les résultats concernant la « transmission du signal biologique » faisaient peu de cas des lois physiques mais paraissaient plutôt obéir à l'idée que l'on se faisait de ce que « devaient » être les résultats de l'expérience (tout en restant bien entendu dans les limites physiologiques permises). En effet, comme nous l'avons vu, l'amplitude des effets mesurés censés être la conséquence d'une « mémoire de l'eau » ont la même valeur moyenne quel que soit le procédé utilisé pour « informer » l'eau. Nous avons vu également au cours du récit que les perfectionnements techniques successifs semblaient n'avoir que peu d'impact sur la fiabilité du système au cours de démonstrations destinées à établir une « preuve ».

On ne peut s'empêcher de faire un parallèle qui *a priori* n'a que peu de rapport avec les phénomènes liés à la « mémoire de l'eau ». Il s'agit des cas de paralysie ou de perte de sensibilité cutanée observés chez des patients souffrant de névrose hystérique. Ainsi la paralysie ou l'insensibilité du « bras » ou de la

« jambe » parfois observées chez ces derniers correspond à l'idée que l'on se fait du membre correspondant dans le langage courant et qui ne reflète pas forcément le trajet des filets nerveux tel que nous l'apprend l'anatomie. Comme le constata Freud lorsqu'il examina les patients de Charcot, « l'hystérie ignore l'anatomie ». Il en déduisit que les « causes » du désordre observé n'avaient pas un substrat anatomique mais devaient être recherchées au niveau du langage. On pourrait donc, en paraphrasant Freud, dire à propos de ces phénomènes que nous tentons d'expliquer qu'ils ignoraient la physique (même si bien entendu ils y étaient soumis). Les dispositifs expérimentaux qui produisaient ces phénomènes devenaient en quelque sorte ventriloques. Les résultats des phénomènes de Clamart apparaissent par conséquent *structurés comme un langage*.

Toutefois, même si nous renonçons à l'idée d'une « mémoire de l'eau », conséquence d'une « organisation » de l'élément liquide, nous n'en sommes pas quittes. Il nous faut en effet expliquer pourquoi des « placebos » ont avec constance perturbé les comptes de basophiles, modifié le débit coronaire ou inhibé la coagulation plasmatique ; et ceci au cours d'expériences ayant été réalisées par différents expérimentateurs qui se sont succédé pendant près de vingt ans. Ayant décidé d'effacer la « mémoire de l'eau » de la liste des explications possibles des phénomènes observés par J. Benveniste et son équipe, nous allons devoir rebâtir une autre histoire à partir du matériel expérimental qui persiste néanmoins après cette « déconstruction » drastique.

En particulier, si ces dispositifs expérimentaux étaient « ventriloques », il nous faudra préciser *qui* « parlait ».



Corrélations des mesures et causalité

« *Correlations cry out for explanations* »

John S. Bell (1987) ¹

Ce qui reste de la « mémoire »

Même si nous effaçons la « mémoire de l'eau » de nos propres mémoires, il reste que les phénomènes observés n'étaient pas triviaux et que – en dépit de leur caractère improbable – des variations cohérentes ont été enregistrées par des appareils de mesures dans plusieurs systèmes expérimentaux successifs. Par conséquent, consacrons-nous maintenant à reconstruire ce qui peut l'être à partir des éléments qui demeurent. Pour cela, nous renonçons dans un premier temps à établir des relations de causalité ; nous cherchons simplement à établir des corrélations entre des événements.

Comme nous l'avons signalé à plusieurs reprises (*ADM 2 Chapitre 1*), deux systèmes de Langendorff permettant d'étudier la physiologie du cœur isolé de rat ou de cobaye ont fonctionné en parallèle dans le laboratoire de Clamart de 1992 à 1996. Disposer d'un appareillage en double permettait de conforter les résultats et d'écarter la possibilité d'une contamination liée par exemple à une « rémanence » dans le système expérimental. En effet au cours d'une même séance de travail plusieurs échantillons d'eau « informée » étaient testés sur une même préparation physiologique de cœur isolé. C'est pourquoi le plus souvent les échantillons étaient mesurés avec l'un des appareils dans l'ordre croissant (1, 2, 3...) et dans le sens décroissant (...3, 2, 1) avec l'autre appareil. ² Notons au passage que ce type de précautions – utiliser un système expérimental en double

¹ *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press, p.152.

² Même lorsque les échantillons étaient mesurés dans le même ordre pour les deux appareils, il existait un décalage de quelques minutes pour un même échantillon. Il est donc inutile d'évoquer un phénomène de résonance tel qu'il se produit entre deux cordes vibrantes !

– est très rare dans la recherche « normale ». Sur la Figure 3 nous avons représenté 574 *couples de mesures* recueillis dans des expériences dont la plupart ont été décrites dans « *L'Âme des Molécules* ». Cette analyse globale des résultats n'avait jamais été réalisée jusqu'à présent (les expériences prises en compte sont indiquées en note).¹

Cette figure met en évidence la corrélation des mesures obtenues au cours des expériences faites en parallèle sur les appareils A et B : plus l'effet observé avec l'appareil A était élevé et plus il avait de chances de l'être également avec l'appareil B. Si nous procédons à une transformation logarithmique des valeurs des abscisses et des ordonnées de la Figure 3, nous constatons sur la Figure 4 que les points se disposent avec une plus grande régularité rendant ainsi les points du nuage plus visibles. Nous allons voir que l'intérêt de cette transformation n'est pas qu'esthétique.

En effet, sur la Figure 4, la corrélation entre les mesures des deux appareils est encore plus évidente : si un point mesuré avec l'appareil A est <10 %, il a une probabilité importante d'être associé à une valeur <10 % avec l'appareil B ; de même pour les valeurs >10 %. Si pour le lecteur cette idée de corrélation directement visible sur la figure n'est pas évidente, il peut comparer avec la Figure 5 pour laquelle la corrélation des couples de points a été « brisée » pour les besoins de la démonstration.

¹ Les expériences de 1992 à 1996 qui ont permis de tracer cette figure n'ont pas été « sélectionnées ». Nous avons inclus dans l'analyse l'ensemble des expériences dont nous avons eu connaissance dès lors que des mesures avaient été réalisées en parallèle sur les deux appareils. Les chapitres indiqués ci-après correspondent à la deuxième partie de *L'Âme des Molécules*. Ces expériences sont les suivantes : Démonstration du 9 juillet 1992 (*Chapitre 1*) ; Expériences à l'aveugle de début décembre 1992 avec le sérum physiologique « contaminé » (*Chapitre 5*) ; Expérience de transmission du 21 avril 1993 (*Chapitre 6*) ; Expériences de transmissions « Charpak » de mars à juillet 1994 (*Chapitre 10*) ; Expériences de transmission de février à juillet 1995 (*Chapitre 11*) ; Expériences avec granules homéopathiques de 1995 et 1996 (*résultats non rapportés dans ADM*) ; Démonstration de numérisation-transmission du 7 mai 1996 (*Chapitre 14*) ; Démonstration de numérisation-transmission du 12 juin 1996 (*Chapitre 14*) ; Démonstration de numérisation-transmission du 27 février 1996 (*Chapitre 13*) ; Expériences de numérisation-transmission « Chicago » d'avril à septembre 1996 (*Chapitre 15*) ; Démonstration de numérisation-transmission du 30 septembre 1996 (*Chapitre 16*) ; Expérience de numérisation-transmission du 13 novembre 1996 (*Chapitre 16*).

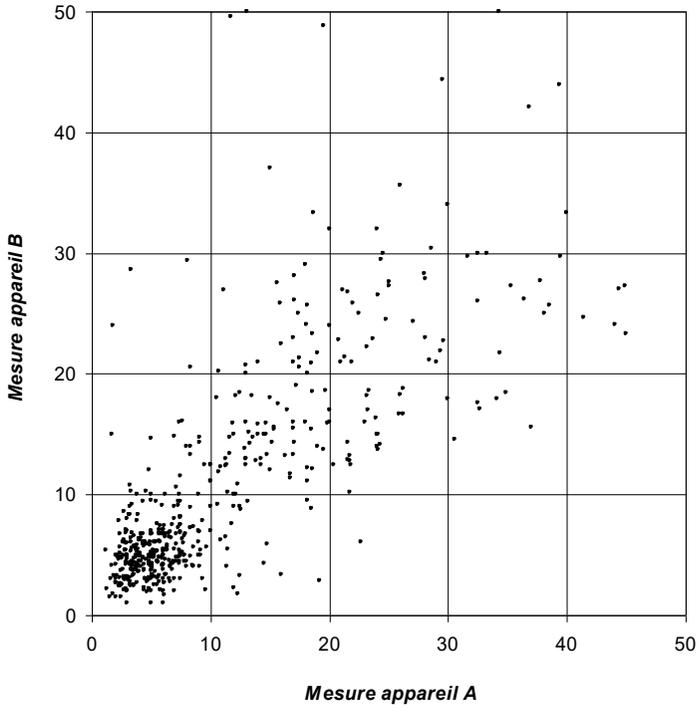


Figure 3. Corrélation des mesures réalisées sur les deux appareils de Langendorff. Cette figure représente 574 couples de mesures obtenus avec les deux appareils A et B entre 1992 et 1996. Abscisse et ordonnée sont exprimées en pourcentage maximal de variation du débit coronaire (les valeurs supérieures à 50% n'ont pas été représentées pour des raisons de lisibilité). Une transformation mathématique simple (logarithmique) conduit à la représentation de la Figure 4.

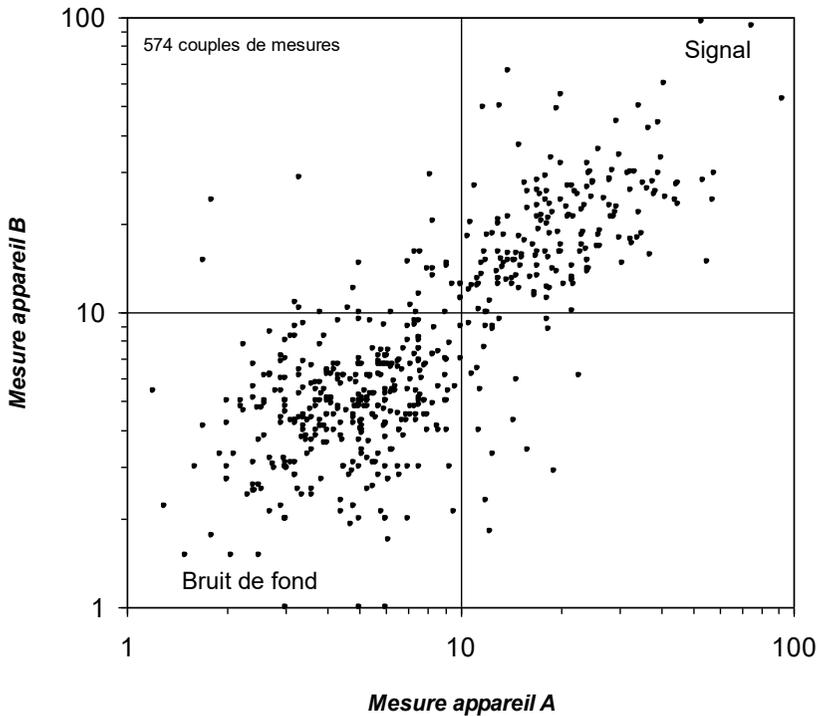


Figure 4. Corrélation entre les mesures des appareils de Langendorff A et B (échelle logarithmique). Cette figure représente 574 couples de mesures obtenus avec les deux appareils A et B de 1992 à 1996. La limite empirique à 10 % permet de séparer l'ensemble des résultats en deux nuages statistiques dans le quadrant supérieur droit (effet > 10 %) et dans le quadrant inférieur gauche (effet < 10 %). Si une mesure réalisée pour un échantillon donné est > 10 % alors la probabilité qu'il en soit de même avec l'appareil B est importante (de même avec une valeur < 10 %). En d'autres termes les résultats obtenus avec les appareils A et B sont *corrélés*. La significativité statistique de cette corrélation, quelle que soit la méthode utilisée, est extrêmement élevée.

Rappelons qu'à ce stade de l'analyse nous ne nous préoccupons pas de savoir si les points représentés étaient censés être « actifs » ou « inactifs ». Seule nous importe la corrélation entre les mesures appariées obtenues avec l'appareil A et l'appareil B. Tout au long de cette histoire nous avons constaté en effet que la relation de cause à effet posait un problème. Nous avons alors parlé de « discordance cohérente ». C'est pourquoi nous en restons pour le moment *au niveau des corrélations* sans chercher de *relation causale*. Nous cherchons simplement à établir quels événements ou états étaient observés ensemble. C'est certes une régression par rapport à l'ambition initiale qui fut à l'origine de ces expériences mais comme nous l'avons dit c'est un premier pas en direction d'une possible reconstruction.

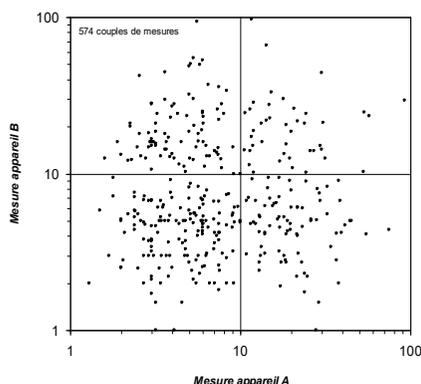


Figure 5. Dans un but didactique nous avons repris les données des 574 couples de mesures. Toutefois, pour chaque couple (x, y) la valeur de x a été couplée avec la valeur de y du couple suivant dans la liste. On constate alors que la corrélation s'effondre. En effet, que la mesure sur l'appareil soit $<10\%$ ou $>10\%$, il y a autant de chances qu'elle soit $>10\%$ (ou $<10\%$) avec l'appareil B. Les quadrants avec des valeurs « discordantes » (quadrant supérieur gauche et inférieur droit) sont maintenant occupés par de nombreux points.

Ceci est simplement destiné à montrer au lecteur qui n'aurait pas l'habitude des représentations statistiques quels aspects présentent une absence de corrélation (cette figure) et une corrélation significative (la figure précédente).

Cet aspect des expériences – c'est-à-dire l'existence de corrélations entre les deux appareils – n'a pas été mis exergue par J. Benveniste car *l'enjeu* pour convaincre les sceptiques a toujours porté sur *l'attribution correcte de séquences* « actifs/inactifs » au cours des expériences de démonstration.

La corrélation entre l'appareil A et l'appareil B (Figure 4) est un résultat essentiel : il signifie que *les variations enregistrées par l'appareil A et par l'appareil B ont une origine commune*. Le but de cette analyse est de tenter de préciser la *source des corrélations*.

Deux populations d'effets biologiques

Calculons maintenant la valeur moyenne de chaque couple de mesures de la Figure 4 et étudions la distribution de ces mesures. La représentation en est faite Figures 6 et 7. Cette figure appelle plusieurs remarques. Nous constatons tout d'abord l'existence de *deux populations d'effets biologiques* bien individualisées ayant chacune son mode. Nous observons également que la transformation logarithmique a permis de donner à chacune des populations un aspect symétrique (de type gaussien).

L'explication de cette symétrie réside probablement dans le fait que ce qui est mesuré est un débit qui – pour un conduit de section approximativement circulaire – est de la forme $K \pi R^2$ où R est le rayon et K une constante. Après transformation logarithmique la variable mesurée est linéarisée car elle est alors de la forme $K' \pi R$. Les variations de la variable aléatoire qui est ainsi indirectement mesurée est une longueur, à savoir le rayon de l'artère coronaire.

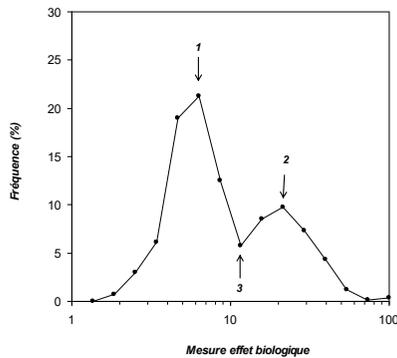
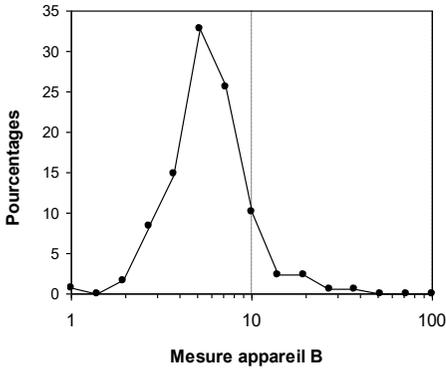


Figure 6. Distribution des points de la Figure 4. Les moyennes de chacun des 574 couples de mesure ont été calculées et la distribution des 574 évaluations est représentée sur cette figure. On constate qu'il existe deux « populations » de mesures : la population 1 dont le pic est à 6,3 % et la population 2 dont le pic est à 21,5 % ; Le point d'inflexion 3 est à 11,7 % (rappelons que 10 % était la limite empirique séparant un effet significatif sur le débit coronaire et une absence d'effet).

Si la mesure avec l'appareil A est < 10%, alors :



Si la mesure avec l'appareil A est > 10%, alors :

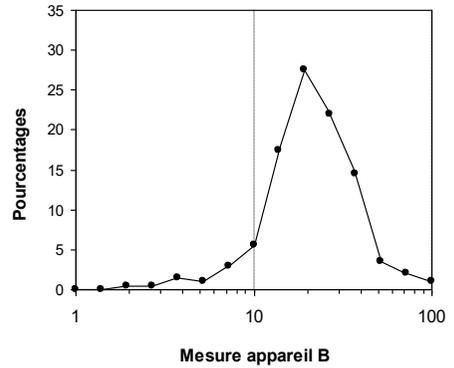


Figure 7. Ces deux graphiques sont construits à partir des résultats de la Figure 3.2. Ils illustrent sous la forme de distributions l'idée de corrélation entre les mesures de l'appareil A et de l'appareil B. Lorsque la mesure sur l'appareil A est inférieure à 10%, alors la mesure sur l'appareil est (le plus souvent) elle aussi inférieure à 10% (graphique gauche). De même si la mesure A était supérieure à 10%, la mesure B était en moyenne supérieure à 10% (graphique droit).

La transformation logarithmique des variations du système biologique n'a pas été utilisée par J. Benveniste et ses collaborateurs. L'aspect symétrique de la distribution des résultats expérimentaux après cette transformation faite *a posteriori* est donc *un argument très fort concernant la « sincérité » de ces mesures*. Il permet de valider ces résultats. Il serait très difficile – n'ayant pas conscience de la nécessité de cette transformation – d'« inventer » ces données.

On pourrait reprocher à cette analyse de mélanger des expériences réalisées dans des conditions expérimentales très variées (hautes dilutions, granules homéopathiques, transmissions électromagnétique, numérisation du signal électromagnétiques, etc.) ainsi que des substances biologiques différentes (histamine, ovalbumine, acétylcholine, etc.) Et le lecteur sait depuis son jeune âge que l'on ne doit pas additionner des choux et des carottes. Mais, on l'a compris, seule nous importe maintenant la corrélation des effets des échantillons testés *quel que soit le procédé mis en jeu*. Par conséquent, l'argument se retourne de lui-même : c'est précisément du fait de cette hétérogénéité des « causes » supposées (les « choux » et les « carottes ») que la robustesse de cette « double bosse » n'en est que plus remarquable.

Nous retrouvons ici l'idée que nous avons avancée dans le chapitre précédent : lorsqu'une variation du débit coronaire est observée, elle est

toujours en moyenne de l'ordre de 20–30 %, et ceci quel que soit le processus qui a permis de l'obtenir. L'aspect bimodal (« ça bouge ; ça ne bouge pas ») mis en évidence par cette distribution ne fait que renforcer cette idée. Nous retrouvons également le seuil à 10 % entre « inactifs » et « actifs » qui avait été fixé empiriquement.

L'effet noté « 1 » sur la Figure 6 est l'effet de base ; c'est ce que l'on observe lorsque le système est « au repos » ou lorsque le produit testé se révèle « inefficace ». C'est le « *bruit de fond* ». L'effet noté « 2 », à ce stade de l'analyse, a une origine inconnue (puisque nous avons renoncé à l'idée de chercher une réponse « dans l'eau »).

Afin de poursuivre l'analyse, *nous suspendons pour le moment notre jugement* quant à l'origine du signal biologique qui émerge du bruit de fond. *Son existence est néanmoins avérée* : en effet si un « effet » est observé sur le premier appareil alors il a toutes les chances d'être observé sur le deuxième appareil.

Dans le chapitre suivant nous présentons les résultats obtenus (avec le système de Langendorff) dans les différents contextes expérimentaux permettant ou non le maintien des corrélations décrites dans le présent chapitre.



Données expérimentales et contextualité

« *Ma conviction est qu'il reste à démontrer qu'il existe un phénomène à expliquer* ».

John Maddox (1988) ¹

Nous partons donc du fait établi qu'il existe *deux états possibles* du système biologique étudié (Figure 8). Soit le système est « au repos » (noté ↓) avec une variation du paramètre biologique mesuré qui reste dans les limites du bruit de fond (< 10 %), soit nous observons une variation (> 10 %) de ce paramètre (notée ↑). Comme nous l'avons dit, nous suspendons provisoirement notre jugement concernant l'origine de l'état ↑ qui émerge du bruit de fond.

Afin de progresser dans la compréhension de ce système expérimental, faisons en quelque sorte un état des lieux. Pour cela, nous regroupons les expériences en deux grands groupes de situations expérimentales.

Le premier groupe d'expériences est constitué par les différents cas où des corrélations sont obtenues : les expériences sont réalisées en ouvert ou à l'aveugle avec la participation d'un observateur « interne » (appelé observateur de type 2). Les corrélations obtenues sont statistiquement significatives.

Dans le deuxième groupe d'expériences, les expériences sont réalisées à l'aveugle avec la participation d'un observateur « externe » (appelé observateur de type 1). On observe alors une distribution des mesures *au hasard* entre les deux « états » possibles du système : les corrélations ne sont plus statistiquement significatives. Il est important de noter toutefois la persistance du signal.

¹ Waves caused by extreme dilution. *Nature* 1988; 335:760–3.

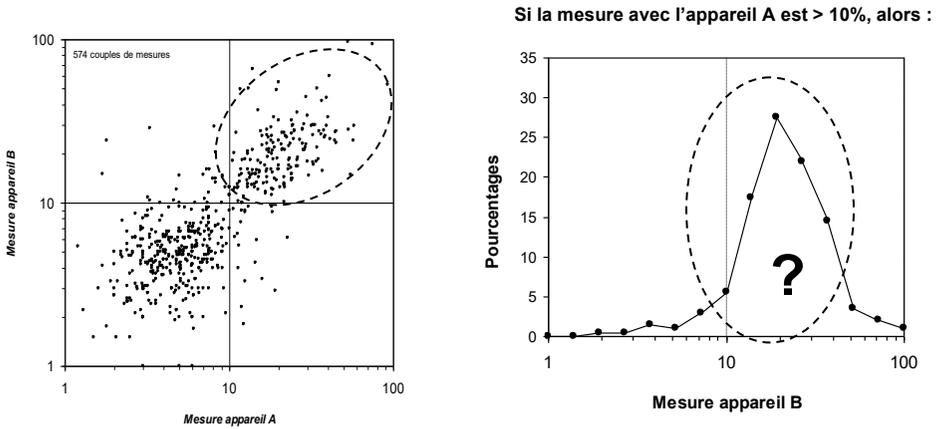


Figure 8. Ces deux figures ont déjà été décrites dans le chapitre précédent. C’est du fait de l’existence de la « population » entourée par des pointillés que nous concluons « qu’il se passe quelque chose ». La question de la non correspondance entre les effets attendus et les effets observés qui apparaît dans certaines circonstances (ce que nous avons nommé la « discordance cohérente ») est à ce stade une autre question. Sur les « causes » pouvant expliquer la présence de la « population » entourée par des pointillés, nous suspendons notre jugement dans un premier temps.

Premier groupe d’expériences : établissement de corrélations

Il existe trois situations expérimentales avec établissement de corrélations.

Situation n°1 : Corrélation des mesures des appareils A et B (expériences en ouvert) (Figure 9)

Nous en avons déjà parlé. Il s’agit des deux appareils de Langendorff qui fonctionnaient en parallèle. Nous avons néanmoins à nouveau représenté ces résultats dans la Figure 9 afin de permettre une comparaison avec les autres situations expérimentales. Au cours de ces expériences, il n’y avait pas d’aveugle entre la mesure A et la mesure B. L’échantillon initial pouvait néanmoins avoir été mis sous un nouveau code au préalable avant d’être confié à l’expérimentateur pour la réalisation des deux mesures, mais ce qui nous importe ici est uniquement la corrélation entre mesure A et mesure B.

Les expériences (574 couples de mesures) qui ont servi à établir cette figure ont été indiquées en note dans le Chapitre 4.

Situation n°2 : Première vs. deuxième mesure du même échantillon (aveugle par un observateur de type 2) (Figure 10)

Dans le cas précédent, les mesures A et B n'étaient pas réalisées à l'aveugle. Dans cette situation n°2, afin de conforter les résultats de démonstrations publiques et de s'assurer que l'expérience n'était pas biaisée d'une façon ou d'une autre par l'expérimentateur, les échantillons étaient recodés par un autre membre de l'équipe (observateur de type 2) : après une première série de mesures, les mêmes échantillons étaient donnés à nouveau à l'expérimentateur pour de nouveaux tests mais sous un nouveau nom.

Les expériences correspondantes sont indiquées p. 44 (78 mesures).

Situation n°3 : Échantillons "inactifs" vs. échantillons "actifs" (aveugle par un observateur de type 2) (Figure 11)

Dans ces expériences, l'aveugle était réalisé par un ou plusieurs membres de l'équipe (observateur de type 2).

Les expériences correspondantes sont indiquées p. 44 (126 mesures).

Dans les situations 1 à 3, nous constatons donc une corrélation entre les effets observés et effets « attendus ».

Deuxième groupe d'expériences : effondrement des corrélations

Situation n°4 : Échantillons "inactifs" vs. échantillons "actifs" (aveugle par un observateur de type 1) (Figure 12)

Pour ces expériences dont l'aveugle a été réalisé par un observateur de type 1, le signal observé (↑ ou ↓) se produit au hasard.

Les expériences correspondantes sont indiquées p. 44 (108 mesures).

L'ensemble des résultats (situations 1 à 4) et les pourcentages observés sont résumés dans le Tableau 2.

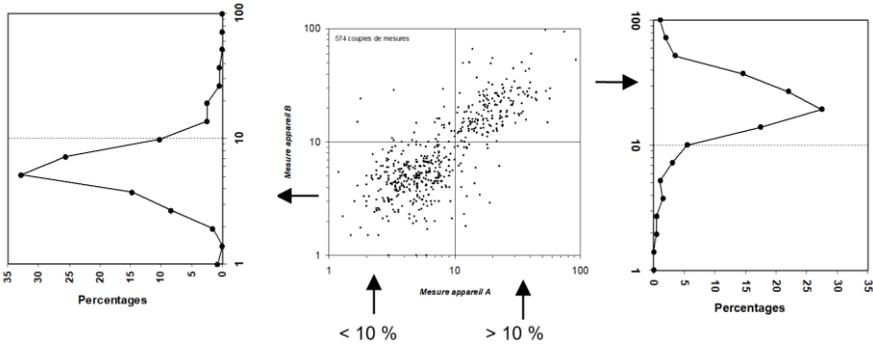


Figure 9. *Corrélation des mesures des appareils A et B :*

Cette figure a déjà été présentée ; nous la présentons à nouveau pour faciliter la comparaison avec les suivantes. Elle représente les résultats de mesures réalisées en parallèle sur l'appareil A (abscisses de la figure centrale) et l'appareil B (ordonnées). Il n'y a pas d'aveugle entre la mesure A et la mesure B. Comme nous l'avons déjà dit, nous ne nous préoccupons pas de savoir si le résultat obtenu est conforme à ce qui était attendu (échantillon supposé actif ou inactif). Ce que nous souhaitons mettre en évidence est la corrélation des mesures entre les deux appareils.

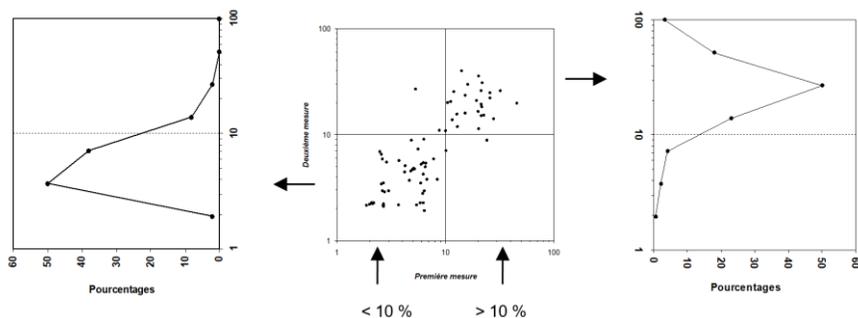


Figure 10. Première vs. deuxième mesure du même échantillon (aveugle par observateur de type 2) :

Cette figure correspond à des expériences à l'aveugle « en interne » : une première série de mesure avait lieu, puis un (ou plusieurs) membre(s) de l'équipe de J. Benveniste redonnait à l'expérimentateur les mêmes échantillons mais sous un nouveau nom afin que l'expérimentateur ne puisse relier les résultats de la première série de mesures (abscisses de la figure centrale : $< 10\%$ ou $> 10\%$) avec ceux de la deuxième mesure (ordonnées). Ici encore nous ne nous préoccupons pas de savoir si les résultats obtenus sont conformes à l'« étiquette » de l'échantillon initial. Nous constatons simplement la corrélation des mesures.

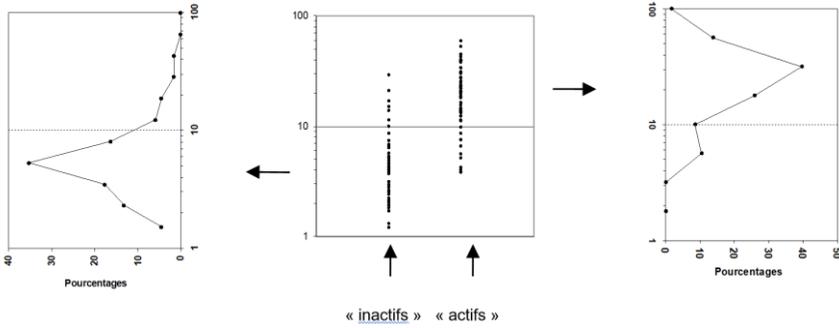


Figure 11. *Echantillons « inactifs » vs. échantillons « actifs » (aveugle par observateur de type 2) :*

Au cours de ces expériences, un (ou plusieurs) membres(s) de l'équipe de J. Benveniste aveuglait les échantillons censés être « inactifs » ou « actifs » avant de les donner à l'expérimentateur. On constate que le résultat était corrélé avec l'étiquette de l'échantillon (même s'il existait des « erreurs » d'attribution, globalement la corrélation était significative).

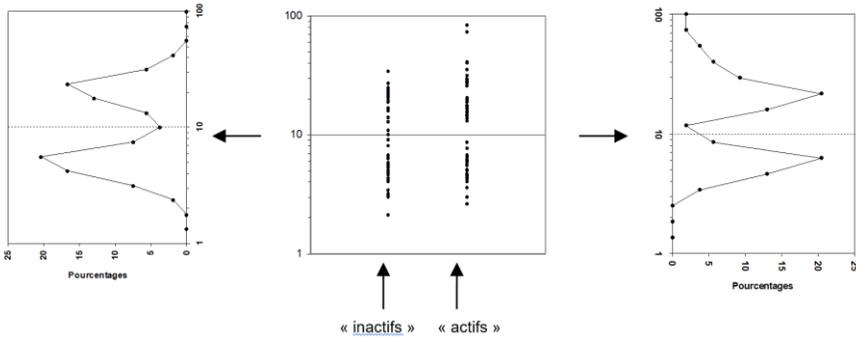


Figure 12. *Echantillons « inactifs » vs. échantillons « actifs » (aveugle par observateur de type 1) :*

Au cours de ces expériences, un observateur extérieur (observateur de type 1) aveuglait les échantillons qui étaient ensuite confiées aux membres de l'équipe de J. Benveniste afin qu'ils réalisent les mesures. L'observateur de type 1 n'assistait pas aux expériences et n'avait connaissance des résultats obtenus qu'après la fin des mesures. On constate dans ce cas que *la corrélation est brisée* ; néanmoins les deux pics correspondant au bruit de fond et au signal sont toujours présents.

Sources des données expérimentales qui ont servi à construire les Figures 9 à 12 :

Figure 9. Les données de cette figure ont été déjà mentionnées (cf. note Chapitre 4)

Figure 10. Expériences du 13 mai 1993 (Chapitre 8 de la deuxième partie de *L'Âme des Molécules*), 27 février 1996 (Chapitre 13), 7 mai 1996 (Chapitre 14), 12 juin 1996 (Chapitre 14), 4 décembre 1996 (Chapitre 16), 25 septembre 1997 (Chapitre 18).

Figure 11. Expériences des 21 et 23 mai 1996 faisant suite à celle du 7 mai 1996 (Chapitre 14 de la deuxième partie de *L'Âme des Molécules*), 25 et 26 juillet 1996 faisant suite à celle du 12 juin 1996 (Chapitre 14), 22 octobre 1996 (Chapitre 16), 25 octobre 1997 (Chapitre 16), 13 novembre 1996 faisant suite à celle du 4 novembre 1996 (Chapitre 16), expériences de février-juillet 1997 (Chapitre 17).

Figure 12. Expériences du 9 juillet 1992 (Chapitre 1 de la deuxième partie de *L'Âme des Molécules*), 28 septembre 1992 (Chapitre 4), 27 février 1996 (Chapitre 13), 7 mai 1996 (Chapitre 14), 30 septembre 1996 (Chapitre 16), 4 novembre 1996 (Chapitre 16), 4 décembre 1996 (Chapitre 16), 27 septembre 1997 (Chapitre 18).

Tableau 2. Résumé des Figures 9–12 : résultats concordants ou discordants selon le contexte expérimental.

	Nombre de points expérimentaux	% de points expérimentaux < 10%	% de points expérimentaux > 10%	<i>p</i> *
<i>Expériences en ouvert</i>				
Situation #1 : Appareil A vs. appareil B (<i>Figure 9</i>)				
< 10% avec appareil A	N=372	93% (appareil B)	7% (appareil B)	< 1 x 10 ⁻⁸³
> 10% avec appareil A	N=202	11% (appareil B)	89% (appareil B)	
<i>Expériences à l'aveugle avec observateur de type 2</i>				
Situation #2 : Première vs. seconde mesure du même échantillon (<i>Figure 10</i>)				
< 10% après première mesure	N=50	96% (2 nd e mesure)	4% (2 nd e mesure)	< 1 x 10 ⁻¹³
> 10% après première mesure	N=28	7% (2 nd e mesure)	93% (2 nd e mesure)	
Situation #3 : Echantillons « inactifs » vs. « actifs » (<i>Figure 11</i>)				
Etiquette « inactif »	N=68	88%	12%	< 1 x 10 ⁻¹³
Etiquette « actif »	N=58	19%	81%	
<i>Expériences à l'aveugle avec observateur de type 1</i>				
Situation #4 : Echantillons « inactifs » vs. « actifs » (<i>Figure 12</i>)				
Etiquette « inactif »	N=54	57%	43%	0.25
Etiquette « actif »	N=54	44%	56%	

Les pourcentages des paires concordantes statistiquement significatifs sont indiqués en caractères gras.

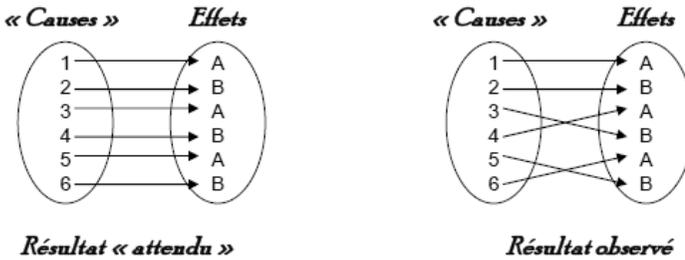
* Test du Chi-carré.

Pourquoi J. Benveniste n'est-il pas parvenu à convaincre ses « pairs » ?

Les expériences réalisées par l'équipe de J. Benveniste confirmaient les hypothèses de la « mémoire de l'eau » et de la « biologie numérique »... mais seulement jusqu'à un certain point.

En effet, J. Benveniste s'est heurté à *un écueil expérimental*. Cet « écueil » a été retrouvé dans les différents modèles expérimentaux successifs que son équipe a élaborés. C'est, selon nous, le fait scientifique qui émerge de « l'affaire de la mémoire de l'eau ».¹

Dans certaines conditions expérimentales, les effets observés étaient reliés au hasard aux « causes » supposées :



D'une façon générale, les expériences qui conduisaient à un « succès » étaient essentiellement 1) les expériences faites sans masquer sous un code les échantillons à tester (expériences en ouvert) ; 2) les expériences faites « en interne », y compris les expériences avec des échantillons « à l'aveugle » pour l'expérimentateur et codées par un membre de l'équipe (ou par un dispositif automatique de codage). Les expériences qui conduisaient à l'échec étaient tout particulièrement les expériences destinées à prouver la réalité des effets en impliquant des observateurs extérieurs qui prenaient en charge le masquage des échantillons à tester. Ces dernières expériences étaient réalisées en deux temps : des échantillons expérimentaux étaient étiquetées sous un code dans un laboratoire extérieur par des scientifiques « étrangers » (hors du « cercle expérimental » habituel) puis testés au laboratoire (avec un éventuel recodage interne). A noter que les échantillons « en ouvert » réalisés dans ces conditions donnaient les résultats « attendus ».

Afin de vaincre cet obstacle expérimental, l'équipe de J. Benveniste était

¹ En effet, aucune « signature » physique n'a jamais été mise en évidence sur les supports mis en jeu (par exemple une modification de la « structure » de l'eau ou des spectres des « signaux » informatiques). La confirmation des hypothèses passait toujours par la mesure d'un paramètre biologique.

parvenue à un degré poussé de sophistication des expériences. Ainsi, dans sa dernière version, l'expérience sur le cœur isolé de cobaye pouvait être « pilotée » à distance directement depuis un ordinateur (sans échantillon d'eau intermédiaire, ni « contact » quel qu'il soit). L'idée d'une contamination ne pouvait être invoquée. Les seules différences apparentes entre les signaux réputés « actifs » ou « inactifs » résidaient dans des fichiers informatiques. De plus, l'effet observé avait toutes les apparences de la spécificité.

De même, dans sa dernière version, l'expérience de coagulation plasmatique était réalisée par un robot qui réalisait de façon automatique l'ensemble des opérations, depuis le choix aléatoire des « signaux » informatiques jusqu'à l'impression des résultats (le choix des « signaux » restait inconnu de l'opérateur jusqu'à la fin de l'expérience).

A ce stade on pourrait considérer que les hypothèses liées à une « mémoire de l'eau » ou à une « biologie numérique » ont été « falsifiées » (dans le sens que Karl Popper a donné à ce terme). Il reste à expliquer toutefois où se trouve *la source de variation du paramètre biologique* (effets A et B décrits ci-dessus) et à préciser les conditions physiques du « succès » et de l'« échec ».



Corrélations et transmission d'informations

« *Les observations inexplicables ne sont pas toujours des preuves du surnaturel* »

John Maddox (1988) ¹

Ce système expérimental pourrait-il transmettre des informations ?

Revenons un instant à l'hypothèse initiale qui fut à la source de ces expériences et supposons à titre d'hypothèse de travail que « quelque chose » constitutif de l'eau avait bien été modifié. Si l'« information biologique » est bien là où elle est supposée être c'est-à-dire *dans l'eau*, on devrait alors raisonnablement pouvoir imaginer un dispositif qui permettrait de discriminer les échantillons « actifs » et « inactifs », même lorsque ces échantillons sont délivrés à l'expérimentateur sous forme « codée ».

Imaginons donc que l'on associe la signification « 0 » à « inactif » et « 1 » à « actif ». Ce système devrait alors être capable de transmettre des informations. Certes, ce ne serait pas très pratique et il faut reconnaître qu'il existe des moyens de communiquer beaucoup plus efficaces et plus commodes.

Prenons néanmoins un cas simple où une information de type chimique permet de transmettre une information. Dans une série de verres numérotés contenant de l'eau, certains sont laissés en l'état (information « 0 ») et dans d'autres nous ajoutons du sucre (information « 1 »). En utilisant ce code binaire (et si nous prenons soin de maintenir l'ordre des verres) nous pourrions communiquer avec un interlocuteur. Nous pourrions par exemple transmettre des messages à un prisonnier en lui faisant parvenir chaque jour un « bit » d'information (0 ou 1). Il lui suffirait de goûter l'eau, puis de traduire l'information selon le code convenu. Ceci peut paraître trivial mais cet exemple permet de comprendre l'idée de la transmission d'un message dont chaque information élémentaire (« bit ») est *localisée* dans un échantillon d'eau.

¹ When to believe the unbelievable. *Nature* 1988; 333:787.

Revenons aux expériences en rapport avec la « mémoire de l'eau ». Supposons que de la même façon on se serve d'échantillons d'eau pour envoyer des messages secrets : eau « structurée » pour transmettre l'information « 1 » et « eau non structurée » pour l'information « 0 » ou encore « eau structurée A » pour transmettre « 0 » et « eau structurée B » pour transmettre « 1 ». Un système de cryptographie aurait pu être ainsi élaboré et les fichiers informatiques issus de la « biologie numérique » auraient pu constituer un support idéal. En effet, si l'on suppose valides les principes de la « biologie numérique », il aurait été impossible de distinguer, dans l'état actuel des connaissances, l'information « 0 » de l'information « 1 ». Seul un système biologique spécifique des molécules « enregistrées » aurait été capable de distinguer les « activités » de ces fichiers. Cela aurait été un moyen de cryptographie tout à fait original.

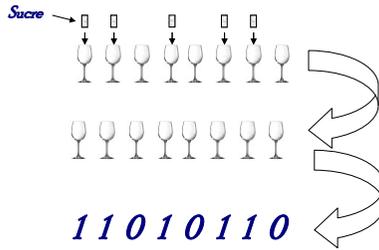
En fait, sans le savoir, c'est ce que J. Benveniste et son équipe ont fait lorsque les fichiers informatiques (ou les échantillons d'eau) ont été utilisés dans des expériences à l'aveugle. Mais comme on l'a vu ce système s'est révélé très fragile lorsqu'on l'a inclus dans un dispositif qui aurait pu autoriser la *transmission d'un message*.

Le *fait scientifique* qui émerge de l'histoire de la « mémoire de l'eau » serait donc celui-ci : les expériences « marchaient » tant qu'on ne cherchait pas à les utiliser dans un dispositif qui aurait permis de *transmettre une information*. Certes des corrélations existaient. Mais elles ne persistaient qu'à condition que le « message » à décoder ne transite qu'au sein du laboratoire. Il faut une fois de plus insister sur le fait que cette discordance apparente n'est pas liée à un problème expérimental trivial car les échantillons maintenus « en ouvert » donnaient les résultats attendus.

Par conséquent, si nous souhaitons décrire de façon formelle les expériences de J. Benveniste, nous devons comprendre le rôle joué par le contexte expérimental.

Cette impossibilité à localiser « l'information » dans les échantillons d'eau est à nouveau un argument qui nous oblige à renoncer aux idées liées à la « mémoire de l'eau » ou aux hypothèses de la biologie numérique. En effet, si les conditions de l'aveugle (observateurs de type 1 vs. type 2) ont de telles conséquences, peut-on encore faire appel aux catégories expérimentales habituelles pour décrire ces résultats ?

Un message chimique. Si la « mémoire de l'eau » était réellement une modification physico-chimique spécifique d'une « information » localisée dans chacun des échantillons « mesurés », alors on devrait pouvoir l'utiliser pour transmettre un message. De même, imaginons que nous souhaitons transmettre un message en utilisant des verres contenant de l'eau sucrée (bit « 1 ») ou non sucrée (bit « 0 »). Le destinataire goûterait le contenu de chacun des verres (en respectant l'ordre). Puis il « décoderait » : sucré = 1 et non sucré = 0. La « localisation » dans chacun des verres d'une « information » chimique permettrait donc la transmission d'un message.



Une piste ?

Revenons quelques instants sur l'expertise de la DARPA mentionnée plus haut (Chapitre 2). Rappelons brièvement que l'expertise réalisée par cette agence dépendante du Département de la défense US était destinée à évaluer les effets de la « biologie numérique » (*ADM 2 Chapitres 23 et 24*).

Les résultats de cette expertise ont été publiés en 2006 par les universitaires et chercheurs de l'équipe dans une revue scientifique tout à fait « conventionnelle » :

The FASEB Journal • Hypothesis (2006) 20:23-8

Can specific biological signals be digitized?

Wayne B. Jonas,^{*†,1,2} John A. Ives,^{*‡,1} Florence Rollwagen,^{†,1} Daniel W. Denman,[§] Kenneth Hintz,^{||} Mitchell Hammer,[†] Cindy Crawford,^{*†,||} and Kurt Henry^{**||}

^{*}Samueli Institute for Information Biology, Alexandria, Virginia, 22314, USA

[†]Uniformed Services University of the Health Sciences, Bethesda, Maryland, USA; [‡]Walter Reed Army

Institute of Research, Washington, D.C., USA; [§]University of Maryland, College Park, Maryland, USA;

^{||}George Mason University, Fairfax, Virginia, USA; ¹American University, Washington, D.C., USA; and

^{**}Defense Advance Research Projects Agency, Arlington, Virginia, USA

Comme nous l'avons dit dans le Chapitre 2, les auteurs de cet article concluent sur l'échec de la reproduction *indépendante* des résultats liés à la « biologie numérique ». Cette conclusion qui pourrait sembler clore la question de la « mémoire de l'eau » et de la « biologie numérique », pose néanmoins des jalons assez inattendus pour de futures recherches :

*« Bien qu'il soit possible que **d'autres facteurs inconnus liés à l'expérimentateur** puissent être une explication à ces observations, tels que l'influence de composés chimiques ou d'émanations énergétiques ou encore **l'intentionnalité des expérimentateurs**, nous n'avons pas testé ces hypothèses, ni tenté de développer un cadre conceptuel qui nous permettrait de contrôler de tels facteurs. Sans ce cadre, continuer à étudier la biologie numérique en gardant la même approche serait au pire une recherche sans fin et au mieux serait prématuré. »*

Nous ne pouvons que souscrire à cette conclusion et c'est précisément afin de définir un nouveau cadre conceptuel pour ces recherches que le présent ouvrage a été écrit. Notons que ce nouveau cadre de recherche devrait selon les experts avoir les *expérimentateurs* pour objet d'étude.



A l'impossible nul n'est tenu

« – Inutile d'essayer, dit Alice, il est impossible de croire aux choses impossibles.

– À mon avis vous manquez de pratique, répliqua la Reine. Moi, à votre âge, je m'y appliquais une demi-heure tous les jours. Il m'est arrivé alors de croire jusqu'à six choses impossibles avant le petit déjeuner ».

Lewis Carroll, *De l'autre côté du miroir*.

Soutenir la thèse de la « mémoire de l'eau *sans eau* » n'est pas une simple posture intellectuelle et n'est en aucune manière une concession aux adversaires des expériences de J. Benveniste pour lesquels il ne saurait y avoir de « mémoire de l'eau » car ce serait, selon eux, impossible dans l'état actuel des connaissances. Nous souhaitons avoir convaincu le lecteur que l'hypothèse de la « mémoire » de l'eau n'est pas tenable, non pas parce cela nous déplaît, mais tout simplement parce que c'est ce que nous enseignent les expériences elles-mêmes pour qui sait les regarder dans leur ensemble et selon le bon angle. Dans ce chapitre, nous formaliserons cette impossibilité en termes mathématiques. Par ailleurs, ce chapitre nous permettra de préparer la modélisation des expériences décrite dans la troisième partie.

Présentation d'Alice, Bob et Eve

Dans le chapitre 4, nous avons classé les expériences selon le contexte expérimental et, afin de rendre compte des différents résultats, nous allons bâtir un modèle simple basé sur une approche dite personnaliste des probabilités. Nous devons tout d'abord définir certaines conventions et règles.

Il est habituel dans ce type de problème, en cryptologie en particulier, de personnifier les différents protagonistes qui cherchent à échanger (Alice et Bob) ou à intercepter (Eve) des informations. Pour ce qui nous préoccupe, Alice a le rôle de l'expérimentateur tandis que Eve et Bob correspondent respectivement

aux observateurs de type 1 et type 2 que nous avons définis dans le chapitre 4. Le rôle de chacun de ces personnages est décrit dans la Figure 13.

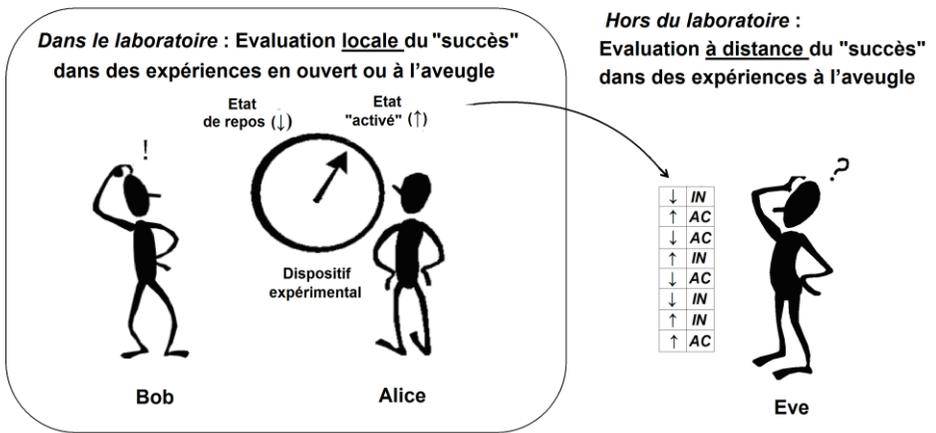


Figure 13. Définition des rôles des différents protagonistes dans une situation expérimentale. Eve est hors des locaux où se déroule l'expérience et n'a pas d'informations « directes » ; elle supervise l'expérience à distance en évaluant le taux de succès des expériences faites à l'aveugle (pour Alice/Bob). Dans un premier temps, Eve a remplacé l'étiquette initiale de chaque échantillon expérimental par un code. Quand tous les échantillons ont été testés, les résultats obtenus par Alice sont envoyés à Eve qui peut alors évaluer le taux de succès en comparant terme à terme les deux listes: effets « attendus » (étiquettes « inactives » (IN) et « actives » (AC) des échantillons sous code) et effets observés (état de repos ou état « activé »). Bob qui observe Alice réalisant une expérience et il peut aussi réaliser localement une expérience à l'aveugle pour Alice.

Les termes « local » et « à distance » ne doivent pas induire en erreur, même si, en pratique, Alice et Eve étaient dans des laboratoires plus ou moins éloignés, tandis qu'Alice et Bob étaient proches physiquement. C'est en termes d'informations sur l'expérience que la question se pose. Imaginons qu'Alice joue à pile ou face. Lorsque la pièce est retombée, le résultat de l'expérience est, par exemple, pile pour Alice et Bob. Pour Eve, qui sait que l'expérience a été réalisée, le résultat est néanmoins toujours pile *ou* face jusqu'au moment où Alice l'informe du résultat. On voit ici que les probabilités, même classiques, recèlent un aspect subjectif : le passage de la probabilité 1/2 (incertitude) à 1 ou 0 (certitude) dépend de l'information dont l'observateur dispose sur l'expérience. Les probabilités sont donc une mesure de notre ignorance et peuvent être différentes selon l'observateur. Elles sont donc liées subjectivement à l'observateur et ne décrivent pas un état objectif du monde.

Le but des expériences que nous décrivons était de démontrer une relation de cause à effet entre la modification de ces échantillons (grâce à la « mémoire de l'eau ») et leur impact sur un dispositif biologique.

Dans ces expériences, l'événement « succès » était défini comme :

1) L'observation d'un échantillon « inactif » (IN) associé à l'état de repos du système expérimental (↓)

ou

2) L'observation d'un échantillon « actif » (AC) associé à l'état « activé » du système expérimental (↑).

Nous devons à nouveau insister qu'il est bien entendu (et c'est là que réside l'aspect « non classique » de cette description) que les échantillons sont *tous physiquement équivalents*. Seules les « étiquettes » (qui ne sont en fait que les résultats « attendus » pour chacun des échantillons) permettent de les différencier.

Expériences sur la « mémoire de l'eau » et loi des probabilités totales

Nous allons montrer dans un premier temps qu'une description selon la logique « classique » ne peut expliquer ces expériences car l'un des piliers des probabilités classiques, la loi des probabilités totales, est violée par ces résultats. Ceci justifiera par conséquent le fait de faire appel à une théorie plus générale des probabilités.

La loi des probabilités totales peut se formuler de la façon suivante. Si on considère deux événements disjoint, B_1 et B_2 , tels que $\text{Prob}(B_1 \cup B_2) = 1$ (probabilité de réalisation de B_1 ou B_2 égal à 1), alors pour tout événement A , nous pouvons écrire l'équation des probabilités totales :

$$\text{Prob}(A) = \text{Prob}(B_1) \times \text{Prob}(A | B_1) + \text{Prob}(B_2) \times \text{Prob}(A | B_2)$$

Dans cette équation, $\text{Prob}(X | Y)$ est une probabilité conditionnelle : probabilité que l'événement X survienne sachant que l'événement Y est connu.

Dans les chapitres précédents, nous avons synthétisé un grand nombre d'expériences basées sur l'appareil de Langendorff (cœur isolé). Ces expériences sont résumées dans le Tableau 3 selon deux types de conditions expérimentales :

- 1) Alice évalue le taux de succès (expérience en ouvert) ou Bob évalue le taux de succès (expérience à l'aveugle pour Alice)
- 2) Eve évalue le taux de succès (expérience à l'aveugle pour Alice).

Dans le cadre d'une description classique de ces expériences, les probabilités respectives de succès ($SUCC$) devraient être identiques avec ou sans supervision par Eve.

Selon les résultats résumés dans le Tableau 3, dans le cas où Eve n'évalue pas le taux de succès des expériences, $\text{Prob}_A(SUCC) = 0.92$ (évaluation Alice) et $\text{Prob}_B(SUCC) = 0.88$ (évaluation par Bob). Eve cherche ensuite à confirmer ces résultats proches de l'unité (c'est à dire réalisées avec succès) en réalisant de nouvelles expériences, mais à l'aveugle pour Alice (Figure 1). Lorsque tous les échantillons ont été testés, Eve reçoit les résultats obtenus par Alice pour chacun des échantillons et peut évaluer le taux de succès (Alice ne disposait que d'échantillons sous un numéro de code).

$$\begin{aligned}\text{Prob}_E(SUCC) &= \text{Prob}(IN) \times \text{Prob}(SUCC|IN) + \text{Prob}(AC) \times \text{Prob}(SUCC|AC) \\ &= 0.5 \times 0.57 + 0.5 \times 0.56 = 0.57\end{aligned}$$

Par conséquent, la probabilité de succès est différente selon les conditions expérimentales (évaluation du taux de succès d'abord par Alice/Bob ou d'abord par Eve) :

$$\text{Prob}_A(SUCC) \approx \text{Prob}_B(SUCC) > \text{Prob}_E(SUCC)$$

La supervision « à distance » conduit à une chute du taux de succès (le succès étant la concordance des résultats « attendus » et des résultats observés). La loi de probabilité totale est donc violée au cours des expériences de J. Benveniste.

Les situations expérimentales où la loi de probabilité totale est violée concernent des situations non classiques telles que les expériences rencontrées en physique quantique. Nous verrons qu'une logique qui a des points communs avec la logique à l'œuvre dans les phénomènes quantique est nécessaire pour décrire ces expériences qui heurtent le sens commun basé sur une vision « classique » de la réalité. Par exemple, dans l'expérience des fentes de Young, la probabilité d'observer un impact d'un photon sur l'écran en un point précis est différente selon que le chemin emprunté par le photon (fente 1 ou fente 2) a été détecté ou non (c'est-à-dire selon que ce chemin est *connu ou non*).

Tableau 3. Violation de la loi des probabilités totales dans les expériences sur la « mémoire de l'eau ».

Situations expérimentales	Nombre de points expérimentaux	Résultats « attendus »	Résultats observés (taux de succès, %)	
			Résultat “↓” (état au repos)	Résultat “↑” (état « activé »)
<i>1) Eve n'évalue pas le taux de succès :</i>				
Alice évalue le taux de succès (en ouvert)	N=372	« Inactif »	93%	7%
	N=202	« Actif »	11%	89%
Bob évalue le taux de succès (à l'aveugle pour Alice)	N=118	« Inactif »	91%	9%
	N=86	« Actif »	15%	85%
<i>2) Eve évalue le taux de succès : (à l'aveugle pour Alice)</i>				
	N=54	« Inactif »	57%	43%
	N=54	« Actif »	44%	56%

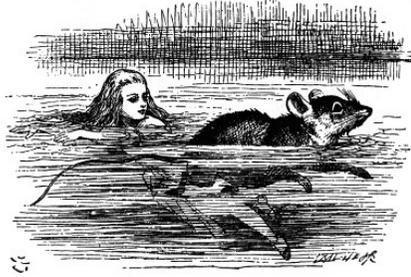
Les taux de succès (étiquette « inactif » associée à état de repos et étiquette « actif » associée à état « activé ») sont en caractères gras.

Ces résultats sont un résumé du Tableau 2 du Chapitre 5.

La décohérence quantique est toutefois, comme nous le verrons bientôt, un obstacle qui s'oppose à l'utilisation de la physique quantique dans des situations expérimentales macroscopiques. Rien n'empêche toutefois d'emprunter au formalisme quantique certains de ses outils. C'est pourquoi, dans une deuxième partie nous aborderons les idées et la logique qui sous-tendent la physique quantique. Dans une troisième partie nous proposerons une modélisation des expériences de J. Benveniste en recourant aux probabilités classiques. Nous verrons qu'une logique de type quantique est néanmoins à l'œuvre à l'arrière-plan. Le fait que les expériences de J. Benveniste violent la loi des probabilités totale trouvera alors une explication.

Le lecteur qui a un bagage suffisant peut se dispenser de la lecture de la deuxième partie et sauter directement à la troisième. Le lecteur impatient peut faire de même et revenir ensuite à cette deuxième partie.

A l'impossible nul n'est tenu



Deuxième Partie

La nouvelle physique

L'étrange monde quantique

« *L'esprit et le monde construisent conjointement l'esprit et le monde.* »

Putman H. *Raison, Vérité et Histoire* (1981)¹

De Kant aux quanta : un même combat ?

Il est une question classique en philosophie qui consiste à se demander ce que deviennent les objets lorsque nous ne sommes pas là pour les observer. Ainsi le philosophe empiriste Berkeley considérait que nous n'appréhendons le monde qu'à travers nos perceptions et il affirmait de façon radicale que les objets ne pouvaient exister en dehors de nos sens. Selon Kant toutefois, il existe bien « quelque chose » qui se trouve « au-delà » de nos perceptions. Toutefois selon lui cet « au-delà » est inconnaissable. C'est ce qu'il appelle le monde « en soi » par opposition au monde « pour soi ». Ainsi, selon Kant, le monde « en soi » n'a ni dimension, ni position et il est indépendant du temps puisque l'espace et le temps ne sont que des formes *a priori* de notre sensibilité.

Déjà Aristote distinguait les qualités primaires et secondaires des objets. Les qualités primaires (objectives) étaient indépendantes de l'observateur tandis que les qualités secondaires (subjectives) étaient présentes dans l'esprit du sujet observant. Parmi les qualités secondaires, Aristote plaçait les couleurs, les saveurs et les odeurs. Les qualités primaires comprenaient la position, la forme, le mouvement. Ainsi, selon ces philosophes, la couleur rouge d'une rose n'appartient pas à la fleur. De nos jours, un physicien dirait qu'elle réfléchit les rayons lumineux d'une certaine longueur que notre cerveau « interprète » comme étant la « couleur rouge ». Cette dernière est donc « dans notre tête » et pas sur la fleur. C'est l'interprétation que notre cerveau fait de nos perceptions qui le conduit à plaquer littéralement les couleurs (c'est-à-dire des sensations)

¹ Putman H. *Raison, Vérité et Histoire*. *Minuit* (1984) ; traduction française de Reason, Truth and History, Cambridge University Press, 1981). Cité par H. Zwirn (*Les limites de la connaissance*, p. 279).

sur les objets qui nous entourent. Mais pourquoi s'arrêter en chemin. Ne pouvons-nous pas faire le même raisonnement pour l'ensemble de nos sens ?

C'est pourquoi d'autres philosophes tels que Locke et Descartes ont fait un pas de plus en considérant que les qualités primaires (objectives) dépendaient elles aussi de l'observateur. Toutefois, dira-t-on, lorsque nous sommes arrêtés dans notre course par un mur, n'est-ce pas la preuve qu'il existe bien quelque chose « en dehors de nous », quelque chose qui « résiste » ? N'est-ce pas la preuve qu'il existe bien une réalité à laquelle nous nous « heurtons » ?

Or, nous savons que tout objet est constitué d'atomes et depuis le début du 20^{ème} siècle, nous avons appris grâce à la révolution de la physique quantique que les constituants des atomes n'ont d'« existence » que si un observateur les « révèle » par une mesure. Plus exactement c'est parce qu'un observateur réalise une opération de mesure que le paramètre mesuré a une valeur fixée. En dehors de cet acte d'observation le paramètre est dans un état « indéterminé ». Nous verrons qu'il existe diverses interprétations de ce qu'est une « mesure ». Ainsi le physicien Bernard d'Espagnat rejoint Kant d'une certaine façon puisqu'il considère comme ce dernier qu'il y a bien « quelque chose » au-delà de nos sens et de nos appareils de mesure mais que ce quelque chose ne peut être séparé en éléments distincts et qu'il n'est pas descriptible en termes de temps et d'espace. Sans observateur, il n'y aurait donc pas de particules élémentaires, d'atomes, de molécules et d'objets ! Et ce que nous « percevons » – la réalité « pour nous » – serait lié à la confrontation de la réalité « en soi » et de notre conscience.

Cette conception d'un rôle de la conscience pour faire « émerger » la réalité telle que nous la percevons heurte violemment les biologistes pour lesquels la pensée est en quelque sorte « sécrétée » par le cerveau, « comme le foie sécrète la bile » pour reprendre une formulation classique. Et, selon cette dernière conception, la pensée ne pourrait naître en effet de quelque chose qu'elle contribue à rendre actuel. Mais, comme nous l'avons dit en introduction, la physique des biologistes est une physique qui pour les physiciens contemporains constitue un cas limite. Les biologistes quant à eux sont toujours persuadés – en tout cas c'est sur ce paradigme que reposent les grands courants de recherche actuels – que le découpage du Vivant en ses éléments moléculaires reste un but non seulement désirable mais optimal pour agir en retour. Et effectivement on ne peut dénier une efficacité, souvent spectaculaire, à cette démarche. Mais est-ce parce que l'on agit (plus ou moins) efficacement sur la matière vivante que cela prouve que l'on a « compris » l'objet que l'on étudie ?

Rendre compte de façon simple et accessible des développements de la physique quantique depuis ses débuts n'est pas une démarche aisée surtout pour qui ne peut se prévaloir de la légitimité du physicien. Incarner à soi seul les

Bouvard et Pécuchet de la physique quantique est un risque qui doit être assumé. Nous proposons donc au lecteur novice qui souhaiterait aborder ce domaine de consulter les ouvrages et documents de vulgarisation indiqués en note.¹ Il ne saurait être question ici de faire l'histoire de la question et de décrire tous les aspects de cette discipline. Nous nous bornerons à décrire à larges traits les principes essentiels régissant cette « nouvelle » physique, vieille maintenant de près de cent ans, et qui a connu un tournant capital dans les années 70–80.

Nous proposons de commencer par la description d'expériences classiques de physique quantique permettant d'explicitier les notions qui seront nécessaires à la poursuite de la lecture et en particulier à la compréhension de ce que sont les *corrélations non locales* et leurs conséquences.

Qu'est-ce que la physique quantique ?

Le propos initial de la physique quantique était de décrire la matière à l'échelle des atomes et de leurs constituants. Rapidement des difficultés surgirent. Ainsi le modèle « planétaire » de l'atome échouait à expliquer pourquoi les électrons qui gravitent autour du noyau ne tombent pas rapidement sur ce dernier. De même la lumière était considérée comme un rayonnement, mais des expériences indiquaient qu'elle pouvait se comporter également comme un ensemble de petites « billes », les photons. Alors, était-elle un rayonnement ? Des particules ? Les deux à la fois ? Et dans ce dernier cas comment pouvait-on se « représenter » un rayon de lumière ?

Les ouvrages de vulgarisation ou les manuels scolaires présentent implicitement les atomes et les molécules comme de minuscules billes qui s'agitent selon les lois classiques de la mécanique newtonienne. Cette image est

¹ Michel Bitbol. L'aveuglante proximité du réel. *Flammarion*, 1998 ; Michel Bitbol. Physique et philosophie de l'esprit. *Flammarion*, 2000 ; Michel Bitbol & Sandra Laugier (eds.) Physique et réalité (Un débat avec B. d'Espagnat). *Editions Frontières-Diderot*, 1997 ; Colin Bruce. Les lapins de M. Schrödinger ou comment se multiplient les univers quantiques. *Le Pommier*, 2004 ; Bernard d'Espagnat. Traité de physique et de philosophie. *Fayard*, 2002 ; Bernard d'Espagnat et Étienne Klein. Regards sur la matière : des quanta et des choses. *Fayard*, 1993 ; Etienne Klein. Petit voyage dans le monde des quanta. *Flammarion*, 2004 ; Feynman, Leighton et Sands. Le cours de physique de Feynman. Tome 3. Mécanique quantique. *Interéditions*, 1979 ; Roland Omnès. Les racines quantiques du monde classique. *Pour la Science*, décembre 2001, p. 38 ; Roland Omnès. Une nouvelle interprétation de la mécanique quantique. *La Recherche*, octobre 1995, p. 50 ; Sven Ortoli et Jean-Pierre Pharabod. Le cantique des quantiques : le monde existe-t-il ? *La Découverte*, 1984 ; Hervé Zwirn. Les limites de la connaissance. *Odile Jacob*, 2000 ; Le chat de Schrödinger. *Sciences et Avenir* (hors-série), oct-nov. 2006.

non seulement simplificatrice mais surtout elle est fautive. Elle doit donc être oubliée – ou du moins être mise à distance – même si elle conserve une valeur heuristique certaine. La physique quantique nous fait en effet pénétrer dans un monde où le sens commun est choqué à chaque instant. La réalité n’y est plus décrite comme quelque chose de tangible qui existerait en dehors de nous mais formée d’entités évanescences qui ont une certaine probabilité de réalisation si on les observe. L’acte d’observation y devient en effet un acte créatif en ce sens qu’avant l’observation (ou la mesure), la « valeur » du paramètre à mesurer n’est pas « déjà là ». Insistons dès maintenant sur le fait que cette incertitude qu’introduit la physique quantique se rapporte à un indéterminisme fondamental. Il ne s’agit pas d’une insuffisance de nos moyens de mesure (ou de nos théories). On pourrait dire que la Nature elle-même ne sait pas avant la mesure quelle est la valeur du paramètre à mesurer pour la simple raison que cette valeur n’est pas fixée. Pour le physicien quantique orthodoxe, attribuer une « valeur » à un « paramètre » en dehors de tout acte d’observation ou de mesure n’a tout simplement aucun sens. Une « valeur » n’existe que par rapport à l’acte de la mesure qui implique non seulement un appareil mais également un observateur qui *prend connaissance* du résultat.

On pourrait penser – la physique quantique s’adressant au monde microscopique – qu’il n’est pas étonnant que les lois physiques qu’elle décrit soient différentes de celles de notre monde macroscopique. On pourrait supposer néanmoins que ce dernier continuerait à se comporter comme nous en avons l’habitude avec sa loi de causalité et son déterminisme classique. Toutefois l’ambition de la physique quantique est de décrire non seulement le monde microscopique des atomes, de la lumière et des particules élémentaires mais également le monde macroscopique qui nous est familier. Les objets qui nous entourent et nous-mêmes étant constitués d’atomes, nous sommes donc *a priori* également soumis aux lois de la physique quantique. Et précisément les pères de la physique quantique se sont rapidement heurtés à des paradoxes lorsqu’ils ont tenté de tirer toutes les conséquences de la nouvelle physique pour comprendre notre monde macroscopique. Des débats intenses à propos d’« expériences de pensée » eurent lieu. Et nous verrons comment une théorie développée à la fin du 20^{ème} siècle, la théorie de la décohérence, se propose d’expliquer le passage de l’étrangeté de la physique quantique au niveau microscopique à la réalité tangible de notre monde macroscopique. Pourtant nous verrons également que même à notre échelle nous n’en avons pas fini avec l’étrangeté quantique.

Les conséquences de ces découvertes réalisées tout au long du 20^{ème} siècle restent toutefois mal diffusées dans le grand public et même parmi les scientifiques non physiciens. C’est d’autant plus paradoxal que les applications

de la physique quantique telles que le laser ou encore le transistor (et par voie de conséquence les ordinateurs) se sont répandues avec le succès que l'on sait. On pourrait imputer les raisons de cette méconnaissance aux mathématiques sous-tendant ces théories qui sont effectivement d'un abord difficile. C'est certainement une raison importante. Pourtant les concepts issus de la relativité restreinte n'étaient pas non plus d'un accès aisé et étaient également choquantes pour le sens commun car ils remettaient en cause l'idée d'un temps s'écoulant de la même façon pour tous et partout. Mais peut-être la raison réside-t-elle dans le caractère proprement révolutionnaire des conséquences des équations de la physique quantique dès lors que l'on essaye de les « comprendre » et d'en tirer toutes les conséquences.¹ Et si l'ensemble des physiciens s'accordent sur les équations de la physique quantique, leurs interprétations les divisent (ceux du moins que les questions « philosophiques » intéressent). Différentes interprétations ont ainsi vu le jour. Certaines font jouer un rôle capital à l'observateur et à la « conscience » pour « créer » la réalité, d'autres postulent l'idée de différentes versions de la réalité existant simultanément.

En fait ces différentes interprétations n'apparaissent être qu'une question de préférences et de goûts personnels car elles sont bien évidemment toutes en accord avec les différents postulats de la physique quantique qui sont maintenant solidement établis. En particulier nous verrons que notre appartenance à un monde « non local » est maintenant établie par l'expérimentation. Si une nouvelle théorie venait à remplacer la physique quantique, elle devrait intégrer cette donnée fondamentale qui a pris son indépendance vis-à-vis de la théorie qui est à son origine. Nous avons donc le choix : nous pouvons choisir l'interprétation qui nous convient le mieux ; le seul problème est que nous sommes condamnés à ne pouvoir choisir qu'entre l'étrange et le bizarre.

L'expérience des fentes de Young

L'expérience des fentes de Young est à la fois la plus simple et la plus riche des expériences de la nouvelle physique. Cette expérience dont le physicien R. Feynman disait qu'elle recélait toute l'étrangeté de la physique quantique, va nous permettre de toucher du doigt ce qui fonde cette remarque.

Nous connaissons tous cette expérience, au moins dans sa version du 18^{ème} siècle telle que Young l'avait décrite initialement. Elle avait permis à ce dernier de démontrer le caractère ondulatoire de la lumière.

¹ On dit parfois que plus on étudie la relativité restreinte et plus on la comprend, mais qu'en revanche plus on étudie la physique quantique et moins on la comprend.

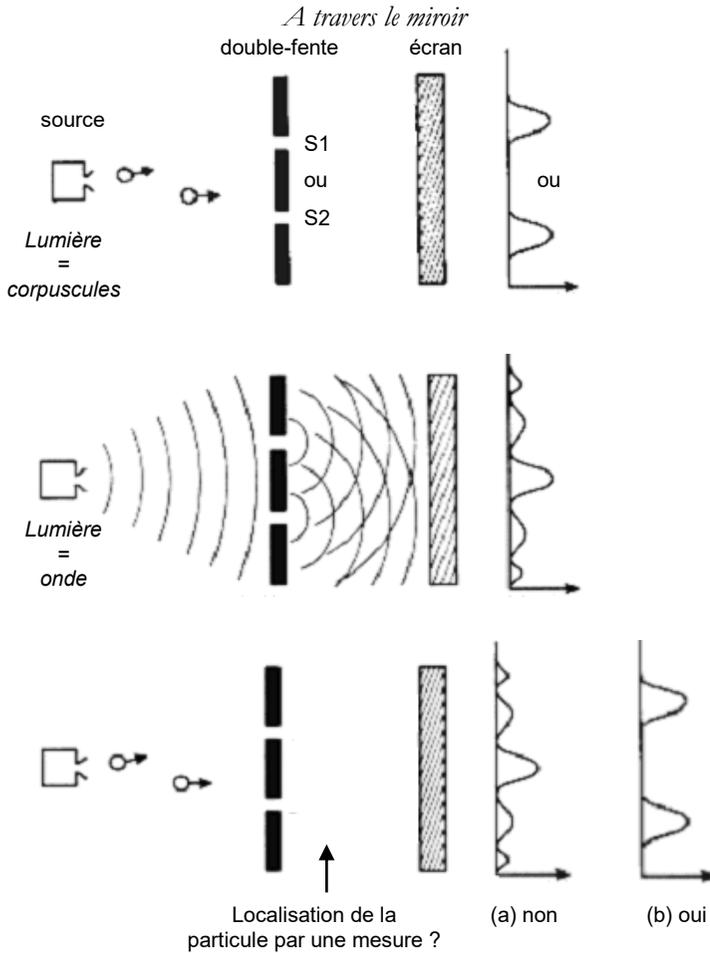


Figure 14. L'expérience des fentes de Young. Une source de lumière émet des photons à travers deux fentes parallèles très proches. Si on bouche l'une des fentes, on observe une tâche lumineuse en face de la fente restée ouverte. Les photons paraissent se comporter comme des corpuscules dont on peut déterminer l'impact su l'écran. En revanche si on laisse les deux fentes ouvertes on observe non pas deux taches lumineuses mais des raies alternativement lumineuses et sombres : il y a eu interférence (ce qui est caractéristique d'une onde). Si on fait en sorte que les photons soient émis *l'un après l'autre*, une figure d'interférence se dessine également comme si chaque photon était passé *par les deux fentes* à la fois et *interférait avec lui-même* (a). Si on cherche à connaître par un moyen physique quelconque *par quel chemin* est passé le photon, alors les figures d'interférences disparaissent et les photons se comportent comme des corpuscules (b). L'expérience peut être également réalisée avec d'autres particules telles que des électrons (Figure 15).

Dans cette expérience, une source lumineuse S issue d'une fine fente éclaire une surface percée de deux autres fines fentes parallèles $S1$ et $S2$ très proches l'une de l'autre (Figure 14).

Le but de l'expérience consiste à observer sur un écran les taches lumineuses formées par la lumière issue de ces deux fentes dans différentes conditions expérimentales. Imaginons dans un premier temps les conséquences du lancer de petites billes à l'aide d'un dispositif similaire à celui des fentes de Young (nous adaptons bien entendu la largeur des fentes au diamètre des billes). Nous supposons que les projectiles qui ont traversé les fentes laissent une trace de leur impact sur l'écran de détection. Suite à la projection des billes en direction de la double fente à l'aide d'un propulseur, nous constatons que les impacts des billes qui ont traversé les fentes sont plus fréquents sur les zones de l'écran qui font face à $S1$ et $S2$. Ceci n'a rien pour nous étonner.

Revenons maintenant au dispositif classique des fentes de Young et éclairons les fentes par un fin rayon lumineux monochromatique. Dans un premier temps nous bouchons $S1$ et nous constatons comme nous pouvions nous y attendre que la lumière diffusée par $S2$ forme une tache lumineuse sur l'écran comme c'était le cas avec les billes (Figure 14 ; haut). Nous faisons bien entendu une constatation similaire en inversant les rôles de $S1$ et $S2$. En revanche si nous laissons ouvertes les deux fentes simultanément nous observons un phénomène tout à fait intéressant : une alternance de raies sombres et claires sur l'écran de détection (Figure 14 ; milieu). On dit alors que les rayons lumineux ont *interféré* et c'est un argument en faveur de la nature ondulatoire de la lumière.

On obtient alors un résultat étonnant : des figures d'interférences sont observées à nouveau. Même envoyés individuellement en direction des deux fentes, les photons persistent dans leur comportement ondulatoire ! On aurait pu penser en effet que lorsque les photons étaient émis en grandes quantités, les figures d'interférences résulteraient d'interactions entre photons et que leur émission individuelle conduirait à des impacts uniquement en face des fentes (de façon similaire à ce qui se produisait ci-dessus avec les petites billes). Or ici tout se passe comme si chaque particule *interférait avec elle-même*, comme-ci chaque particule passait par *les deux fentes à la fois*. Cette expérience a été également réalisée avec d'autres particules telles que les électrons ou les neutrons généralisant ainsi la dualité onde-particule (Figure 15).

Mais le plus étonnant est à venir. Reprenons le dispositif précédent où les particules sont émises l'une après l'autre. Nous ajoutons un système qui permet de « voir » par quelle fente passe la particule. Nous ne faisons que regarder passer la particule en la perturbant le moins possible. Nous constatons alors que

les figures d'interférence disparaissent et nous obtenons les mêmes figures que pour les petites billes ! (Figure 14 ; bas).

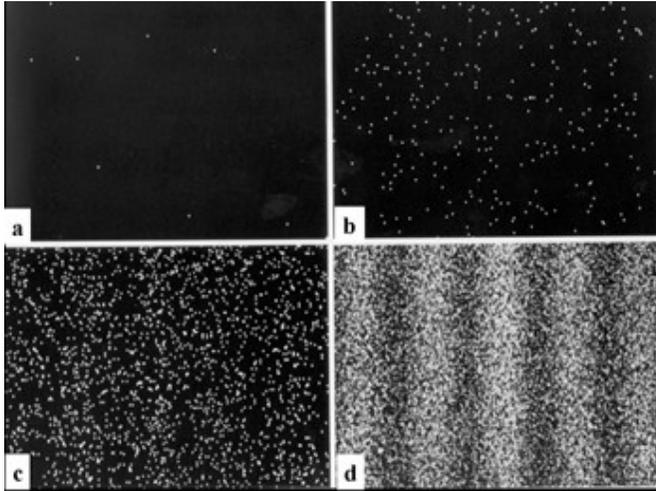


Figure 15. Cette série de photographies est le résultat de l'expérience de la double fente réalisée non pas avec des photons mais avec des électrons. Chaque point clair correspond à l'impact d'un électron sur un écran (expérience réalisée par Akira Tonomura *et al*). Les figures d'interférences deviennent d'autant plus évidentes que les électrons s'accumulent : (a) 8 électrons ; (b) 270 électrons ; (c) 2000 électrons ; (d) 60000 électrons. Les figures d'interférences suggèrent que *chaque électron interfère avec lui-même*. Tout se passe comme si l'électron (pourtant visualisé ici sous forme de *corpuscule* par son impact) était passé *par les deux fentes à la fois*.

Par conséquent, si nous cherchons à déterminer le chemin suivi par la particule, nous constatons qu'elle passe bien par une seule fente comme le ferait une bille. Elle est alors *localisée*. En revanche si nous ne cherchons pas à savoir quel chemin a été suivi entre la source et l'impact sur l'écran alors tout se passe comme si la particule empruntait *les deux chemins à la fois*, les figures d'interférence étant le témoin de ce comportement étrange. Nous retrouvons ici la dualité onde-corpuscule : si nous *ignorons* le chemin suivi par les photons, la lumière se comporte alors comme *une onde occupant tout l'espace* ; si nous cherchons à *connaître* ce chemin grâce à un moyen physique quelconque, alors la lumière se comporte comme un ensemble de *particules localisées dans l'espace*. C'est donc le *dispositif expérimental* qui est responsable du fait que la lumière nous apparaît soit comme une onde, soit comme un ensemble de particules.

Les principes de base de la physique quantique

Nous venons de faire connaissance avec certaines des « bizarreries » du monde quantique. Avant d'aller plus loin et envisager quelles nouvelles notions sont introduites par la physique quantique, faisons un rapide état des lieux de la physique à la fin du 19^{ème} siècle, avant l'avènement de la physique moderne.

En effet, à la fin du 19^{ème} siècle, deux piliers expliquent la totalité du monde physique. Ce sont d'une part la mécanique newtonienne et d'autre part l'électromagnétisme. La thermodynamique quant à elle se réduit en dernière analyse à la description statistique de l'agitation des atomes et des molécules selon les lois newtoniennes. Cette physique « classique » repose sur un certain nombre de présupposés implicites. En particulier les physiciens « classiques » considèrent de l'ordre de l'évidence que les équations de la physique décrivent le monde « en soi » et qu'il existe une relation directe entre les théories et le monde que ces dernières décrivent. Ainsi toute valeur prédite par la théorie doit trouver sa contrepartie dans la « réalité », *indépendamment de toute mesure*. De plus, pour la physique classique, tout effet a une cause locale et les objets peuvent être décrits séparément. Enfin, le fait d'éloigner les objets les uns des autres diminue leurs interactions. Ces notions ont pour conséquence une vision déterministe du monde puisque sa connaissance précise à un instant donné devrait permettre à un être omniscient la prédiction de l'état du monde à un instant futur. L'objectivité de la physique classique est également une autre de ses caractéristiques puisque l'observateur et l'objet étudié sont strictement séparés.

Avec la relativité restreinte d'Einstein, la physique classique atteint son apogée au début du 20^{ème} siècle. Les notions d'espace et de temps sont alors remises en cause afin d'expliquer les phénomènes physiques aux vitesses proches de la lumière. Mais Einstein n'en reste pas là. Ayant mis le point final de la physique dite classique, il participe à la construction des deux piliers de la physique du 20^{ème} siècle : d'une part, la relativité générale qui est une théorie de la gravitation et, d'autre part, la physique quantique (appelée théorie des quanta à son origine). Bien qu'il ait puissamment contribué à sa genèse, Einstein percevra rapidement en quoi la physique quantique est un bouleversement par rapport aux conceptions initiales de la physique, en particulier avec la remise en cause de l'idée de *localité* et par conséquent de l'idée de *causalité* (cf. encadré en fin de chapitre). Surtout l'idée que les équations de la physique quantique ne décrivent pas une « réalité en soi » le heurtera au plus haut point et il suggérera une célèbre expérience de pensée (l'expérience EPR sur laquelle nous reviendrons) destinée à démontrer qu'en dépit de ses succès expérimentaux la théorie était incomplète. En effet, Einstein reste profondément un physicien « classique » et il ne pourra admettre que toute mesure physique ne puisse

trouver sa contrepartie dans le monde « en soi » indépendamment de l'existence d'un observateur.

Parmi les principes de base de la physique quantique, la *dualité onde-corpuscule* en est un des plus fameux. Comme nous l'avons vu avec l'expérience des fentes de Young, la lumière peut *selon les conditions expérimentales* nous apparaître comme une onde ou comme des corpuscules (photons). Qu'est-elle *en réalité* ? C'est ici qu'il nous faut abandonner nos anciens réflexes et cadres de pensée. Nous devons nous faire à l'idée que la lumière nous apparaît soit comme une onde soit comme une particule mais qu'en réalité elle est les deux à la fois ou plus exactement qu'elle n'est ni l'une ni l'autre. Son apparence soit sous forme d'onde, soit sous forme de particule dépend des conditions d'observation. Il en est de même pour toutes les autres particules élémentaires. C'est peut-être l'aspect le plus déstabilisant et le plus incompréhensible – au sens littéral – de la « logique » de la mécanique quantique. En effet, cette nouvelle logique du monde physique va jusqu'à remettre en cause le principe du tiers exclus auquel nous faisons référence en permanence sans en être conscient tant il est ancré dans nos neurones : une chose et son contraire ne peuvent être présentes ensemble. Et pourtant, pour la physique quantique, « A » et « non A » peuvent exister simultanément ; dans le monde quantique, une porte peut être ouverte *et* fermée. Ainsi une particule peut être « présente » à deux endroits (ou plus) à la fois ; c'est le *principe de superposition*.

Le *principe d'incertitude* (ou d'indétermination) *d'Heisenberg* sonna la fin d'une certaine vision de la science, réductionniste et déterministe. Ainsi, selon ce principe, on ne peut connaître simultanément la position et la vitesse d'une particule avec une précision extrême. Plus on affine la mesure sur sa vitesse et plus on s'interdit de connaître sa position avec précision. On peut simplement prédire la position de la particule avec une *probabilité de présence*. Il faut bien comprendre que l'existence de ce principe n'est pas liée à un défaut de précision des mesures physiques ou bien parce que quelque nous serait caché mais bien à une indétermination fondamentale qui est directement liée à l'acte de mesurer. En effet, vitesse et position n'ont pas de réalité intrinsèque en dehors d'une mesure car, selon la physique quantique, « mesurer » n'est pas un acte neutre. Toute *prise de connaissance* concernant la réalité *participe à la réalité elle-même*. On ne peut donc pas se représenter la « réalité en soi » comme nous en avons l'habitude. Tout juste peut-on se représenter la *probabilité de survenue* d'un événement dans un univers où le hasard règne en maître.

La *non localité* ou *non séparabilité* est une autre caractéristique des phénomènes décrits par la physique quantique. En effet, les objets étudiés par la physique classique sont séparés et, de plus, chaque effet est la conséquence d'une cause *locale*. Cette cause locale peut être une interaction directe entre objets ou peut se

faire par l'intermédiaire d'un champ. En revanche, dans le cadre de la physique quantique, les objets peuvent apparaître comme *non séparés* du fait de l'existence de connexions *non locales*. Les objets du monde quantique peuvent se révéler interdépendants *quelle que soit la distance qui les sépare*. Dans le cas de particules dites *corrélées*, on ne peut plus décrire chacune des particules séparément et une mesure sur l'une a des conséquences *instantanées* sur l'autre *comme si les deux particules ne formaient qu'une seule entité*. Ces deux particules sont dites *intriquées*. Le principe de séparabilité comme celui de causalité qui lui est associé sont donc remis en cause dans l'univers quantique. La non localité semble aller à l'encontre de la relativité restreinte qui postule que la transmission d'information ne peut se faire à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Nous verrons toutefois que ceci n'est pas contradictoire, car ces corrélations ne peuvent être utilisées comme moyen de communiquer des informations.

La *contrafactualité* quantique défie également le sens commun. Dans certaines expériences, on montre que *des événements qui auraient pu se produire* mais qui *ne se sont pas produits* ont néanmoins une influence sur le résultat de l'expérience. Dans l'expérience des fentes de Young par exemple, l'existence d'une seconde fente modifie la place des impacts des photons, même si ceux-ci sont envoyés un par un. Tout se passe comme si le photon « connaissait » l'existence de l'autre fente. Nous verrons que ceci est en relation avec le terme d'interférence qui apparaît lorsqu'on calcule les probabilités quantiques des événements. Pour certains physiciens, la contrafactualité est une preuve en faveur du « multivers ». Selon cette interprétation de la physique quantique, toutes les valeurs possibles d'une mesure coexistent (dans des univers différents) et nous n'avons conscience que d'une seule des éventualités (voir chapitre suivant).

Ces nouvelles notions que nous avons décrites à grands traits firent bien évidemment l'objet de discussions. Elles font d'ailleurs toujours l'objet d'exégèses et nous verrons dans le chapitre suivant plusieurs « interprétations » des équations de la physique quantique, certaines étant pour le moins ébouriffantes.¹ Aussi certains physiciens qui ne parvenaient pas à admettre les conséquences de la physique quantique imaginèrent des « expériences de pensée » destinées à montrer (du moins c'est ce qu'ils espéraient) à quelles absurdités conduisait cette théorie si on la laissait en l'état. Ces physiciens

¹ A noter que ces notions sont nettement plus déroutantes pour le « bon sens » que l'aurait été une éventuelle « mémoire de l'eau ». Mais l'idée de cette dernière avait pris naissance dans le monde des biologistes et comme le fit remarquer J. Benveniste : « *Je ne savais pas alors que les physiciens qui touchent à l'infini ont droit au rêve et pas ces savants mous que sont les biologistes !* » (J. Benveniste. Le rêve interdit. *Le Monde*, 12 juillet 1989) (*ADM 1 Chapitre 14*).

pensaient que la physique quantique devait être modifiée pour aboutir à une version qui nous donnerait une vision du monde physique qui soit « compréhensible » et plus acceptable pour nos esprits. Jusqu'à présent toutefois, la physique quantique a toujours triomphé des épreuves et a toujours été confirmée par les expériences destinées à la mettre à l'épreuve. Quelques-unes des expériences de pensée ont conduit à de véritables expérimentations « en dur » qui ont confirmé l'étrangeté intrinsèque de la nouvelle physique. Il faut noter par ailleurs que de nombreux physiciens ou ingénieurs utilisent quotidiennement les équations de la physique quantique sans se poser de questions concernant leurs bases ontologiques et leurs conséquences « philosophiques ».

Certaines de ces expériences de pensée sont célèbres et il est difficile de ne pas les mentionner. Elles illustrent bien d'ailleurs les bizarreries auxquelles nous devons nous habituer si nous souhaitons avancer dans la compréhension du monde physique. Nous décrivons ainsi l'expérience du chat de Schrödinger et le paradoxe EPR.

L'inévitable chat d'un célèbre physicien

La description de l'expérience de pensée dite du « chat de Schrödinger » est un passage obligé de toute description de la réalité quantique. Cette expérience – qui couple la réalité du monde microscopique à celle de notre monde macroscopique – fut imaginée en 1935 et elle était destinée à l'origine à montrer que la description selon une conception orthodoxe de la physique quantique conduisait à des paradoxes. Avec cette expérience, Schrödinger souhaitait souligner les insuffisances de l'interprétation dite orthodoxe de la nouvelle physique, nommée également interprétation de Copenhague. Cette expérience pose également les bases de ce que l'on appelle le « problème de la mesure » sur lequel nous reviendrons par la suite.

Schrödinger imagine donc l'expérience suivante. Un chat se trouve enfermé dans une enceinte contenant un atome radioactif qui – dans le temps imparti à l'expérience – a une chance sur deux de se désintégrer et d'émettre une particule. Un compteur de radioactivité qui permet de mesurer l'émission de cette particule est situé dans l'enceinte. Lorsque la particule est détectée, le dispositif actionne un marteau qui brise une fiole contenant un poison volatil mortel pour le chat.

Selon le formalisme de la physique quantique, en dehors d'une mesure, l'atome est dans un état qui est la somme (plus exactement c'est une somme vectorielle ; cf. section suivante) de l'état désintégré et de l'état non désintégré : la particule radioactive est alors dans un état que l'on dit *superposé*. Le dispositif lui-même est alors dans un état superposé : déclenché *et* non déclenché. Par

conséquent en conclut Schrödinger, tant que quelqu'un ne regarde pas dans quel état est le chat, ce dernier est dans un état superposé : vivant *et* mort.¹

Pour simplifier, on considère dans cette expérience que le chat n'a pas de conscience et qu'il ne peut donc pas être considéré comme un « observateur ». Néanmoins le physicien Wigner imagina précisément de faire intervenir dans cette expérience de pensée deux êtres dont l'état de conscience pouvait être tenu pour certain : lui-même et l'un de ses amis.

L'ami de Wigner

Cette expérience de pensée est dans le prolongement de celle du chat de Schrödinger. En décrivant cette situation expérimentale, Wigner souhaitait pointer du doigt le rôle que semble jouer la prise de conscience du résultat par un observateur dans la description des phénomènes quantiques.

Wigner imagine qu'il enferme un de ses amis avec le chat de Schrödinger ! Bien entendu l'expérience est faite de façon à ce que le (cruel) dispositif de mise à mort aléatoire du chat ne risque pas d'atteindre l'ami lui-même... L'intérêt d'introduire cet ami est de permettre à Wigner de communiquer avec lui à la fin de l'expérience pour commenter les résultats et échanger leurs impressions. L'ami s'enferme donc dans la même pièce que le chat dont la vie est suspendue à une particule en état instable et il observe le déroulement de l'expérience. Rappelons que si la particule se désintègre durant le temps imparti, alors un dispositif détecte cette désintégration et déclenche un dispositif qui provoque la mort du chat ; si la particule ne se désintègre pas, alors le chat reste vivant.

Au moment de prendre connaissance de l'état du chat, du point de Wigner, le système formé par le chat et son ami est dans l'état superposé : « dispositif non déclenché » + « chat vivant » + « ami constatant que le chat est vivant » ou bien « dispositif déclenché » + « chat mort » + « ami constatant que le chat est mort ». A la fin de l'expérience, Wigner pénètre dans la pièce et effectivement c'est bien l'une des deux branches qu'il observe. Un problème se pose toutefois. Du point de vue de Wigner, c'est au moment où il prend connaissance du résultat de l'expérience qu'a lieu la « réduction de la fonction d'onde ». S'il interroge son ami, ce dernier lui dira qu'il a constaté que le chat était vivant (ou mort) bien avant que Wigner n'ouvre la porte et vienne s'enquérir du résultat. Du point de vue de l'ami, nous pouvons comprendre que ce dernier ne se soit jamais senti dans un état superposé. Mais ceci signifie également que pour l'ami,

¹ On dit fréquemment qu'un système quantique peut être dans plusieurs états à la fois. Il est plus correct de dire que le système est dans *un état quantique unique* mais que la mesure du système peut conduire à plusieurs résultats différents (chacun de ces résultats ayant sa propre probabilité).

la réduction de la fonction d'onde a eu lieu avant que Wigner prenne connaissance du résultat. Tout se passe comme si l'observation non seulement faisait émerger l'un des résultats possibles mais produisait également un passé cohérent avec l'observation présente.

Imaginons maintenant qu'à la place du chat et de l'ami, on place simplement un dispositif lumineux qui s'allume si la particule radioactive s'est désintégrée. Dans ce cas nous serions plus enclins à admettre que le dispositif expérimental est bien dans un état superposé avant que Wigner prenne connaissance du résultat. La différence avec la situation précédente est que dans ce cas nous avons affaire à un dispositif inerte non conscient. C'est ce point que Wigner souhaitait mettre en évidence. La conscience semble bien jouer un rôle particulier. La chaîne de causalité atome désintégré (ou non) → dispositif déclenché (ou non) → chat mort (ou non) → ami observant le chat mort (ou non) semble s'arrêter là où une conscience observe le résultat et, d'une certaine façon, résout la superposition en l'une des branches possibles de la réalité.

Les pérégrinations d'un chat dans l'espace de Hilbert

Les physiciens quantiques utilisent pour leurs calculs un espace particulier appelé espace de Hilbert. Il s'agit d'un espace vectoriel dont les dimensions ne sont pas limitées. Il peut par conséquent avoir un nombre de dimensions bien supérieur aux trois dimensions habituelles de l'espace euclidien que nous connaissons et dans lequel nous avons l'habitude d'inscrire nos actions quotidiennes. De plus l'espace de Hilbert est défini sur l'ensemble des nombres complexes. Inutile de dire qu'essayer de se représenter concrètement cet espace n'est guère aisé ! Pourtant, c'est dans ce dernier que les physiciens définissent des « vecteurs d'état » similaires aux vecteurs des espaces vectoriels habituels. L'état d'un paramètre (appelé « observable ») d'un système donné est représenté par un vecteur d'état noté $|x\rangle$ dont les « valeurs propres » constituent la liste des résultats possibles lors d'une mesure donnée.

Prenons un exemple. Supposons que l'on cherche à mesurer le spin d'un électron selon un axe donné.¹ Nous savons que sa valeur est soit positive, soit négative (avec la même probabilité). Nous représentons par conséquent l'état de l'électron (en ce qui concerne son spin) par la somme de deux vecteurs (les vecteurs peuvent en effet s'additionner) :

$$|\psi_E\rangle = a|+\rangle + b|-\rangle$$

¹ Le spin peut être assimilé en première approximation à la rotation de la particule sur elle-même. Nous pouvons l'imaginer comme un petit aimant dont un pôle pointe dans une direction et le pôle opposé pointe dans la direction opposée.

On dit alors que l'électron est dans un état *superposé* : les deux états spin positif *et* spin négatif sont tous les deux possibles. Nous devons bien comprendre que tout se passe comme si c'était l'opération de mesure qui « obligeait » l'électron à prendre une valeur définie : spin positif *ou* spin négatif. Le « basculement » vers l'état spin positif ou vers l'état spin négatif est appelé « réduction de la fonction d'onde » (ou encore « réduction du paquet d'onde »). Ce choix se fait au hasard : la probabilité de mesurer un spin positif est a^2 et la probabilité de mesurer un spin négatif est b^2 (avec $a^2 + b^2 = 1$).

Par ailleurs, dès lors que des états de deux objets sont observés ensemble (par exemple après une interaction, une mesure), on dit, selon le formalisme de la physique quantique, qu'ils sont *intriqués* (on dit aussi enchevêtrés ou entremêlés). Ainsi deux particules qui ont interagi sont dites intriquées car le résultat de la mesure de l'une est corrélé au résultat de la mesure de l'autre et ceci *quelle que soit la distance qui les sépare*. Tout se passe comme si ces deux particules ne formaient plus qu'une seule entité *non séparable*. De même, un appareil de mesure A qui interagit avec un objet quantique E conduit à une intrication de l'objet quantique et de l'appareil de mesure. On est alors conduit à considérer que l'appareil de mesure et l'objet mesuré ne sont pas indépendants et il faut considérer le système AE comme *un système unique non séparable*.

L'intrication de deux systèmes se représente de la façon suivante. Supposons l'état d'un premier système noté $|\psi_1\rangle$ dans l'espace de Hilbert et $|\psi_2\rangle$ l'état du deuxième système. Dans le formalisme de la physique quantique, un état d'intrication se représente par un *produit* des deux vecteurs (appelé produit tensoriel). L'état final des systèmes 1 et 2 se représente alors par :

$$|\psi_{1+2}\rangle = |\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$$

Si nous revenons au chat de Schrödinger voyons comment le « paradoxe » pourrait être représenté avec ce formalisme (très simplifié ici). Tout d'abord l'atome radioactif A est au début de l'expérience dans un état superposé. En effet il est dans l'état superposé « atome désintégré » ($A_{\text{dés.}}$) *et* « atome non désintégré » ($A_{\text{non dés.}}$). Ce que l'on note en représentation vectorielle :

$$|\psi_A\rangle = a|A_{\text{non dés.}}\rangle + b|A_{\text{dés.}}\rangle$$

De la même façon, le dispositif intermédiaire S destiné à libérer le poison volatil est dans un état $D_{\text{décl.}}$ ou $D_{\text{non décl.}}$ selon que le système a été ou non déclenché par la détection de la particule émise du fait de la désintégration de l'atome. On dit que le dispositif est « intriqué » avec l'électron. Le chat lui-même est dans l'état mort (C_{mort}) ou vivant (C_{vivant}) selon qu'il a inhalé ou non le

poison. Selon le formalisme quantique, l'état de ce grand système est représenté par le vecteur suivant :

$$|\psi_{ADC}\rangle = a|C_{vivant}\rangle|D_{non\ décl.}\rangle|A_{non\ dés.}\rangle + b|C_{mort}\rangle|D_{décl.}\rangle|A_{dés.}\rangle$$

La fonction d'onde qui représente ce grand système dans l'espace de Hilbert est donc la superposition de l'état 1 (atome non désintégré, dispositif non déclenché, chat vivant) *et* de l'état 2 (atome désintégré, dispositif déclenché, chat mort). On peut y ajouter un observateur également dans l'état superposé ayant observé le chat mort *et* ayant observé le chat vivant. Ce déplacement de l'étrangeté du monde microscopique vers le monde macroscopique est donc le propos du paradoxe du chat de Schrödinger qui plus de 70 ans après son « invention » continue de susciter des discussions passionnées.

L'expérience EPR

L'expérience EPR (souvent associée à l'idée de « paradoxe ») est une expérience de pensée qui est centrale dans la genèse des idées de la physique quantique. Imaginée par Einstein et deux de ses élèves Podolsky et Rosen (d'où l'acronyme EPR), elle avait pour but de montrer que la physique quantique était au mieux incomplète et au pire erronée.



Figure 16. L'expérience de pensée EPR. Deux particules ont interagi et s'éloignent l'une de l'autre. Pour la physique quantique elles constituent un « tout indivisible »¹ sans qu'il soit nécessaire de faire appel à des « variables cachées » pour expliquer les résultats d'éventuelles futures mesures.

Imaginons, disent les trois physiciens, que deux objets quantiques (particules) ayant interagi s'éloignent l'un de l'autre. Selon la physique quantique les deux particules sont décrites par une fonction d'onde unique qui traduit certaines lois de conservation. Supposons maintenant que l'on mesure la vitesse

¹ L'expression de « tout indivisible », bien que fréquemment trouvée sous la plume de physiciens, n'est toutefois pas très heureuse car elle oblige à considérer *deux* objets séparés comme *un seul* objet. Dans ce cas que devient la notion même d'objet qui implique une séparation avec le reste du monde ?

de l'une des particules et la position de l'autre. Or, du fait de ces lois de conservation, la connaissance de la vitesse de l'une implique la connaissance de la vitesse de l'autre, *sans la mesurer*; de même pour la position.¹ De plus, poursuivent les détracteurs de la physique quantique, si l'on peut admettre à la rigueur que la mesure fixe la valeur mesurée pour la première particule, on ne peut admettre que la valeur de la seconde soit alors *instantanément* fixée. La deuxième particule peut en effet se trouver à une distance astronomique de la première; or, la relativité restreinte s'oppose de façon catégorique à ce qu'une information voyage plus vite que la lumière. C'est déjà difficile à admettre, mais en fait l'opposition d'Einstein porte surtout sur notre conception de ce que doit être une théorie physique et sur ce qu'elle est censée décrire concernant ce que nous appelons la « réalité physique ». Le texte des trois physiciens définit donc les conditions minimales pour que « quelque chose » soit considéré comme appartenant à la réalité physique :

« Si, sans perturber en aucune manière l'état d'un système, on peut prédire avec certitude la valeur d'une quantité physique de ce système, alors il existe un élément de réalité correspondant à cette quantité physique ».

En d'autres termes, si une propriété physique d'un objet peut être connue *sans être observée*, alors cette propriété ne peut pas avoir été créée par l'observation. Et si elle n'a pas été créée par l'observation, c'est donc bien qu'elle existait en tant que réalité physique *avant* son observation. Or c'est bien ce qui se passe au cours de l'expérience EPR : nous pouvons connaître la vitesse de l'une des particules sans avoir eu besoin de la mesurer. C'est donc bien la preuve, selon Einstein et ses collaborateurs, que vitesse et position sont définies *avant la mesure*. Ils concluent qu'il existe des « *variables cachées* » dont la physique quantique ne rend pas compte ; cette théorie est donc incomplète.

La réponse de Bohr et des physiciens de l'École de Copenhague au « paradoxe » EPR fut en substance que l'on ne doit pas faire d'hypothèses sur l'état des particules (ou de tout système quantique en général) *en dehors d'une mesure* car nous n'avons pas de preuve que cet état « existe » d'une quelconque façon. Ce que nous attribuons en propre à l'objet mesuré (la vitesse ou la position) est en fait une propriété de *l'ensemble* que forment l'objet lui-même et l'appareil de mesure. Nous devons – toujours selon ces physiciens – nous en tenir aux équations de la physique qui ne décrivent pas la réalité telle qu'elle est mais décrivent la *connaissance* que nous avons de cette dernière. Les équations nous permettent de faire des *prédictions* et c'est tout ce que l'on doit demander à

¹ De même si deux électrons interagissent : quand ils se rapprochent, leurs spins pointent dans des directions opposées quand ils s'éloignent à nouveau, comme le feraient de petits aimants dont les pôles nord et sud s'attirent.

la physique. En demander plus ce serait faire – au sens propre – de la métaphysique et sortir du rôle imparti à la science. Pour résumer, on pourrait dire que selon Bohr il n’y a pas de réalité en dehors d’une mesure ou plus exactement qu’il est vain de chercher à s’interroger sur la nature d’un paramètre en dehors d’une mesure. Quant à l’argument de l’information qui voyage plus vite que la lumière, Bohr fit remarquer que l’on ne pouvait transmettre d’information *utile* selon ce procédé car les valeurs mesurées sont aléatoires (même si elles sont corrélées) et on ne peut agir sur ce processus.

Mais, pour Einstein, cette façon de considérer la physique est une vision insatisfaisante de la science qui, selon lui, se doit de décrire la réalité *telle qu’elle est*. On doit pouvoir attribuer aux différents paramètres d’un système des valeurs *indépendamment des mesures* qui ont permis de les déterminer. Si dans cette expérience de pensée nous parvenons à une absurdité, c’est que la théorie quantique est incomplète et qu’il lui manque des variables (qui sont « cachées »). On peut imaginer en effet que les particules « emportent » l’information concernant leur direction ou la valeur de leur spin, par exemple. Au moment où la mesure est faite l’appareil de mesure tiendrait alors compte de ces « variables cachées » et le choix de la valeur mesurée se ferait en conformité avec cette information. Pour les tenants de l’interprétation de Copenhague, la théorie quantique doit être considérée comme complète et il est inutile de la compliquer avec des variables supplémentaires uniquement pour se conformer à l’idée *a priori* que nous nous faisons de la réalité. C’est selon eux retomber à nouveau dans la métaphysique.

Pendant plusieurs décennies cette expérience resta au stade d’expérience de pensée. Il est en effet difficile de faire des mesures sur les deux particules corrélées d’une unique paire. Le plus souvent les physiciens travaillent sur des ensembles statistiques de particules. La question est donc restée sans espoir de réponse jusqu’en 1964 lorsque le physicien John Bell proposa une démarche qui suggérerait une possibilité de trancher le débat expérimentalement. Cette proposition peut se résumer dans une inégalité. Sans entrer dans le détail, l’inégalité de Bell (dont il existe en fait plusieurs formulations) est fondée sur une propriété mathématique que doivent respecter les mesures d’une population de particules si on suppose vraie une théorie à variable cachée « à la Einstein » (i.e., une théorie tout à la fois réaliste et locale), à savoir que les particules emportent quelque part avec elles une information sur la propriété mesurée. Si comme le pensait Bohr, les lois de la physique quantique sont complètes, alors il n’existe pas de variables cachées et cette inégalité devrait être violée.

La question est maintenant tranchée expérimentalement depuis 1982 avec l’expérience d’Alain Aspect de l’Institut d’optique d’Orsay. Cette expérience a été la première à montrer de façon convaincante que l’inégalité de Bell était

violée. Par conséquent, les conceptions de l'École de Copenhague l'emportaient sur la vision d'un monde « à la Einstein », c'est-à-dire reposant sur des théories « à variables cachées ». De plus, le résultat expérimental obtenu dans ces expériences était celui que prédisait la théorie quantique avec une précision très grande. Par conséquent non seulement la non localité était révélée par ces expériences mais en plus la mécanique quantique en sortait renforcée.

Le résultat des expériences d'Aspect (couplé aux travaux de John Bell) est peut-être le résultat scientifique le plus important du 20^{ème} siècle. Depuis l'expérience *princeps* de 1982, ce résultat a depuis été largement confirmé. De plus, si dans l'expérience initiale les mesures étaient réalisées sur des particules corrélées éloignées d'une douzaine de mètres, c'est maintenant sur des particules distantes de plusieurs kilomètres que les physiciens travaillent.

La controverse Bohr-Einstein prenait donc fin avec la victoire de Bohr. L'expérience avait tranché : il était inutile de faire appel à des variables cachées. Ce n'est donc plus une option philosophique parmi d'autres : nous savons maintenant que nous sommes plongés dans un *monde non local* (même si notre monde macroscopique nous *apparaît* local et déterministe).

Ces expériences qui mettaient fin aux questions sur l'expérience de pensée EPR n'étaient pas que théoriques. En effet, reprenant les principes de l'expérience d'Aspect, certains physiciens eurent l'idée de mettre à profit la superposition quantique pour l'utiliser dans des dispositifs permettant de transmettre des messages de façon cryptée. L'état superposé des particules pourrait également mener à la construction d'ordinateurs quantiques fondés sur une nouvelle logique. Mais ceci est une autre histoire. Voyons maintenant comment physiciens et philosophes interprètent les « paradoxes » de la physique quantique.



Localité et non localité en physique

Les « effets à distance » ont toujours été source de méfiance chez les scientifiques, en particulier chez les physiciens. Ceci doit probablement être lié au caractère en apparence « magique » d'un tel effet. Dès qu'un effet semblait s'expliquer par une action à distance, les physiciens n'ont eu de cesse de faire en sorte de montrer que l'action à distance n'était qu'une illusion et qu'en fait il s'agissait bien d'événements locaux qui étaient à l'œuvre.

C'est ainsi que Descartes imagina que l'attraction entre planètes était due à des tourbillons microscopiques qui s'influençaient de proche en proche (idée de localité) et transmettaient ainsi la « force gravitationnelle ». Le génie de Newton fut de ne pas faire d'hypothèse sur les mécanismes sous-jacents concernant l'étrange attraction des corps pesants (« *hypotheses non fingo* ») et d'en énoncer des lois uniquement descriptives. Descartes fut en un sens plus « physicien » que Newton dans son approche de la gravitation mais l'Histoire et la physique ont donné raison à ce dernier. Et ce fut Einstein qui compléta l'œuvre de Newton en proposant dans le cadre de la relativité générale que l'attraction gravitationnelle était liée à une courbure locale de l'espace. Il réconcilia ainsi la loi d'action à distance de Newton et l'aversion naturelle des physiciens pour tout ce qui pouvait évoquer une action « magique » à distance.

Dans le domaine de l'électromagnétisme, on assista à la même démarche. Qui n'a jamais été fasciné en effet par l'action mutuelle de petits aimants ou par des fragments de papier qui sautillent sous l'influence d'un corps électrisé ? Ici également cette apparente action à distance fut en définitive décrite par les physiciens comme la conséquence de l'action d'un champ permettant ici aussi d'écarter l'idée d'action à distance. Ce n'était plus en effet deux objets qui interagissaient à distance mais un champ qui se manifestait localement.

Dans le cas de la non localité quantique, toutefois, le problème est tout autre et l'apparente action à distance n'a pu être réduite par un quelconque artifice comme l'espéraient les tenants des théories à variables cachées locales. Einstein avait proposé l'expérience de pensée EPR pour précisément bien mettre en évidence ce qu'il ne pouvait admettre parlant à ce sujet de « *spooky action at a distance* ».

Certaines des interprétations de la physique quantique (Everett, Rovelli, QBism) permettent de s'affranchir de la notion de non localité ; il existe néanmoins un « prix à payer » (mondes multiples, relativisation de l'observation, anti-réalisme).

Une seule physique quantique... plusieurs interprétations...

Dans ce chapitre nous décrirons les solutions qui ont été proposées afin de résoudre les « paradoxes » qui sont la conséquence des équations de la physique quantique. Nous rappellerons tout d'abord les grandes interprétations de la physique quantique devenues maintenant classiques et soutenues par les principales écoles de pensées. Puis nous décrirons des conceptions plus récentes en reprenant la question de ce que l'on appelle le problème de la mesure.

Les positivistes (Bohr, Heisenberg, Hawking)

Selon les positivistes nous devons faire la distinction entre la réalité et *la connaissance que nous en avons*. Pour ces physiciens regroupés sous l'appellation d'École de Copenhague, l'équation de Schrödinger décrit ce que nous savons du système observé et non pas le système lui-même. Selon les positivistes, en effet, les lois de la physique quantique nous permettent de calculer la probabilité de survenue des événements mais pas d'appréhender la réalité en soi. Le but d'une théorie physique est de faire des prédictions et, si les mesures sont conformes aux prédictions, que demander de plus à une théorie physique ? Ne pas s'en contenter c'est – toujours selon les positivistes – faire de la métaphysique. Il est donc vain de parler d'une « réduction de la fonction d'onde » au moment de la mesure ou de se demander si le chat est mort ou vivant.

En particulier s'interroger sur l'état de santé du chat de Schrödinger est pour ces physiciens totalement oiseux puisque la superposition qui fait discussion est décrite dans l'espace de Hilbert, un espace dont le nombre de dimension est infini et qui ne saurait être une « représentation » directe du monde que nous connaissons. L'utilité de cet espace et du formalisme associé est de permettre de calculer la *probabilité de survenue* des différents états possibles du système. Ce n'est pas pour autant une *représentation de la réalité*. De même la fameuse « réduction de la fonction d'onde » lors du « choix » du résultat de la mesure ne serait pas « réelle » mais traduirait simplement *l'évolution de la connaissance* que nous avons sur un système physique.

L'influence de la conscience (Wigner, von Neuman)

Pour Wigner et d'autres physiciens tels que von Neuman, il est nécessaire d'intégrer l'observateur dans la description du système mesuré. En effet, lorsque le physicien regarde si le chat est mort ou vivant (avec l'ampoule cassée ou intacte), il entre lui aussi dans un état de superposition : « physicien ayant vu le chat mort » *et* « physicien ayant vu le chat vivant ». C'est le processus de « conscience » qui serait responsable de la réduction de la fonction d'onde et obligerait le système à passer dans l'état A ou B (ampoule cassée avec chat mort ou ampoule intacte avec chat vivant). Pourquoi le choix A ou le choix B est sélectionné n'est cependant pas explicité. Cette conception suppose un dualisme corps-esprit qui n'est pas évident *a priori* car il fait intervenir une entité – la conscience – que d'une part on peine à définir scientifiquement et qui d'autre part ne ferait pas partie du monde matériel mais pourrait néanmoins avoir une action sur lui.

Poussant la logique jusqu'au bout, on peut imaginer qu'aucun observateur ne prenne connaissance de l'état du chat à la fin de l'expérience. En revanche une photo serait prise automatiquement. Après plusieurs années, un observateur en prendrait connaissance. Si on suit la logique de Wigner, c'est à ce moment qu'aurait lieu la réduction de la fonction d'onde et que se déciderait l'état du chat.

Théorie des mondes multiples (Everett)

Cette théorie (appelée aussi théorie des états relatifs) prend sa source dans l'étonnement qu'avait le physicien Everett face à l'équation de Schrödinger. En effet, la fonction d'onde décrite par cette équation est déterministe et pourtant elle rend compte d'observations qui ne le sont pas. Pour utiliser cette équation dans leurs expériences, les physiciens ont en effet été obligés d'introduire le postulat de la réduction de la fonction d'onde. Ce dernier, plaqué artificiellement sur la théorie, permet en quelque sorte de « sauver les apparences », c'est-à-dire de réconcilier la théorie (déterministe) avec les observations (non déterministes). Se démarquant de cette approche qu'il juge inélégante, Everett a proposé une interprétation qui ne faisait pas appel à ce postulat. Pour cela, il affirma que c'est l'*observateur* qui est à l'origine de l'« anti-hasard » du fait de sa nature propre : parce qu'il a un corps matériel et parce qu'il est *cet* observateur et pas un autre.

Par conséquent, contrairement aux positivistes, les tenants de l'hypothèse des mondes multiples soutiennent que *la fonction d'onde décrit vraiment la réalité*. Simplement – si on peut dire – les différentes réalités possibles coexistent mais dans des *univers parallèles* qui ne communiquent pas entre eux. Il serait d'ailleurs plus exact de parler de *mondes divergents*.

Bien qu'elle soit pour le moins surprenante, cette interprétation a pour elle le fait qu'elle évacue la question de la « réduction de la fonction d'onde ». Elle apporte également des éléments expliquant la contrafactualité (*cf.* chapitre précédent). Ainsi selon cette interprétation lorsqu'on mesure le spin d'un électron, l'univers se divise en deux : dans l'un des univers, l'observateur mesure avec l'appareil un spin positif et dans l'autre univers un spin négatif. Il ne peut par conséquent y avoir superposition de deux états quantiques et, par conséquent, le chat de Schrödinger est vivant dans un univers et il est mort dans un autre.

Cette interprétation s'oppose donc à la vision positiviste qui, comme nous l'avons vu, considère que la fonction d'onde décrit la *connaissance* que nous avons de la réalité et non pas la réalité elle-même. Pour les tenants de la théorie des univers multiples, la fonction d'onde décrit bien la réalité. Plus exactement, elle décrit *toutes les réalités* qui existent simultanément.

En dépit de son caractère « incroyable », cette interprétation de la physique quantique remporte l'adhésion d'une majorité de physiciens (du moins parmi ceux qui se préoccupent des interprétations de la physique quantique). Cette théorie continue d'être explorée et raffinée par de nombreux physiciens tels que David Deutsch et Anton Zeilinger.¹ L'intérêt de cette interprétation est qu'elle respecte le formalisme quantique sans ajouter d'hypothèses supplémentaires et évite un certain nombre de paradoxes. Le prix à payer toutefois est la prolifération des « univers ». Il faut remarquer qu'adopter une autre conception qui fait l'économie des univers multiples n'est confortable qu'en apparence. En effet, nous avons vu avec le paradoxe EPR que deux particules qui ont interagi vont en quelque sorte s'interroger en permanence : lorsque l'une d'entre elles subit une mesure, l'autre en est « informée » de façon instantanée quelle que soit la distance. Or toute particule a subi depuis le big bang de multiples interactions. Il faut donc supposer, dès lors qu'une mesure est faite, que des échanges instantanés d'informations ont lieu entre les innombrables particules qui ont interagi dans le passé. Est-ce finalement plus confortable que postuler l'existence d'univers multiples ?²

¹ C. Bruce. Les lapins de M. Schrödinger ou comment se multiplient les univers quantiques. *Le Pommier* (2004).

² A ce propos le traducteur du livre de C. Bruce (*Les lapins de M. Schrödinger, op. cit.*) fait la remarque suivante (note page 248) : « Rappelons encore une fois que "monde multiple" est une métaphore quelque peu trompeuse pour désigner ce qui est un monde unique dans lequel différentes versions de la réalité se superposent (et interfèrent éventuellement) ».

Le problème de la mesure

Le problème de la mesure prend sa source dans les deux « outils » théoriques dont dispose la physique quantique pour décrire l'évolution d'un système. Le premier est l'équation de Schrödinger qui permet de prédire l'évolution d'un système *en dehors de toute mesure*. Cette équation est déterministe et elle décrit l'évolution *dans l'état de superposition* de l'ensemble « système observé-appareil de mesure ». Le deuxième outil est le « principe de réduction de la fonction d'onde » qui donne les règles pour prédire (avec une certaine probabilité) ce que l'on observera *si on mesure* un paramètre (une « observable ») de ce système.

Ces deux outils qui sont utilisés selon que l'on fait ou non une mesure supposent que l'on sache précisément ce qu'est une mesure. Or, selon certains physiciens, c'est loin d'être le cas. En effet, si on mesure un système S (une particule) à l'aide d'un appareil A , le principe de réduction de la fonction d'onde nous donne l'évolution de S après la mesure. Mais on peut aussi considérer le grand système constitué de S et de A . Ce système n'étant soumis à aucune mesure, son évolution est décrite par l'équation de Schrödinger. Par conséquent dans un cas on a un système S où le paramètre mesuré possède une valeur bien définie et dans l'autre cas le système considéré reste dans un état superposé sans valeur définie pour le paramètre. C'est ce que l'on appelle en physique quantique le *problème de la mesure*.

Plusieurs solutions, ont été proposées par différentes écoles soit pour tenter d'apporter une réponse à cette question, soit pour la rendre sans objet. Comme nous l'avons vu, pour les tenants de l'interprétation de Copenhague (Bohr, Heisenberg), il s'agit d'un faux problème car, selon ces derniers, nous n'avons pas à nous soucier de l'existence d'entités en dehors des mesures. Le but de la physique est de décrire la *connaissance* que nous avons sur les phénomènes et de donner des *règles opérationnelles* qui permettent de les décrire. Décrire la réalité *en soi* n'a tout simplement pas de sens ou du moins est en dehors des buts de la physique. On peut penser, comme Wigner ou von Neumann, que c'est l'état de conscience lui-même qui est responsable de la réduction de la fonction d'onde. La nature de cette interaction entre la conscience et la réalité reste toutefois peu claire et insatisfaisante. En particulier, cette prise de position conduit à penser que les objets n'ont aucune valeur définie (par exemple pas de position définie) si personne de les observe. Quant à la théorie des univers multiples, elle considère que la fonction d'onde n'est jamais réduite et reste dans l'état superposé. L'aspect classique du monde pour chaque observateur est expliqué par la scission de l'univers en plusieurs branches lors de la mesure.

La « solution » de la décohérence

Un début de réponse à ces différents paradoxes et difficultés conceptuelles est intervenu au cours des années 1970. Un physicien (Zeh) a fait remarquer que les différentes expériences de pensée proposées jusque-là faisaient implicitement référence à des systèmes isolés de leur environnement ce qui n'est jamais le cas en pratique.

Par conséquent il faut, selon Zeh, faire entrer la description de l'environnement physique (atmosphère, radiations électromagnétiques, agitation thermique, etc.) dans l'équation de Schrödinger et considérer que le système constitué du système S , de l'appareil A et de l'environnement E sont enchevêtrés. Comme on ne fait pas de mesure sur ce grand système, seule l'équation de Schrödinger peut être utilisée pour étudier son évolution. Mais dans la réalité, ce qui nous intéresse c'est l'appareil A et le système S , nous ne soucions pas de leur environnement. De plus cet environnement est constitué d'un tel nombre d'éléments que nous serions incapables de les prendre en compte.

Complétant cette remarque, un autre physicien, Zurek, a montré qu'à partir des équations du « grand système » SAE , on pouvait en déduire l'évolution du système SA et que l'on « retombait » en pratique sur les prédictions du principe de réduction de la fonction d'onde. Les deux principes d'évolution (réduction de la fonction d'onde et équation de Schrödinger) qui s'appliquent à un système physique selon que l'on fait une mesure ou non sont donc apparemment réconciliés. Le *principe de réduction de la fonction d'onde* devient dans cette perspective un *raccourci de calcul de l'équation de Schrödinger* dont la portée est plus générale et c'est cette dernière qui décrit *toute la réalité*.

C'est donc une avancée considérable. Selon certains physiciens (Hawkins par exemple), le problème de la mesure serait ainsi résolu et les travaux qui ont suivi l'intuition initiale de Zeh mettraient ainsi un point final à la question. C'est l'environnement qui *en mesurant en permanence* du fait des interactions innombrables (ondes électromagnétiques, collisions liées à l'agitation thermique, etc.) serait responsable de l'aspect classique de la réalité. Le calcul montre que l'état superposé est d'autant plus bref que l'on s'adresse à des systèmes constitués d'un grand nombre d'atomes. Le mécanisme responsable de la disparition de l'état superposé du fait de l'interaction du système avec l'environnement est nommé « décohérence ».

Les limites de la « solution » de la décohérence

Mais certains physiciens émettent un certain nombre de réserves sur la théorie de la décohérence. Non pas tant sur son exactitude qui est largement reconnue mais sur l'idée que la solution de la décohérence marquerait la fin du problème de la mesure.

En substance ces physiciens font remarquer que si les équations des deux principes d'évolution aboutissent à des résultats certes très voisins si l'on tient compte de l'environnement, ces derniers ne sont pas exactement équivalents. En particulier, notent certains auteurs, cette façon de procéder (c'est-à-dire déduire mathématiquement l'état du système SA à partir de celui du grand système SAE) donne une description *pour nous* de l'état de SA qui nous *apparaît* effectivement classique.

Néanmoins si nous avons des sens beaucoup plus développés (ou si nous disposons d'appareils de mesure infiniment plus étendus et subtils), alors nous prendrions la mesure (dans tous les sens du terme) de l'aspect enchevêtré de l'ensemble du grand système SAE . Nous constaterions en effet que l'enchevêtrement de SA s'est *distillé dans l'environnement*. En fait, si les objets nous apparaissent tels qu'ils sont (c'est-à-dire selon les lois de la physique classiques) c'est parce que nous sommes de fait incapables de réaliser certaines mesures.

C'est en substance la position de B. d'Espagnat qui considère que la fonction d'onde globale de l'univers reste enchevêtrée et qu'il n'y a par conséquent d'un point de vue externe jamais de réduction de la fonction d'onde. Selon ce physicien, le mécanisme de décohérence explique pourquoi nous ne percevons toutefois de cette réalité globale qu'une partie « classique ». Il considère que nous ne pouvons accéder à cette réalité mais que nous pouvons parfois entrevoir certains aspects de cette réalité enchevêtrée qu'il appelle le « réel voilé ».

Nous nous trouvons donc à nouveau face à un choix philosophique. D'un côté, nous pouvons considérer qu'il est vain de se poser des questions concernant des mesures que nous ne pouvons de tout façon pas réaliser et que par conséquent la décohérence clôt la question du problème de la mesure. Mais d'un autre côté, nous pouvons également considérer que la réalité est quantique et que la décohérence explique *pourquoi la réalité nous apparaît classique*.

Dans les deux cas, comme le fait remarquer H. Zwirn, la décohérence persiste à faire jouer un rôle à la conscience :

« Il est intéressant de remarquer que la décohérence continue à faire jouer à la conscience un rôle essentiel. Mais à la différence de celui que von Neumann ou Wigner voulaient lui attribuer, il ne s'agit plus d'action objective directe de la conscience sur la matière. *La conscience devient seulement l'aune à laquelle on mesure la réalité.* »¹

Et, toujours selon Zwirn, dans le premier cas, la conscience *définit ce qu'est la réalité* ; dans le deuxième cas, la conscience *prescrit la forme que revêt pour nous une réalité qui nous dépasse.*

D'autres interprétations...

Dans des chapitres ultérieurs nous décrivons deux autres interprétations de la physique quantique qui ont l'intérêt de prendre en compte l'observateur dans la description de la réalité. La première est l'interprétation relationnelle de la physique quantique de C. Rovelli. Dans cette interprétation, le résultat d'une mesure est toujours relatif à un observateur donné. Les *corrélations* entre observateur et observé deviennent alors les seuls éléments de réalité. La seconde interprétation est le bayésianisme quantique (ou QBism). Selon cette interprétation, le résultat d'une expérience est la perception qu'elle induit chez un observateur. Ce sont des idées issues de ces deux interprétations qui nous inspireront pour la modélisation des expériences de la « mémoire de l'eau ».



¹ H. Zwirn. 2002. Mécanique quantique et connaissance du réel. Académie des Sciences morales et politiques (<http://www.asmp.fr/travaux/gpw/philosc/rapport2/5-Zwirn.pdf>). C'est moi qui souligne.

L'« effondrement » de la fonction d'onde, selon L. Susskind¹

«La mécanique quantique comprend un ensemble de règles actualisant la fonction d'onde d'un système au fur et à mesure que le temps passe. Sous sa forme la plus générale, le système en question est tout – l'ensemble de l'univers observable, y compris l'observateur qui fait des observations. Dans la mesure où le terme d'observateur recouvre des bouts de matière distincts, la théorie peut donner lieu à des observations cohérentes. La fonction d'onde contient tout cela, d'une certaine façon qui s'avère cohérente si deux observateurs différents confrontent leurs résultats. [...]

S [l'observateur] peut ouvrir la boîte et regarder si le chat est mort ou vivant. Si le chat est vivant, S peut jeter la branche chat-mort de la fonction d'onde. Cette branche, un peu plus tard, aurait contenu toutes les informations sur le monde dans lequel on aurait tiré sur le chat, mais comme S a découvert le chat vivant, il n'a plus besoin de cette information. Il existe une expression désignant le procédé qui consiste à supprimer les branches non observées d'une fonction d'onde chaque fois qu'on fait une observation : on parle de *l'effondrement de la fonction d'onde*. C'est une astuce très commode qui permet au physicien de se concentrer uniquement sur ce qui, par la suite, mérite qu'on s'y intéresse. La branche chat-vivant, par exemple, possède des informations qui peuvent encore intéresser S. [...]

Mais l'effondrement de la fonction d'onde ne fait pas partie des mathématiques de la mécanique quantique. Cela n'a aucun rapport avec les règles mathématiques. Bohr a eu recours artificiellement à cette astuce afin de terminer l'expérience par une observation. Cette règle arbitraire a fait souffrir des générations de physiciens. Une bonne partie du problème vient de ce que S a limité son système à ce qui se trouve dans la boîte, mais qu'à la fin de l'expérience S entre lui-même en scène pour procéder à l'observation. *On s'accorde désormais sur le fait qu'une description cohérente doit nécessairement inclure S dans le système.* [...]

A la suite de Bohr, la plupart des physiciens ont eu tendance à considérer les branches comme des fictions mathématiques, à l'exception de la branche sur laquelle ils se trouvaient à la suite d'une observation. L'effondrement d'une fonction d'onde constitue un excellent stratagème pour se débarrasser de tous les bagages superflus, mais bon nombre de physiciens n'y voient qu'une intervention extérieure arbitraire de l'observateur – une procédure qui ne se fonde aucunement sur les mathématiques de la mécanique quantique. Pourquoi

¹ Leonard Susskind. *Le paysage cosmique* (2007). *Folio Essais*. Gallimard, pp. 482–6.

faudrait-il que les mathématiques suscitent toutes les autres branches si celles-ci doivent être systématiquement jetées aux orties ? [...]

La règle de Bohr n'est qu'une astuce pour se débarrasser de toutes les autres branches, qui tout en étant parfaitement réelles, n'auront aucun effet ultérieur sur l'observateur ».

Nos outils d'exploration des mondes possibles

- « Dites-moi, je vous prie, de quel côté faut-il me diriger ?
 – Cela dépend beaucoup de l'endroit où vous voulez aller, dit le Chat.
 – Cela m'est assez indifférent, dit Alice.
 – Alors peu importe de quel côté vous irez, dit le Chat.
 – Pourvu que j'arrive quelque part, ajouta Alice en explication.
 – Cela ne peut manquer, pourvu que vous marchiez assez longtemps. »

Lewis Carroll, *Alice au pays des merveilles*

Dans les chapitres qui suivent, nous allons décrire plusieurs expériences qui – faisant suite à l'expérience d'Aspect de 1982 – questionnent de façon plus approfondie les différentes interprétations de la physique quantique.

Rappelons tout d'abord que l'expérience d'Aspect de 1982 était destinée à évaluer les théories à *variables cachées locales*. Ces théories font l'hypothèse que chacun des objets quantiques appartenant à une paire dite corrélée emporte avec lui l'information (appelée une « variable cachée ») correspondant au résultat de la future mesure. Le principe de *localité* (ou principe de séparabilité) stipule que des objets distants ne peuvent avoir une influence directe l'un sur l'autre. Seul l'environnement immédiat d'un objet peut influencer ce dernier. Ce principe provient de la relativité restreinte.

A l'opposé, les théories à *variables cachées non locales* font l'hypothèse qu'un *signal instantané* (de nature inconnue) permet à un objet quantique appartenant à une paire corrélée d'être informé d'une mesure sur l'autre objet quantique de la paire.

Le plus souvent on conclut (et c'est ce que nous avons fait plus haut dans une première approche) que l'expérience d'Aspect démontre la non localité de notre monde physique. En fait les inégalités de Bell font l'hypothèse d'un *réalisme local*. Et, dans la description des inégalités de Bell, on oublie souvent de citer l'hypothèse de *réalisme*. Selon cette dernière hypothèse, les objets physiques ont des états qui existent indépendamment de toute observation et qui

préexistent donc à toute mesure. C'est sur cette idée que sont fondées nos interprétations de la vie quotidienne concernant les objets qui nous entourent. Et Einstein ne pouvant admettre les conséquences de la physique quantique, resta fidèle à la vision réaliste du monde telle qu'elle est véhiculée dans les idées de la physique classique.

Toutefois, comme nous l'avons vu, l'expérience d'Aspect a permis de réfuter les théories réalistes à variables cachées locales. Mais était-ce la localité qui était réfutée ? le réalisme ? les deux ?

D'autres expériences, réalisées dans les années 2000, ont participé à la remise en cause d'une vision réaliste du monde physique tout en renforçant la physique quantique. Nous les décrivons dans les chapitres qui suivent.

Les « comprendre » selon les conceptions de la physique classique est voué à l'échec. Nous utiliserons l'interprétation relationnelle de la physique classique que nous avons décrite plus haut.

Afin de rendre cette interprétation plus accessible et plus facile à manier, nous allons adopter quatre principes simples qui – si nous les adoptons – nous permettront de décrire avec une relative facilité ces expériences. Nous les commenterons dans le chapitre suivant.

Premier principe : *La Nature explore tous les chemins possibles*

C'est probablement le principe que nous aurons le plus de difficultés à admettre. Pour le moment contentons-nous de l'enregistrer ; quand nous le verrons à l'œuvre dans des exemples concrets, nous l'accepterons plus facilement.

Imaginons une source de lumière qui émet des photons – des grains de lumière – face à un écran percé de deux fentes A et B. Certains photons qui ne sont pas arrêtés par l'écran passent par les fentes. Puisque nous nous représentons habituellement le photon comme une petite bille, nous pouvons raisonnablement supposer que chacun de ces photons passe par l'une des deux fentes A *ou* B.

En fait, pour la physique quantique, chaque photon passe par *les deux fentes à la fois* : A *et* B. On dit alors que le photon est dans un *état superposé*.

Plus généralement, lorsque plusieurs chemins sont possibles, *la Nature les explore tous*. Nous pouvons nous représenter le résultat comme un buisson plus ou moins dense des différentes branches de chacune des *réalités possibles*.

Le physicien qui enregistre le chemin emprunté par le photon peut lui-même suivre deux chemins possibles selon qu'il enregistre que le photon est passé par le chemin A ou par le chemin B. La Nature explorant tous les chemins

possibles, *il est lui aussi dans un état superposé* : observateur ayant enregistré le chemin A et observateur ayant enregistré le chemin B.

Nous nous trouvons donc face à un problème : aucun observateur qu'il soit physicien ou simple quidam ne se perçoit dans un état superposé. D'où la nécessité d'un deuxième principe...

Deuxième principe : *Un observateur n'emprunte que l'un des chemins possibles*

Nous avons tellement l'habitude qu'une porte soit ouverte *ou* fermée que nous devrions pouvoir accepter ce principe sans douleur. Notons au passage que ce principe a les mêmes conséquences que la fameuse « réduction de la fonction d'onde ». Simplement nous considérons que cette « réduction » n'a de sens que relativement à un observateur donné (selon l'interprétation relationnelle).

Imaginons que l'on ajoute un dispositif physique (peu importe les détails) qui nous informe sur le chemin qu'a pris le photon. Comme pour la porte ouverte ou fermée, nous observerons ainsi que le photon est passé soit par la fente A, soit par la fente B. C'est l'équivalent du fameux chat de Schrödinger qui – mis en danger par un dispositif aléatoire – ne peut être à la fois mort et vivant.

On peut s'interroger sur la nécessité de définir un principe qui semble si évident. Souvenons-nous que nous avons terminé la description du premier principe avec un *nouvel objet* qui était une combinaison (« superposition ») des *deux futurs possibles* du photon et de son observateur.

Ce que nous dit de plus la physique quantique, c'est qu'au cours de l'enregistrement du chemin du photon, le choix parmi les différents chemins possibles se fait *au hasard*. Par exemple, si nous avons placé convenablement la source qui émet les photons, la probabilité sera de 1/2 pour le chemin A et 1/2 pour le chemin B ; nous pouvons également faire en sorte que 2/3 des photons passent par la fente A et 1/3 des photons passent par la fente B. Nous avons *le choix du dispositif expérimental*. En revanche nous ne pouvons rien faire pour influencer sur le chemin d'un photon donné. Nous devons savoir que ce *choix de la Nature est fondamentalement aléatoire* en ce sens que rien dans la théorie ne dit quel chemin sera suivi, non pas parce que la théorie est incomplète mais parce... c'est ainsi (nous y reviendrons néanmoins par la suite).

Du fait de ce principe, nous sommes assurés qu'en dépit de l'exploration par la Nature de tous les chemins possibles, un seul d'entre eux devient accessible à la conscience d'un observateur et *il devient alors sa réalité* (cf. l'encadré sur l'« effondrement » de la fonction d'onde à la fin du chapitre).

Troisième principe : *Le présent d'un observateur est cohérent avec son passé*

Ce principe peut paraître encore plus superflu que le précédent. Il stipule que si nous avons enregistré par un dispositif adéquat que le photon est passé par le chemin A, alors si nous prenons connaissance à un instant ultérieur d'un *enregistrement de cet événement*, nous constaterons que c'est toujours le chemin A qui figure dans l'enregistrement. Il correspond à l'accord « intrasubjectif » dont nous avons déjà parlé.

Pourquoi énoncer alors un principe aussi inutile en apparence ?

Repartons de la première loi. Nous pouvons nous interroger sur le statut du *nouvel objet* que nous avons défini comme étant une *superposition des deux chemins possibles*. Est-il une « simple » représentation mathématique ? Est-il « réel » ? Tout ce que nous pouvons dire est que *notre réalité* s'en déduit par un tirage au sort. Nous devons être certains néanmoins que, dans le cours du temps, le hasard ne va pas « malencontreusement » nous assigner sur une « *branche* » *différente* de ce que nous prenions jusque-là pour notre réalité.

Nous pouvons également énoncer ce principe en ces termes : si un chemin a été sélectionné au cours de l'histoire d'un observateur, alors ce dernier est assuré que ce chemin *fera toujours partie de son passé* lors d'une observation ultérieure.

Quatrième principe : *Les chemins empruntés par différents observateurs sont cohérents*

Ce principe correspond à l'« accord intersubjectif » que nous avons déjà rencontré. Si le principe précédent s'attachait à garantir la cohérence des histoires d'un observateur donné au cours du temps, l'accord intersubjectif a pour but – comme son nom l'indique – de garantir l'accord de différents observateurs sur les enregistrements qu'ils ont réalisés.

Ce principe peut également paraître aller de soi. Il existe néanmoins une subtilité.

Reprenons le photon émis en direction des deux fentes. La Nature explorant l'ensemble des chemins possibles, le photon est donc dans un état superposé : photon ayant emprunté le chemin A *et* photon ayant emprunté le chemin B. Un premier observateur enregistre un chemin, par exemple le chemin A. Il confronte alors son enregistrement avec un deuxième observateur qui lui aussi a enregistré le chemin suivi par ce même photon. *Relativement au premier observateur*, le deuxième observateur est – avant tout échange d'information – dans un état superposé : observateur ayant enregistré le chemin A *et* observateur

ayant enregistré le chemin B. Puis les observateurs confrontent leurs enregistrements. L'accord intersubjectif nous dit que *relativement au premier observateur*, le chemin enregistré par le deuxième observateur ne peut être que le chemin A.

Nous devons insister sur un point capital : tout enregistrement d'un chemin est toujours *relatif à un observateur donné*. Si les deux observateurs sont d'accord sur ce qu'ils ont enregistré, nous ne sommes pas en droit d'en déduire qu'ils ont enregistré le même chemin. Ceci peut paraître très surprenant mais ce que prescrit l'accord intersubjectif est l'accord (la corrélation) entre différents observateurs de la « réalité ». Rien n'est dit du chemin que chacun d'eux a enregistré.

Se poser la question de savoir ce que chacun des observateurs a observé *réellement* n'a pas de sens dans ce cadre. Nous devons admettre que toute description de la « réalité » doit toujours se faire *relativement* à un observateur donné.

Il ne peut exister par conséquent d'observateur d'une réalité globale – un super-observateur en quelque sorte – qui dirait ce que le premier et le deuxième observateurs ont *réellement* observé. Tout ce que pourrait énoncer ce super-observateur omniscient serait la « forme » que revêt le système constitué par ces deux observateurs, c'est-à-dire : il existe un chemin où les deux observateurs ont enregistré A *et* un chemin où les deux observateurs ont enregistré B.¹

N'oublions pas qu'en réfutant un temps absolu, Einstein a pu développer la relativité restreinte : le temps s'y définit *relativement à chaque observateur* de la réalité. Ici nous faisons un pas de plus : face à un événement aléatoire, *le futur doit toujours se définir relativement à un observateur donné*.

Nous avons déjà vu que l'importance et l'intérêt de l'accord intersubjectif apparaissent lors de la répétition des observations individuelles. L'accord intersubjectif permet alors à plusieurs observateurs d'établir les *mêmes corrélations*. Ils peuvent alors en déduire des lois et aboutir aux mêmes conclusions. L'*établissement de corrélations* reste la meilleure définition que l'on puisse donner de la science.

¹ Les chemins où les deux observateurs ont enregistré des chemins incohérents sont en quelque sorte « filtrés ».

Les tables de la loi quantique

Premier principe

La Nature explore tous les chemins possibles*

(= *évolution de la fonction d'onde, principe de superposition*)

Deuxième principe

Un observateur n'emprunte que l'un des chemins possibles**

(= « *effondrement de la fonction d'onde* »)

Troisième principe

Le présent et le passé d'un observateur sont cohérents***

(= « *accord intrasubjectif* »)

Quatrième principe

Les chemins empruntés par différents observateurs

sont cohérents

(= *accord intersubjectif*)

* *Partant d'une situation donnée, tous les chemins ne sont donc pas possibles.*

** *Le choix se fait de façon aléatoire.*

*** *Dit autrement : lorsque la fonction d'onde est « réduite », elle le reste.*

2.4

Notre première exploration des mondes possibles

Afin de nous habituer à utiliser nos nouveaux outils d'exploration des mondes quantiques, nous allons dans un premier temps décrire à nouveau une expérience que nous connaissons bien maintenant : l'expérience de la double fente de Young.

Tous les chemins possibles coexistent...

Reprenons l'exemple des photons émis en direction d'un écran percé de deux fentes A et B. Derrière cet écran, se trouve un deuxième écran où nous pourrions observer les impacts de ces photons.



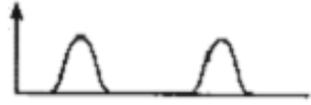
Après avoir accumulé suffisamment d'impacts de photons, nous constatons que ces derniers ne sont pas disposés de façon aléatoire ; ils sont rassemblés en *une alternance de bandes sombres et claires*. Nous pouvons faire en sorte que la source lumineuse soit suffisamment faible pour que les photons soient émis *l'un après l'autre*, mais le résultat est le même : une alternance de raies sombres et claires. Une expérience similaire, réalisée avec des électrons, eux aussi émis l'un après l'autre, conduit à une conclusion identique :



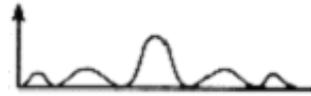
On peut se demander pourquoi les impacts s'organisent de cette façon alors que chaque particule, photon ou électron, est envoyée une par une. On

s'attendrait en effet à observer plutôt une tache lumineuse derrière chacune des fentes.

C'est-à-dire ceci (pas d'interférences) :



Plutôt que cela (interférences) :

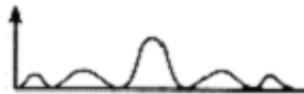


Considérons un photon émis par la source lumineuse. Nous savons qu'après son émission, les deux chemins possibles qu'il peut emprunter passent respectivement par les fentes A et B, avant de rencontrer l'écran où son impact est enregistré.

Le nouvel objet que nous avons défini (« somme de tous les chemins possibles ») permet de calculer la probabilité de l'impact en chaque point de l'écran à partir d'une formule qui ressemble à :

$$[\text{chemin A} + \text{chemin B}]^2$$

Cette formule permet aux physiciens de modéliser parfaitement les résultats observés :



En revanche, si nous refusons de considérer que la Nature explore tous les chemins possibles, alors nous devons calculer la probabilité pour chaque chemin séparément. Nous obtenons alors une formule qui ressemble à :

$$[\text{chemin A}]^2 + [\text{chemin B}]^2$$

Nous pouvons alors représenter le profil de probabilité suivant qui est celui que l'on obtiendrait si les photons se comportaient selon la physique classique, c'est à dire *comme de petites billes matérielles ne pouvant emprunter qu'un chemin à la fois* :



Comme ce résultat n'est pas conforme à l'expérience où nous observons une alternance de franges sombres et claires, nous voilà donc obligés de convenir que *la Nature a bien exploré tous les chemins possibles pour chacun des photons*.

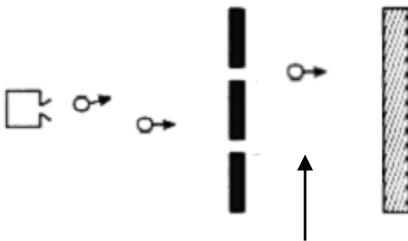
On note que le développement de la formule [chemin A + chemin B]² comparé à [chemin A]² + [chemin B]² comporte un terme supplémentaire reposant sur [chemin A]×[chemin B] qui est un *terme d'interférence*.¹

Ce terme d'interférence, si on le calcule, est différent en chaque point de l'écran : il est lié aux longueurs des chemins qui varient selon que la particule passe par le chemin A ou le chemin B. Les bandes sombres et claires sont appelées des *franges d'interférences*. Retenons que l'alternance des franges sombres et claires est *la marque de fabrique* de la superposition des chemins possibles explorés par la Nature. C'est la trace que laisse la Nature au cours de son exploration systématique des différents chemins possibles.

... Mais nous n'empruntons jamais qu'un chemin à la fois

Remarquons tout d'abord que dans ce chapitre nous avons jusqu'alors considéré uniquement l'émission du photon par sa source lumineuse et son impact sur l'écran. Nous nous sommes bien gardés de chercher à savoir (en supposant que ceci ait un sens) quel chemin, A ou B, chacun des photons avait emprunté. Le but était de nous convaincre dans un premier temps que la Nature explorait bien tous les chemins possibles.

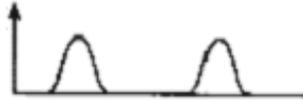
Nous plaçons maintenant un détecteur permettant de préciser le chemin de chacun des photons.



Enregistrement du chemin du photon par un observateur

¹ En effet, comme chacun sait, le développement de $(x + y)^2$ est $x^2 + y^2 + 2xy$.

Après avoir accumulé de nombreux impacts de photons nous obtenons le profil que voici :



Le simple fait d'avoir cherché à déterminer le trajet suivi par chacun des photons a profondément modifié le résultat de l'expérience. Nous constatons en effet l'absence de franges d'interférences sur l'écran. Les photons n'empruntent qu'un chemin à la fois et s'accumulent derrière chaque fente comme le feraient de petites billes. Pour l'observateur de ce système, tout se passe comme si le fait de connaître le chemin du photon faisait passer le système observé de l'état « chemin A *et* chemin B » à l'état « chemin A *ou* chemin B ». Ce résultat n'est pas pour nous surprendre. Le deuxième principe que nous avons défini nous dit qu'un observateur n'emprunte que l'un des chemins possibles qui devient alors *sa réalité*. En effet, comme nous ne pouvons être dans un état superposé, la Nature décide (aléatoirement) pour chaque photon détecté quel sera notre chemin futur : observateur ayant observé le photon passant par le chemin A *ou* observateur ayant observé le photon passant par le chemin B.

Nous verrons que ce résultat n'est pas lié à une perturbation quelconque du trajet du photon du fait de l'opération de mesure mais bien à *l'information acquise par l'observateur* à propos du système.



Un même événement aléatoire à deux endroits à la fois ?

« Peut-être reste-t-il une peur profondément enracinée que le simple fait de considérer l'idée de non-localité pourrait rouvrir les vannes qui nous protègent de ce qui est perçu comme des pensées irrationnelles qui se tapissent sous la surface de la culture moderne. Même si c'était le cas, ce ne serait pas un argument valable contre la non-localité. »

David Bohm (1993) ¹

Les physiciens aux champs

Imaginons un fermier qui possède deux poules issues de la même couvée. Ces deux poules ont ceci de particulier : chacune pond invariablement un œuf unique chaque jour. Jusque là rien de bouleversant.

Chaque matin, le fermier vient récolter les œufs dans le poulailler. Pour cela, il soulève successivement chaque poule et il constate que chaque œuf est soit blanc, soit roux. Le choix de la couleur est *totalemtent aléatoire*. C'est déjà un peu plus curieux mais il n'y a toujours pas de quoi remettre en cause les lois de la physique.

Mais, chose nettement plus admirable, les deux œufs quotidiens sont toujours de la même couleur. Le fermier essaye de comprendre comment cela est possible et il décide de placer les deux poules dans deux enclos très éloignés l'un de l'autre dont elles ne sortent pas. Le même phénomène a toujours lieu. Il enferme alors les poules dans des cages de Faraday pour que les signaux électromagnétiques ne puissent servir de moyen de communication. Les œufs sont toujours corrélés.

Peut-être, se dit le fermier, est-ce génétique ? Ces poules particulières pondent les œufs dans un ordre défini par leur matériel génétique. Ou bien

¹ D. Bohm and B.J. Hiley (1993). The undivided universe: an ontological interpretation of quantum theory (p. 157-158).

peut-être ont-elles mis au point une sorte de numéro de music-hall quand elles étaient poussins ? Par exemple, si l'on suppose qu'elles peuvent contrôler la couleur des œufs, elles ont pu apprendre par cœur une liste convenue précisant la couleur de l'œuf selon le jour de la ponte.

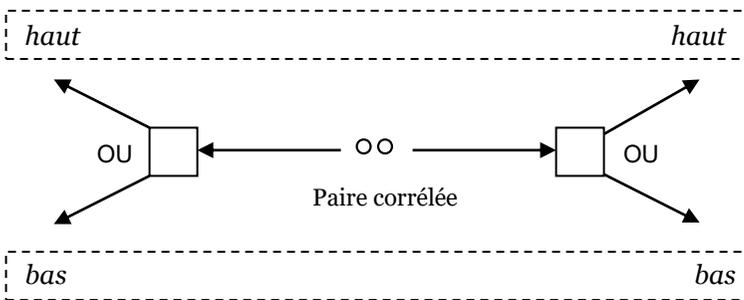
L'hypothèse que le fermier élabore dans ce cas est ce que les physiciens appellent une « théorie à variables cachées locales ». Chaque poule aurait emporté avec elle depuis le nid maternel des « variables » qui décideraient de la couleur des œufs successifs.

Quittons la ferme et ses sympathiques gallinacés et transposons cette métaphore campagnarde dans les termes de la physique quantique.

La remise en cause de la notion d'espace ?

Lorsqu'un électron passe dans un champ magnétique, sa trajectoire est déviée. On peut construire un dispositif où la déviation se produit soit vers le haut, soit vers le bas.¹ Selon la physique quantique, le « choix » haut ou bas est aléatoire, selon la valeur mesurée du spin. Par ailleurs certains systèmes physiques émettent des paires d'électrons corrélés. Ceci signifie que les électrons de chaque paire sont toujours déviés dans la même direction. Pour chaque paire d'électron, on observe toujours « haut-haut » ou « bas-bas ».

Nous pouvons schématiser cette expérience de la façon suivante :



Le lecteur aura reconnu l'expérience EPR dont nous avons déjà parlé. Cette expérience, sous diverses formes équivalentes, a été source de beaucoup de discussions car elle semblait remettre en cause la vision classique du monde. En effet, argumentaient certains physiciens, si on fait une mesure sur l'une des particules, on « fixe » la valeur du paramètre mesuré (haut ou bas) ; comment l'autre particule peut-elle « savoir » – de façon *instantanée* qui plus est – quel chemin elle doit prendre ? N'est-ce pas la preuve que la mécanique quantique

¹ Selon le signe d'un paramètre physique appelé spin.

est incomplète et qu'il lui manque la prise en compte de « variables cachées » ? Il faut bien qu'au minimum les deux particules corrélées partagent une « information ». Or, tout semble se passer comme si les deux particules corrélées se comportaient comme une seule entité.

Nous allons voir que nos outils d'exploration vont nous permettre de rendre compte sans difficulté de cette expérience cruciale dans l'histoire de la physique quantique.

En effet, nous avons appris : 1) que la Nature explore tous les chemins possibles et 2) que nous ne pouvons considérer la réalité du point de vue d'un super-observateur qui connaîtrait simultanément les chemins suivis par différents observateurs ; seules les considérations *relatives à chaque observateur* ont un sens.

Supposons que les deux appareils soient situés à plusieurs kilomètres de distance. Examinons un électron – issu d'une paire corrélée – émis vers la droite. Nous savons que la Nature explore tous les chemins possibles : vers le haut *et* vers le bas. Le deuxième principe que nous avons défini dans le premier chapitre nous dit qu'un observateur de ce système physique n'emprunte – au hasard – que l'un des chemins possibles qui devient alors *sa réalité*. Supposons que le chemin « observateur avec électron de droite dévié vers le haut » ait été sélectionné aléatoirement lorsque l'observateur a enregistré le résultat de l'expérience. L'observateur doit maintenant comparer ce résultat à celui de la particule de gauche. Deux possibilités s'offrent à lui.

Première possibilité : L'observateur prend sa bicyclette et se rend à l'autre laboratoire distant de plusieurs kilomètres afin de relever lui-même le résultat de l'expérience. La Nature a exploré également tous les chemins possibles pour la particule de gauche. La somme des chemins possibles pour l'observateur est donc « observateur avec électron de gauche dévié vers le haut » *et* « observateur avec électron de gauche dévié vers le bas ».

Souvenons-nous que le présent de l'observateur doit être cohérent avec son passé (principe n°3). Par conséquent, une contrainte de cohérence avec le passé est imposée lors de l'enregistrement du chemin suivi par la deuxième particule de la paire corrélée. Le chemin qui s'impose à l'observateur est donc : « observateur avec électron de gauche dévié vers le haut ». En répétant les expériences, l'observateur conclura à la parfaite corrélation des déviations des électrons vers le haut et vers le bas.

Deuxième possibilité : L'observateur prend son téléphone et appelle son collègue affecté à l'autre laboratoire distant de plusieurs kilomètres. Le raisonnement est le même mais dans ce cas, nous devons faire appel en plus à

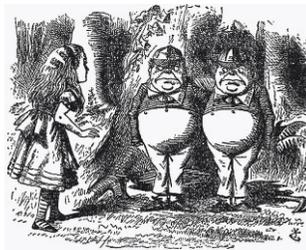
l'accord intersubjectif (principe n°4). Nous laissons au lecteur le soin de vérifier facilement que les deux observateurs ne peuvent que constater la corrélation des résultats qu'ils ont enregistrés.

Comme on le voit, nul besoin d'évoquer des signaux « plus rapides que la lumière » car, pour être en mesure de *comparer les résultats*, l'observateur doit utiliser des moyens classiques (mécaniques ou électromagnétiques) qui ne dépassent pas cette vitesse limite.

Cette expérience réalisée en 1982 par A. Aspect avec un matériel quelque peu différent (utilisant des photons) a été confirmée sur des distances de plusieurs kilomètres comme dans notre exemple. La conclusion de toutes ces expériences est que la physique quantique n'est pas incomplète et qu'il n'existe pas de variables cachées locales.

On dit parfois que l'expérience d'Aspect a mis en évidence la non localité de notre univers. On pourrait l'exprimer en d'autres termes en disant qu'un même événement aléatoire peut être observé à deux endroits. La notion d'espace semble alors remise en cause.

Si nous interprétons ces expériences du point de vue d'un super-observateur de la réalité, effectivement l'idée de non localité s'impose. Cette notion de non localité reste toutefois déplaisante pour bien des physiciens. Grâce aux outils que nous avons utilisés et qui décrivent la réalité physique *relativement à un observateur*, ces expériences peuvent être décrites sans faire appel à l'idée de non localité. Le prix à payer toutefois est d'admettre que tous les chemins possibles sont explorés par la Nature et de nous astreindre à définir systématiquement toute mesure relativement à un observateur donné.

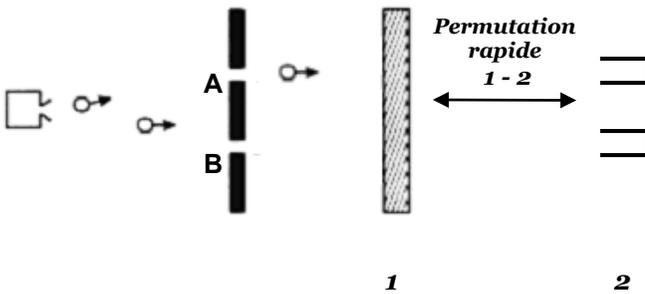


2.6

Un effet peut-il précéder sa cause ?

Dans l'expérience des fentes de Young, on se souvient que selon que l'on enregistre ou non le chemin emprunté par un photon, le résultat de l'expérience est très différent. Si on se contente d'enregistrer les impacts des photons sur l'écran sans chercher à connaître le chemin emprunté, alors on observe des franges d'interférences. Si on enregistre le chemin emprunté (fente A ou fente B) alors les impacts des photons s'accumulent derrière chaque fente. Les franges d'interférence ont disparu.

Dans un raffinement de cette expérience, le choix d'observer ou non le chemin du photon est décidé au hasard par le dispositif expérimental *après* que le photon a franchi l'écran percé de fentes.



1 - Pas d'enregistrement du chemin (on observe A **et** B)

2 - Enregistrement du chemin (on observe A **ou** B)

La permutation de l'écran et du détecteur de photon est bien entendu très rapide et se fait de façon aléatoire. Par conséquent après avoir franchi l'écran percé des deux fentes, le photon ne « sait » pas s'il rencontrera un écran ou un détecteur de photon.

Quels résultats ont été obtenus ?

2.7 Un effet peut-il précéder sa cause ?

Une fois de plus les résultats prédits par la physique quantique ont été confirmés. Pour les photons pour lesquels on a choisi de ne pas connaître le chemin, l'écran a reçu leur impact et des franges d'interférences ont été observées.

Pour les photons pour lesquels on a choisi de connaître le chemin A ou B emprunté par le photon, un « clic » distinct a été obtenu selon que l'un *ou* l'autre des deux détecteurs de photons enregistrait l'impact du photon.

Si on cherche à interpréter cette expérience de façon classique on est alors tenté de faire appel à la notion de *rétrocausalité*. En effet tout semble se passer comme si la décision (*dans le présent*) d'enregistrer ou non le chemin obligeait le photon (*dans le passé*) soit à passer par A et B soit à passer par A *ou* B.

Armés de nos outils, cette expérience ne nous pose pas de problème particulier et nous n'avons pas besoin d'évoquer une quelconque rétrocausalité. En effet, dans le cas où nous n'enregistrons pas le chemin emprunté (écran), la Nature explore tous les chemins possibles pour chaque photon émis (principe n°1). Ce photon est donc dans l'état superposé : « photon passé par le chemin A » *et* « photon passé par le chemin B ». Il marque un impact sur l'écran où l'observateur l'enregistre. Lorsqu'il accumule les expériences, l'observateur constate les franges d'interférence, dessinées par les impacts individuels. Les interférences sont, comme nous l'avons dit, la marque de fabrique de la superposition des différents chemins explorés par la Nature.

Si l'observateur enregistre le chemin suivi par le photon, ce dernier lorsqu'il franchit les fentes est *ici également dans un état superposé* car la Nature explore toujours tous les chemins possibles. Mais notre deuxième principe nous dit qu'un observateur du photon n'emprunte que l'un des chemins possibles qui devient alors *sa réalité*.¹

Même si cette expérience reste étonnante, ici encore nulle magie si nous acceptons de nous laisser guider par nos deux premiers principes. Nous sommes alors protégés des écueils de l'interprétation classique.

Les physiciens ne manquant pas d'imagination pour élaborer des expériences mettant en défaut le sens commun, poursuivons donc notre exploration des mondes possibles.

¹ Cette expérience était à l'origine une expérience de pensée proposée par Wheeler. Elle a été réalisée concrètement par des chercheurs de l'équipe d'A. Aspect (2007).

Des liens hors de l'espace et du temps ?

« *Les vraies causes sont invisibles et agissent hors de l'espace-temps. Nous avons connaissance des causes à travers les effets visibles qu'elles produisent – les corrélations non locales.* »

A. Suarez (2008)¹

Retour à la ferme

Retrouvons notre fermier du Chapitre 2.5 qui est bien perplexe face à ses poules aux œufs corrélés. Très bien informé des progrès de la physique, il a appris que les théories à variables cachées locales avaient été écartées par l'expérience d'Aspect. Par conséquent chercher l'origine de la couleur des œufs dans une information localisée dans une mémoire liée à la poule, qu'elle soit génétique ou cérébrale, ne peut qu'être infructueux. Sa lecture des ouvrages de physique quantique lui a donné toutefois une nouvelle idée.

Le fermier imagine qu'au moment où il soulève la poule pour récolter l'œuf, non seulement le choix œuf blanc ou œuf roux est déterminé aléatoirement pour le premier œuf mais qu'en même temps cet œuf se met à vibrer. La vibration se transmet alors *instantanément* dans tout l'espace. Ce champ vibratoire de nature encore inconnue serait responsable de la couleur de l'œuf de l'autre poule.

Ce que le fermier a imaginé est ce que les physiciens nomment une « théorie à variable cachée non locale ». Dans ce cas, l'information n'est plus localisée dans la poule depuis le début de l'expérience. Selon cette nouvelle hypothèse, dès que la Nature a décidé du choix de la couleur de l'un des œufs, l'information est transmise à l'autre œuf par le biais d'un champ qui s'établit instantanément.

Mais comment tester cette théorie ? Le fermier se dit que, même si la transmission d'information est instantanée, le choix aléatoire de la couleur du premier œuf (émetteur) est alors la cause du choix de la couleur du deuxième

¹ A. Suarez. Quantum randomness can be controlled by free-will – a consequence of before-before experiment. Dated April 5, 2008). <http://arxiv.org/abs/0804.0871>.

œuf (récepteur). Il s'agit donc d'une relation de cause à effet. Or, en physique, une cause doit toujours précéder un effet.

Le fermier qui décidément devient de plus en plus expert en physique décide de mettre à profit la relativité restreinte afin de mettre à l'épreuve cette relation de cause à effet. Il imagine d'installer les deux poules sur deux tracteurs qui s'éloignent l'un de l'autre. Il sait en effet que selon la relativité restreinte chaque tracteur emporte avec lui son temps propre. En conséquence, des événements qui seraient perçus comme simultanés pour des observateurs sans mouvement l'un par rapport à l'autre, ne le sont plus lorsque les observateurs sont en mouvement relatif. Si les tracteurs s'éloignent l'un de l'autre à vitesse constante, l'instant où la couleur de l'œuf est fixée aléatoirement par son observation (sa mesure), selon le temps propre associé à chaque tracteur, sera *antérieur* à celui de l'autre tracteur.¹

Par conséquent *la relation de cause à effet devrait disparaître* et la corrélation des couleurs des œufs devrait s'évanouir : l'observation d'un œuf roux sous l'une des poules devrait s'accompagner de l'observation d'un œuf blanc ou roux, selon le hasard, sous l'autre poule.

Chaque matin, peu de temps avant l'heure habituelle de la ponte, le fermier et son fils se mettent au volant des deux tracteurs et s'éloignent l'un de l'autre. Mais ils ont beau répéter les expériences, ils doivent se rendre à l'évidence lorsqu'ils confrontent leurs enregistrements : *les couleurs des œufs des deux poules sont toujours parfaitement corrélées.*

Tout se passe donc comme si la cause commune qui impose – de façon aléatoire – des couples d'œufs de même couleur se moquait éperdument de la notion d'espace et de temps. Voyons comment cette expérience a été mise sur pied dans la vraie vie des laboratoires de physique.

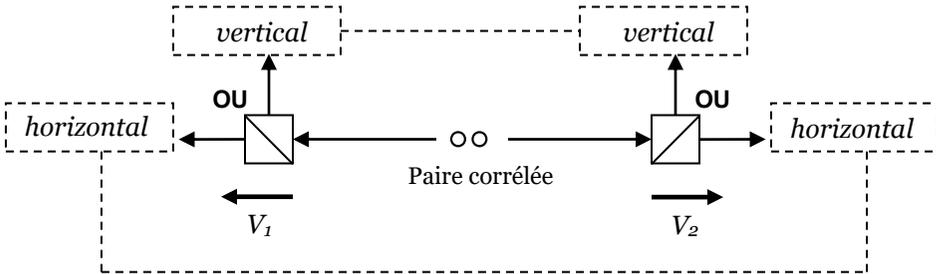
L'expérience « before-before »

Une des propriétés physiques d'un photon est sa polarisation. Cette propriété a été mise à profit dans une expérience destinée à mettre à l'épreuve la relation de causalité entre les mesures de deux particules d'une paire corrélée dont la polarisation est verticale ou horizontale.

Dans l'expérience schématisée ci-dessous, les photons polarisés verticalement sont envoyés vers le haut par un appareil appelé polariseur. S'ils sont polarisés horizontalement, ils continuent horizontalement.

¹ Bien évidemment, mettre en évidence des effets relativistes nécessiterait des véhicules quelque peu plus rapides que des tracteurs...

Nous pouvons schématiser cette expérience de la façon suivante :



Grâce un artifice technique, tout se passe comme si les polariseurs étaient en mouvement et s'éloignaient l'un de l'autre à grande vitesse (V_1 et V_2 sur le schéma). Comme nous l'avons expliqué, le temps propre associé à chaque polariseur est différent. Selon leur temps propre, chacun des polariseurs est le premier à orienter selon le hasard (horizontalement ou verticalement) le photon qui vient dans sa direction. C'est pourquoi cette expérience a été nommée « expérience *before-before* ».

La vitesse d'éloignement des polariseurs est telle que, selon la relativité restreinte, il ne peut y avoir de signal partant d'un photon pour informer l'autre photon de la paire. La relation classique de causalité de la physique est brisée.

Réalisée en 2002¹, cette expérience a montré que, conformément à ce que prévoyait la physique quantique, *les corrélations non locales sont conservées*.

Interprétons cette expérience avec nos outils habituels. Nous n'insisterons guère car le lecteur en a maintenant compris l'usage. Lorsque l'observateur observe le photon de droite, il n'emprunte que l'un des deux chemins possibles : « observateur ayant enregistré un photon vertical à droite » ou « observateur ayant enregistré un photon horizontal à droite ». Le fait que le temps propre associé à chaque polariseur soit différent s'intègre simplement dans notre interprétation. En effet, pour prendre connaissance de l'enregistrement du photon de gauche, l'observateur doit utiliser des moyens classiques sans qu'il soit besoin de faire appel à des signaux plus rapides que la lumière. Puis, le choix du chemin que l'observateur emprunte lorsqu'il prend connaissance de l'enregistrement du photon de gauche est contraint par la prise en compte de

¹ Stefanov et al (2002) ; le but de l'expérience était de tester la notion de simultanéité qui est sous-entendue par l'idée de non-localité. L'expérience a permis de réfuter un modèle de multisimultanéité proposé par Suarez et Scarani.

son passé d'observateur de la première particule d'une paire corrélée (principe n°3).¹

Les promoteurs de l'expérience « *before-before* » ont conclu que la source des corrélations « non locales » était hors de l'espace et hors du temps (cf. citation en début de chapitre). Nous constatons que nos outils nous évitent de faire des hypothèses au-delà de nos principes initiaux et, en sciences, l'économie des hypothèses est toujours préférable. Notons également que le fait de considérer successivement le point de vue de chaque observateur, évitant ainsi le point de vue d'un super-observateur, nous a été particulièrement utile dans cette expérience qui fait appel aux propriétés de la relativité restreinte. La relativité restreinte s'interdit en effet de considérer un temps absolu ; seul le temps propre associé à chacun des observateurs a un sens.

Nous constatons à nouveau que les contraintes liées aux lois de la physique quantique semblent peser davantage sur l'observateur que sur une « réalité en soi » indépendante de l'observateur. On voit également tout l'intérêt d'une interprétation *relationnelle* de la physique quantique qui consiste à *indexer* (selon l'observateur considéré) le résultat d'une mesure. Nous aurons l'occasion d'en reparler.



¹ Insistons à nouveau sur le fait que, dans cette interprétation, le photon de gauche reste dans un état superposé ; le résultat de la mesure du photon de gauche n'est pas « fixé » par la mesure du photon de droite.

Quand le passé se conjugue au futur

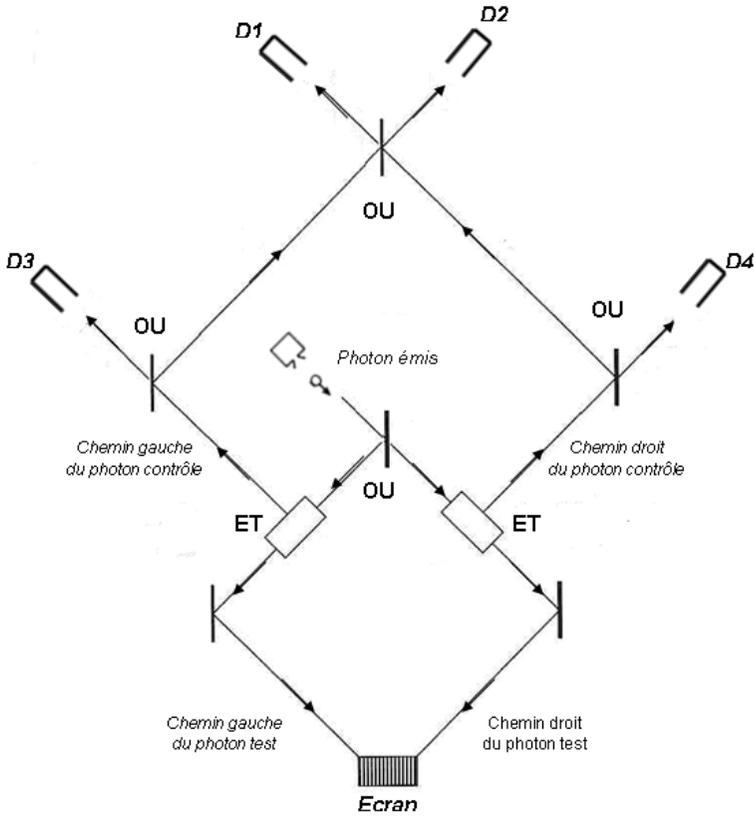
L'expérience que nous allons décrire est connue sous le nom de « gomme quantique à choix retardé ». Elle peut sembler complexe au premier abord mais en comprendre la portée et l'intérêt est relativement aisé. Afin de nous motiver, voici ce qu'en dit le physicien Brian Greene :

« Quand j'ai eu vent de ces expériences, je me souviens d'avoir été enthousiasmé pendant plusieurs jours. J'avais l'impression d'apercevoir furtivement une partie cachée de la réalité. L'expérience commune (celle de nos activités quotidiennes ordinaires) semblait tout à coup faire partie d'une devinette classique, dissimulant la véritable nature du monde quantique. Le monde de tous les jours semblait tout à coup n'être qu'un acte de magie inversée qui hypnotiserait son public en lui faisant croire aux conceptions de l'espace et du temps qui nous sont familières, tandis que, par un tour de passe-passe de la nature, l'incroyable vérité de la réalité quantique restait prudemment dissimulée ».¹

En quoi consiste donc cette expérience qui trouble à ce point les plus flegmatiques des physiciens ? Le dispositif expérimental en est schématisé ci-dessous.

Des photons sont émis un par un. Ils rencontrent tout d'abord un miroir semi-réfléchissant : le photon est soit réfléchi soit transmis (c'est-à-dire qu'il continue son chemin tout droit). Dans les deux cas il rencontre un dispositif appelé convertisseur (C) qui émet deux photons en sortie pour un photon entrant. L'un des photons est ensuite dirigé vers un écran où son impact est enregistré. L'autre photon rencontre un premier miroir semi-réfléchissant où il est soit transmis et son impact enregistré par un détecteur (D3 ou D4), soit réfléchi et dirigé vers un deuxième miroir semi-réfléchissant. Qu'il soit transmis ou réfléchi sur ce deuxième miroir, son impact est alors enregistré par un détecteur (D1 ou D2).

¹ Brian Greene. *La magie du cosmos*. Robert Laffont (2005).



Pourquoi parle-t-on de gomme quantique ?

Reprenons la description du parcours des photons à partir du convertisseur. Les photons qui se dirigent vers le bas du schéma sont appelés photons tests ; ceux qui se dirigent vers le haut sont appelés photons contrôles. Grâce au convertisseur, pour chaque photon test, il existe un photon contrôle.

Supposons qu'un clic se fasse entendre dans le détecteur D3. Ceci nous permet d'en déduire que le photon test a emprunté la branche gauche en direction de l'écran. Si c'est le détecteur D4 qui clique, alors le photon test a emprunté la branche droite.

Si c'est le détecteur D1 ou le détecteur D2 qui sonnent, nous ne pouvons conclure. En effet le deuxième miroir semi-réfléchissant a masqué cette

information : il y a eu littéralement *effacement* de l'information concernant le chemin suivi. D'où l'expression de gomme quantique.

Pourquoi dit-on que le choix est retardé ?

Le dispositif expérimental est construit de telle sorte que le photon test a un impact sur l'écran *avant* que le photon contrôle soit détecté. On peut ainsi imaginer que les détecteurs sont aussi éloignés que l'on souhaite : on peut faire en sorte qu'il s'écoule plusieurs années avant que l'observateur prenne connaissance des résultats des photons contrôles.

Voyons maintenant les résultats obtenus sur l'écran. Nous constatons que les impacts de photon accumulés au cours de l'expérience forment une tache lumineuse sans franges d'interférences.¹



Du fait que nous émettons les photons un par un, nous pouvons les numérotés. Nous pouvons ainsi les individualiser selon le chemin suivi. Nous savons ainsi que le photon 38 a fait cliquer le détecteur D1, que le photon 129 a fait cliquer le détecteur D3, etc. Nous pouvons par conséquent étudier *a posteriori* les traces d'impact des photons tests sur l'écran en fonction du chemin suivi par les photons contrôles.

Ainsi, si nous corrélons les photons contrôles parvenus aux détecteurs D3 (ou D4) avec leurs photons tests correspondants, nous obtenons également une tache lumineuse sans figure d'interférence.



Si nous corrélons les impacts sur les écrans avec les détecteurs D1 ou D2 qui ont permis d'effacer l'information sur le chemin emprunté, nous constatons que les impacts des photons dessinent des figures d'interférence :

¹ Cette expérience avait été proposée en 1982 (Scully et Drühl) ; elle a été réalisée en 1999 (Scully, Englert et Walther) et confirmée avec des dispositifs expérimentaux différents (Kim *et al*, 2000).



Comment interpréter ces différents résultats ?

Selon notre leitmotiv – la Nature explore tous les chemins possibles – le photon test est dans l'état superposé « photon test ayant emprunté la branche gauche » *et* « photon test ayant emprunté la branche droite ».

La Nature a également exploré tous les chemins possibles pour chacun des photons contrôles qui sont chacun dans un état superposé :

Photon en D1 *et* photon en D2 *et* photon en D3 *et* photon en D4

Pour chaque photon, l'observateur relie la place de l'impact du photon test sur l'écran avec le détecteur qui s'est déclenché lors du passage du photon contrôle. Comme nous l'avons dit, les détecteurs peuvent être très éloignés et l'observateur utilise un moyen classique quelconque pour en prendre connaissance.

Il est nécessaire que le présent de l'observateur soit cohérent avec son passé (principe n° 3). Par conséquent, les clics en D1 et D2 doivent être distribués de façon à ce que la comparaison réalisée *a posteriori* permette l'observation de franges sur l'écran.

Notons au passage que les franges en D1 sont complémentaires des franges en D2 : si on les additionne on retrouve le bruit initial (tache lumineuse sans franges).

Interprétons classiquement cette expérience. Nous sommes alors conduits à admettre qu'une information dans le futur (détecteur qui clique) est responsable d'une action dans le présent (place de l'impact sur l'écran). On ne peut éviter cette conclusion si on considère les événements depuis la place d'un super-observateur qui aurait connaissance de tous les points de vue *simultanément*.

Selon l'interprétation avec les différents principes que nous avons définis, c'est bien le passé qui a une influence sur le futur. Toutefois, ici encore, la contrainte porte sur l'observateur qui « sélectionne » parmi les futurs possibles celui qui est cohérent avec son passé. Ce choix d'un futur possible devient *sa réalité*. A partir du *bruit* initial sur l'écran, des franges d'interférence sont « sculptées » afin

de rendre compte des chemins superposés des photons sur lesquels on ne possède pas l'information « branche droite ou branche gauche ».

C'est donc *relativement à un observateur* que les trajets des photons tests et des photons contrôles obéissent aux lois quantiques.

Notons au passage que ces résultats montrent de la façon la plus claire qui soit que la disparition des franges n'est pas due à une quelconque perturbation du photon du fait de la mesure mais est bien liée à *l'information acquise par l'observateur* sur le chemin suivi.



Probabilités classiques, probabilités quantiques

« Mais étaient-elles possibles ces possibilités qui ne le furent pas ? Ou la seule possibilité était-elle ce qui fut ? »

James Joyce. *Ulysse* (1929)

D'où viennent les probabilités ?

L'interprétation du statut des probabilités en physique quantique est un point important car elle nous fait toucher du doigt les fondements de la théorie quantique et son étrangeté.

Ainsi, dans le monde classique, les probabilités s'additionnent. Supposons que P_1 et P_2 soient les probabilités correspondant au jet d'une pièce de monnaie. Nous pouvons écrire que la probabilité d'observer les deux événements E_1 (pile) ou E_2 (face) est :

$$P(E_1 \text{ ou } E_2) = P_1 + P_2$$

En physique quantique, on écrit que $P_1 = a^2$ et $P_2 = b^2$, avec a et b deux nombres complexes appelés « amplitudes de probabilité » dont les carrés permettent de calculer les probabilités correspondantes. Le point important est que, contrairement à la physique classique, *ce ne sont pas les probabilités qui s'additionnent mais les amplitudes de probabilité* :

$$P(E_1 \text{ ou } E_2) = (a + b)^2 = P_1 + P_2 + \text{un terme complexe « d'interférence »}^1$$

Par conséquent, il existe en physique quantique un *terme supplémentaire*. Nous avons vu en particulier que les probabilités quantiques pouvaient *interférer*, ce qui n'est pas le cas des probabilités classiques. Une conséquence du terme

¹ Pour les matheux : $P(E_1 \text{ ou } E_2) = a^2 + b^2 + ab^* + a^*b$ avec $a^2 = P_1$ et $b^2 = P_2$ (* désigne le nombre conjugué correspondant aux nombres complexes a et b).

d'interférence, comme nous l'avons vu, est que des événements qui auraient pu survenir mais *ne se sont pas produits* jouent néanmoins un rôle (contrafactualité).

Rappelons également quelques notions déjà abordées. La physique classique modélise et prédit des événements dont la succession se déroule selon des lois déterministes. Contrairement à ce qui est parfois dit, la physique quantique n'est pas non déterministe. En effet, l'équation de Schrödinger est soumise à un déterminisme strict. Toutefois son déterminisme a pour objet non pas les événements eux-mêmes, mais leur *probabilité de survenue*. Le déterminisme est donc en arrière-plan et, puisque les événements que nous observons dans notre branche d'univers sont aléatoires, cela conduit à parler – faussement – de l'indéterminisme de la physique quantique. Nous devons donc perdre l'habitude de considérer notre monde comme un univers d'objets mais plutôt comme un *univers de possibilités*. Et c'est pour cette raison que la physique quantique est parfois nommée « la physique des possibles ».

Plaçons-nous tout d'abord dans un cadre classique et prenons l'exemple de deux expérimentateurs. Le premier lance une pièce de monnaie et prend connaissance du résultat (pile) sans en informer le deuxième expérimentateur à qui il demande de parier sur le résultat. Ce dernier estime que la pièce non biaisée a eu 50% de chances de tomber sur pile et 50% de tomber sur face. S'il pouvait connaître avec une extrême précision l'ensemble des paramètres physiques qui influencent la trajectoire de la pièce, tels que les paramètres initiaux de position et de vitesse, le mouvement des molécules d'air, les irrégularités de la surface recevant la pièce, etc., alors le calcul lui permettrait d'estimer que la pièce avait 100% de chance de tomber sur pile. Nous sommes donc passés de 50% à 100% de chance pour pile. D'ailleurs le lanceur de la pièce connaît, lui, le résultat avec 100% de chance que ce soit pile. Et lorsque le deuxième expérimentateur prend enfin connaissance du résultat, c'est pile avec 100% de chance. Par conséquent, pour la physique classique, les probabilités *évaluent l'ignorance d'un observateur donné*.

Envisageons maintenant le cas quantique et prenons une fois de plus l'inépuisable exemple du chat de Schrödinger. Nous nous souvenons que sa vie est suspendue à l'éventuelle désintégration d'un atome radioactif. Comme nous l'avons déjà vu, notre incapacité à dire si à l'issue de l'expérience le chat est mort ou vivant, n'est pas liée à un manque de moyens qui permettrait de mettre en évidence d'éventuelles « variables cachées » mais est constitutif de la théorie quantique.

Il existe toutefois une différence d'interprétation selon les partisans de l'École de Copenhague et les tenants du multivers. Pour les partisans de l'École de Copenhague, les probabilités doivent s'interpréter comme la fréquence

relative des différents états possibles *si on répétait la même expérience*. Les états des différents chats utilisés dans les *expériences successives ou simultanées* peuvent s'écrire :

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{M} \text{ (avec } \alpha^2 = \beta^2 = 0,5 \text{ ; } \mathbf{M} = \text{état mort ; } \mathbf{V} = \text{état vivant)}$$

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V}$$

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{V}$$

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \rightarrow \mathbf{M}, \text{ etc.}$$

Pour chaque expérience il y a « réduction de la fonction d'onde » et une seule des branches est « réalisée ». On trouve bien en répétant les expériences que la probabilité que le chat soit vivant à la fin de l'expérience est 0,5.

Pour ceux qui défendent l'idée des multivers, l'équation de Schrödinger doit être prise « au pied de la lettre ». En particulier, les probabilités n'ont pas à être justifiées car elles sont *directement inscrites* dans l'équation de Schrödinger (ce sont les carrés des amplitudes de probabilité des différents états possibles) :

$$\alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{V} \text{ (avec } \alpha^2 = \beta^2 = 0,5)$$

Selon cette interprétation les états \mathbf{M} et \mathbf{V} sont tous deux réalisés mais cette expérience (qui restera unique) fera toujours partie du passé de différents observateurs au cours des innombrables divisions successives de leurs branches d'univers. La probabilité se définit alors comme la fréquence relative des différentes branches où un état donné a été observé. Par conséquent, il est inutile d'imaginer une éventuelle répétition des expériences. De plus, il est inutile de faire appel à une hypothétique « réduction de la fonction d'onde ». Comme le souligne L. Susskind : « *L'effondrement de la fonction d'onde est une facilité, un habile subterfuge* » (cf. l'encadré à la fin du chapitre 2.2).

En résumé, en physique classique, les probabilités sont *subjectives*. Le monde étant totalement déterministe, la connaissance des conditions initiales permet de prédire avec certitude son évolution. Dans ce cadre, les probabilités ne font que refléter la connaissance plus ou moins complète que possède un observateur sur cette évolution et cette connaissance varie selon l'observateur. En physique quantique, les probabilités sont *objectives* car elles sont constitutives de la « réalité » et elles sont identiques pour tous les observateurs.

Platon vs. Aristote : la réconciliation ?

Retrouvons à nouveau notre fermier bien connu. Toujours passionné par la logique quantique, il s'est attelé à une nouvelle tâche. Nous le surpréons en train de fixer un panneau de bois au-dessus de la porte d'entrée d'un poulailler. On peut y lire l'épigraphe suivante :

Plus le nombre d'essais augmente, plus le rapport N/B se rapproche de 1/4.

Le fermier comprend bien entendu pourquoi il a obtenu ce résultat ; il a appris en effet par ses lectures ce qu'est loi des grands nombres. Néanmoins il n'est pas totalement satisfait. Son intuition lui souffle que si les tirages sont indépendants – et ils le sont – il est remarquable que la somme de résultats individuels supposés indépendants reflète la répartition des couleurs des poules. Chaque poule est probablement persuadée qu'elle ne doit qu'à sa débrouillardise de pouvoir se frayer un chemin vers la sortie. Et pourtant le résultat final semble montrer qu'elle est soumise à une loi qui la dépasse.

Et c'est bien ce qui tracasse le fermier, cet apparent dialogue entre chaque résultat individuel et la répartition des couleurs des poules. *Qui* décide alors de la couleur de la poule qui s'échappe ? se demande le fermier. C'est bien beau de dire que c'est « le hasard », poursuit-il, mais il faut bien que quelque part une décision soit prise pour *chacun* des résultats individuels pour qu'à la fin la bonne distribution soit observée ?

Il reprend ses expérimentations avec une poule blanche et une poule noire dans le poulailler. Dès que la poule est sortie, il l'arrête dans sa course comme d'habitude ; puis il s'assied pour réfléchir.

Si je répète les tirages, se dit le fermier, j'observerai un nombre de sorties de poules noires qui, rapporté au nombre total de sorties, sera une estimation de la fréquence des poules noires dans le poulailler. Il est possible toutefois que je ne poursuive pas l'expérience au-delà du premier tirage. Quel est alors le statut de la probabilité de cette unique expérience ? Est-il licite de prendre en compte d'hypothétiques événements dans le futur qui peut-être n'auront jamais lieu ?

Insatisfait, il se replonge dans ses ruminations. Voyons se dit-il, une poule est sortie. Elle est blanche, mais après tout, peu importe sa couleur. Elle *aurait pu* être noire...

Pendant plusieurs minutes il répète ce leitmotiv – elle *aurait pu* être noire – qui semble lui évoquer quelques souvenirs. Machinalement son regard se porte sur le panneau qu'il a fixé au-dessus de la porte : « *La Nature va de ET en ET* ». Mais oui, c'est bien cela, s'exclame-t-il, la Nature explore *tous* les chemins possibles, même si moi je n'ai qu'une seule poule dans les mains à chaque fois.

En fait, se dit-il, il est vain de se demander *qui* décide la sortie de telle ou telle poule puisque la Nature explore *tous* les chemins possibles. Par conséquent *toutes* les poules sortent du poulailler et j'arrête chacune d'elles dans sa course. Pourquoi j'ai le sentiment d'être sur un chemin et pas sur un autre reste néanmoins un mystère. Mais peut-être est-ce un faux problème en rapport avec

l'idée que je me fais de mon « moi » personnel. J'ai néanmoins fait un grand pas aujourd'hui. J'ai compris que chaque événement individuel était le reflet – *pour chacun de mes « moi »* – de l'ensemble des chemins explorés ! Pour calculer la probabilité de cet événement individuel, on doit tenir compte de *l'ensemble des chemins explorés*.

Le fermier finit par cerner l'interrogation qui troublait son entendement. Il la formule en ces termes : les lois statistiques sont-elles responsables de la réalisation des événements individuels (les idées donnent une forme au monde, à ses réalisations individuelles) ou au contraire les événements individuels sont-ils la source des lois ? Dans ce dernier cas, les lois ne seraient qu'un moyen commode pour résumer l'ensemble des résultats individuels possibles.

Rentré chez lui, il se plonge dans des livres de philosophie. Il apprend ainsi que pour Platon, l'idée prime sur le phénomène. Seul l'universel, les lois générales, les mathématiques « existent ». Les événements individuels ne sont que des « projections » du monde des idées. Platon est un *idéaliste*.

Pour Aristote, au contraire, le *phénomène* est premier et l'idée n'existe pas en soi, elle est créée par l'homme. Le philosophe s'intéresse d'abord à ce qu'il perçoit avant d'en tirer des lois plus générales. C'est par la connaissance de nombreux phénomènes individuels que l'on parvient à des lois générales. Aristote est un *réaliste*.

Dans un livre d'art, le fermier admire une reproduction d'un célèbre tableau de Raphaël intitulé *L'École d'Athènes*. On y voit Platon et Aristote côte à côte. Dans un raccourci saisissant, leurs postures résument toute leur philosophie. L'index de Platon désigne le ciel, royaume des idées, tandis que la main d'Aristote désigne le monde ici-bas, celui de la réalité sensible. Le fermier s'imagine discutant avec les deux philosophes. Comment ces derniers rendraient-ils compte de l'expérience de tirage aléatoire avec les poules ?

Pour Platon, les poules noires sont, par exemple, dans le rapport NBBB avec l'ensemble des poules ; c'est à dire un rapport $1/4$. Le rapport $1/4$ est du domaine mathématique. C'est un être abstrait, idéal. Par conséquent, Platon utiliserait volontiers le *premier principe* : « *La Nature explore tous les chemins possibles* ». Le plus souvent les lois physiques ou mathématiques ne sont pas comme ici un catalogue des résultats possibles (les chemins NBBB) mais sont exprimées sous forme résumée (une formule mathématique ; ici, $1N + 3B$). Platon décrit le monde selon des lois, des idées, des formes générales. Il est par conséquent dans l'attitude d'un observateur *non engagé dans les phénomènes*. Pour lui, le fermier est dans la superposition :

« Fermier ayant observé une poule noire *et* blanche *et* blanche *et* blanche ».

Aristote quant à lui, est fort satisfait du *second principe* (« *N'empruntant qu'un chemin possible, l'observateur avance de OU en OU* »). Se fiant à ses perceptions, à ses sens, à la réalité immédiate, seul le phénomène – la poule qui surgit sous les yeux de l'observateur – a une réalité. Pour lui, le fermier est dans l'état :

« Fermier ayant observé une poule noire *ou* blanche *ou* blanche *ou* blanche ».

Pour Aristote, c'est la répétition des observations individuelles qui conduit au concept mathématique et il exploite les statistiques du fermier gravées dans le bois du poulailler :

BNBBBBBNBBNBBBBBBNBNBBBBNBBBBNBNBNNBBBBNBBNBBBBNBBNB

Il en déduit les proportions NBBB qu'il considère *non pas comme une forme idéale donnée a priori* mais comme une *construction intellectuelle* dont la réalité n'est pas gravée dans le ciel des idées. La logique quantique telle qu'énoncée dans le premier principe (« *La Nature explore tous les chemins possibles* ») et le deuxième principe (« *Un observateur n'emprunte que l'un des chemins possibles* ») réconcilie Platon et Aristote. L'observateur non engagé dans les phénomènes (Platon) décrit la forme que revêt la réalité vécue par un observateur engagé (Aristote). La réalité vécue par un observateur reste toutefois à jamais inconnue pour d'autres observateurs. C'est en répétant les observations individuelles qu'un observateur engagé peut accéder à une description des lois physiques.

Le soir est venu. Les poules sommeillent et le fermier s'apprête à les imiter. Avant de s'endormir, il repense à sa journée. Ce fut vraiment une bonne journée. Il s'est tout d'abord convaincu que la Nature explorait bien tous les chemins possibles et pas seulement dans les laboratoires des physiciens. Pour couronner le tout, il a réconcilié Platon et Aristote grâce à la logique quantique. Vraiment, une très bonne journée.



Le vieux monde est derrière nous

*« Que deviendraient les principes élémentaires
comme la loi d'action de masse
si Benveniste avait raison ? »*

John Maddox (1988) ¹

Droit d'inventaire

Dans les chapitres précédents, nous avons assisté à des remises en cause radicales de notre vision du monde. Petit à petit, des pans entiers de notre entendement du monde s'effondrent avec la remise en cause des notions classiques de localité et de causalité.

Pourtant, aussi sensationnelles soient-elles, ces idées se frayent difficilement un chemin. En dehors des cercles spécialisés, elles ne trouvent qu'un écho limité, sans commune mesure avec ce que ces résultats nous apprennent sur notre rapport à la « réalité ». Attendons la prochaine « mise à jour » qui réglera ces bizarreries se disent probablement ceux qui n'admettent pas cette atteinte au bon sens. Oui, mais...

Depuis 1982, avec l'expérience d'Aspect, nous sommes entrés dans une nouvelle ère. L'étrangeté quantique n'est plus confinée dans les équations ; les expériences que nous avons décrites, réalisées après 1982, ont pris leur indépendance vis-à-vis de la théorie qui les avait suscitées. Même si la physique quantique connaissait une révision majeure (ou serait englobée dans une théorie plus générale), les étrangetés expérimentales seraient toujours reconnues comme telles. D'ailleurs, la superposition quantique (plusieurs chemins coexistent) et la non localité (un même événement aléatoire à deux endroits) sont d'ores et déjà exploitées dans des dispositifs permettant le cryptage des communications.

Parmi ces remises en cause, la plus « inadmissible » est probablement celle du « réalisme ». La physique classique est fondée en effet sur l'idée que toute entité physique a une existence indépendante de son environnement et de nos observations. C'est à cette idée « réaliste » de la physique qu'Einstein était farouchement attaché. L'expérience d'A. Aspect de 1982 avait pour but d'éprouver certaines interprétations de la physique quantique qui avaient une

¹ When to believe the unbelievable. *Nature* 1988; 333:787.

approche à la fois réaliste et locale. Les résultats ont montré que l'une au moins des deux hypothèses était fautive sans qu'il soit possible de conclure plus avant.

De fait, de nombreux physiciens – et c'est compréhensible – se sont raccrochés à l'hypothèse réaliste et l'idée de non localité a été mise en avant. Toutefois, les inégalités de Leggett, destinées cette fois à évaluer certaines interprétations de la physique quantique ayant une approche à la fois réaliste et non locale, ont été violées récemment par les expériences d'A. Zeilinger (2007). L'une au moins des deux hypothèses était donc fautive. Les théories à variables cachées non locales avaient déjà été ébranlées par l'expérience *before-before*. Pour leurs instigateurs, l'expérience *before-before* indique que les corrélations quantiques ont leurs racines *en dehors de l'espace et du temps*.

Ces données récentes montrent donc qu'en dépit du renoncement à l'hypothèse de localité, un coup sévère est maintenant porté à l'hypothèse de réalisme. En d'autres termes, si le monde existe tel qu'il est, c'est parce que nous l'observons... (ce qui ne signifie pas que nous le modelons selon nos désirs).

Si, comme nous l'avons fait tout au long de ce texte, nous faisons porter les contraintes de la logique quantique sur l'observateur, nous pouvons nous accommoder sans trop de dommages de l'abandon de l'hypothèse réaliste ; la logique quantique considère en effet qu'il n'existe pas de propriété absolue indépendante de l'observateur. Le monde nous apparaît alors comme un *ensemble de relations* plutôt que comme une collection d'objets physiques indépendants. Or, souvenons-nous, le but de la science est d'établir des corrélations ; et *in fine* il y a toujours un observateur qui *compare* des résultats pour établir des corrélations.

Concernant la biologie, on ne peut que s'étonner de voir se perpétuer une démarche totalement ignorante de la nouvelle représentation du monde liée aux révolutions de la physique. En effet, pour la biologie contemporaine, l'univers est toujours cette grande boîte – l'espace – remplie de petits morceaux de matière – les atomes, les molécules – soumis à des forces mécaniques et électromagnétiques. Et c'est tout. De ce jeu de lego sont censés surgir les amibes, les dinosaures et les jeunes filles en fleur. Or, la physique moderne – la physique quantique – nous enseigne que cette image du monde est fautive. Non pas dépassée, mais fautive. Ainsi, lire l'*Introduction à l'étude de la médecine expérimentale de Claude Bernard* – publiée en 1865 – est toujours un plaisir. C'est toutefois un plaisir qui le dispute à l'amertume. La démarche du grand physiologiste n'a en effet pas pris une ride et tout biologiste contemporain n'y trouve rien à redire. N'est-ce pas un signe alarmant ?

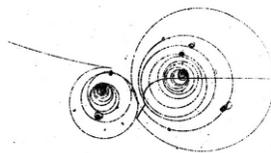
Mais, après tout, diront certains, pourquoi changer une vision du vivant qui permet de remplir les bases de données de façon exponentielle et alimenter en abondance les revues scientifiques en nouveaux résultats ? Cette productivité n'est-elle pas un gage de vérité ? L'efficacité de la biologie contemporaine est indéniable. Mais la pertinence scientifique peut-elle s'évaluer à l'aune de gigaoctets de mémoires informatiques ?

Un seul exemple de l'histoire des sciences devrait nous convaincre du contraire. L'astronomie de Ptolémée a régné pendant près de quinze siècles. Plaçant la terre au centre du cosmos, les astronomes devaient alors recourir à des artifices mathématiques complexes – les épicycles – pour expliquer le mouvement des astres. Ces outils mathématiques étaient nécessaires pour rendre compte – entre autres – du rebroussement du cheminement des planètes sur la voute céleste. Les prédictions des éclipses et autres phénomènes astronomiques s'avéraient satisfaisantes et tout allait donc pour le mieux. Le prix à payer était toutefois la complexité croissante des représentations des mouvements des corps célestes au fur et à mesure des nouvelles observations. Puis vinrent des audacieux qui eurent l'idée de placer le soleil au centre de notre système planétaire ; d'autres remplacèrent les trajectoires circulaires par des ellipses. Exit alors la notion d'épicycles et ses complications. Kepler et Newton complétèrent le travail. Des ouvrages vénérables et volumineux compilant des masses de données furent alors abandonnés à la poussière au fond des bibliothèques. L'univers astronomique était devenu simple et élégant.

Les images sont trompeuses

Notre réticence à nous affranchir du réalisme est probablement liée à notre structuration cérébrale qui nous fait nous représenter le monde sous forme d'images. Ces images basées sur la logique classique ne fonctionnent plus dans un cadre quantique.

Le passage du monde microscopique à notre monde macroscopique peut être illustré par un exemple simple. On connaît ces images de trajectoires de particules obtenues dans des chambres à bulles. On pourrait penser qu'une particule élémentaire dont on met en évidence la trajectoire avait une position et une trajectoire bien définie avant de pénétrer dans cet appareil en y laissant sa trace curviligne.



(Photo CERN)

Pourtant, selon la physique quantique, avant de pénétrer dans cette chambre à bulles, la particule n'avait qu'une probabilité de présence *sans trajectoire définie*. C'est l'*interaction* avec l'appareil de mesure qui est responsable de la « création » de cette trajectoire. A force de « voir » des trajectoires et de représenter les particules et les atomes comme de petites billes, nous avons fini par croire à leur existence. Bien que ce soit beaucoup moins aisé qu'avec les équations de la physique classique, la physique quantique permet aussi de calculer ces trajectoires telles qu'elles sont enregistrées dans des appareils de mesure. Comme l'explique E. Klein :

« On calcule, en utilisant les principes de la physique quantique, la probabilité que, du fait de leur interaction avec l'onde incidente, deux molécules contenues dans la chambre à bulle soient excitées (c'est le phénomène qui engendre l'apparition des bulles). Il s'avère que cette probabilité est extrêmement faible dans tous les cas, à l'exception de ceux où les deux molécules sont alignées parallèlement à la direction du faisceau de particules incidentes (on néglige dans un premier temps les effets du champ magnétique). Il est ensuite facile de généraliser : les molécules qui seront excitées par une même onde sont toutes alignées selon cette direction, créant ainsi la figure d'une trace rectiligne. »¹

La conclusion est donc, comme le suggère le même auteur, qu'« il faut se méfier de l'éloquence de certains petits faits : ils semblent parler d'eux-mêmes mais ne reflètent en réalité rien d'autre que nos propres grilles de lecture ». Les images offertes par les instruments de mesure peuvent être par conséquent trompeuses et nous ne devons pas perdre de vue qu'elles sont elles-mêmes une construction.

Que cherche à nous dire la physique quantique ?

Nous avons déjà vu qu'une qualité secondaire d'un objet est une qualité qu'un objet ne possède pas en propre mais en commun avec un observateur. L'exemple le plus classique est la couleur. Nous disons couramment que le ciel est bleu. Mais nous savons bien que « bleu » est une sensation qui n'appartient pas en propre au ciel. Des rayons lumineux d'une certaine longueur d'onde sont émis en direction de notre rétine et la stimulation des cellules spécialisées de cette dernière produit un influx nerveux avec un codage spécifique qui est interprété par notre cerveau par « couleur bleue ». Les couleurs que nous observons autour de nous sont donc « dans notre tête » et notre cerveau projette littéralement nos sensations sur le monde extérieur. Nous pouvons

¹ E. Klein. Petit voyage dans le monde des quanta, p. 130.

admettre le même raisonnement pour les odeurs, le chaud et le froid ou encore le toucher.

L'exemple de la vitesse est également classique. Nous avons l'habitude de dire que la vitesse d'un véhicule A est de 60 km/h sans autre précision. Cette affirmation nous est immédiatement intelligible, mais comme nous l'avons appris cette vitesse est toujours implicitement relative à un objet de référence, considéré comme « fixe », par exemple une borne au bord de la route. Par rapport à un véhicule B qui vient vers lui à la vitesse de 40 km/h (par rapport à cette borne), la vitesse du véhicule A par rapport au véhicule B est de 100 km/h. La vitesse n'est donc pas une qualité primaire, mais bien une qualité secondaire.¹ Cette vitesse de 100 km/h n'est pas une caractéristique du véhicule A, ni du véhicule B, mais du couple véhicule A-véhicule B.

La physique quantique étend cette notion bien au-delà et conduit à des notions difficiles à admettre pour le « bon sens ». Ainsi, pour la physique quantique, même les variables de position que le sens commun considère comme des variables primaires, c'est-à-dire appartenant en propre à l'objet, doivent être considérées comme des propriétés secondaires, dépendantes du contexte expérimental et de l'observateur. En effet, la physique quantique nous dit que les différents états possibles (dans le futur) d'un objet ou d'un dispositif expérimental doivent être également considérés comme des qualités secondaires. Ainsi, supposons une particule qui est placée au hasard par un dispositif quantique soit en A, soit en B. Avant l'observation de la position de la particule, nous ne pouvons affirmer la localisation en un endroit précis ; tout au plus peut-on parler de la probabilité d'être observée (en cas de mesure) à tel ou tel endroit. C'est la mesure par un observateur qui amène à la réalité (à la réalité de l'observateur plus exactement) la position de la particule en A ou en B (au hasard).

La physique quantique n'est donc pas une physique des objets mais une *physique des relations* qui deviennent dès lors la seule réalité tangible de l'univers observable. On pourrait même dire que pour la physique quantique les relations entre les objets ont plus de réalité que les objets eux-mêmes ! Or, nous savons que si l'évolution d'un système a plusieurs issues, alors entrent en jeu les probabilités. C'est ici que nous commençons à comprendre ce que cherche à nous dire la physique quantique : *les événements dont rendent compte les probabilités sont, eux aussi, des propriétés secondaires.*

¹ A l'exception notable de la vitesse de la lumière mais ceci une autre histoire...

Nous devons préciser maintenant ce que l'on appelle libre choix dans le cadre de la physique quantique et définir les différentes étapes d'une observation.

Les deux libertés de choix

Lorsqu'une expérience est réalisée, on peut distinguer trois processus successifs ¹ :

Le processus 1 est la mise en place du dispositif qui va permettre d'interroger la Nature. Il consiste en une préparation constituée de l'objet quantique que l'on souhaite mesurer et d'un appareil de mesure qui couple l'objet quantique au monde macroscopique. Cet appareil de mesure peut être un instrument de physique comme un compteur Geiger, un détecteur de photons, un interféromètre, etc. mais ce peut être également l'œil de l'expérimentateur et son cerveau. Au cours du processus 1, l'expérimentateur a le *libre choix* du dispositif.

Le processus 2 est un principe d'évolution. Il résulte de la mise en œuvre de l'équation de Schrödinger. A partir des conditions initiales, le système évolue et l'équation de Schrödinger permet de calculer le nuage des mondes possibles qui en résultent. Cette évolution est locale et déterministe.

Le processus 3 est la réponse de la nature à la question initiale. Parmi les différents résultats possibles proposés par le processus 2, la Nature choisit *librement* le résultat que nous observerons.

Dans l'exemple du chat de Schrödinger, l'expérimentateur a la liberté d'imaginer et de construire un dispositif expérimental qui, par exemple, laisse le chat vivant avec une probabilité de 2/3 et conduit à un chat mort avec une probabilité de 1/3. La Nature est libre de répondre chat vivant ou chat mort dès lors que sur un grand nombre d'expériences les fréquences respectives 2/3 et 1/3 sont respectées.

Chaque réponse individuelle de la Nature, par exemple le « clic » (ou son absence) d'un compteur Geiger doit être considérée comme une perception élémentaire, subjective. Cette perception est du même ordre que la perception d'une couleur. C'est une propriété commune à l'objet observé et à l'observateur. Ce que perçoit « réellement » une autre conscience nous est inconnu. Pour une « couleur » nous pouvons parvenir à l'admettre. Pour la réponse de la Nature (« clic ») à une question probabiliste, c'est nettement plus difficile à concevoir.

¹ Selon Von Neumann (revu par Stapp).

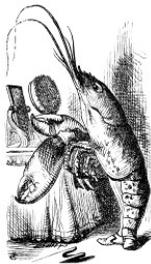
L'accord intersubjectif est la réalité du monde

Il n'y aurait donc que des qualités secondaires ? L'univers ne serait-il que subjectivité ? Serions-nous voués au solipsisme ? Précisons à nouveau que les événements dont nous parlons sont des phénomènes élémentaires, c'est-à-dire des événements qui font l'objet d'une mesure, d'une observation ou d'une perception. Ainsi, il peut s'agir de l'impact d'un photon qui marque une plaque photographique après être passé par les deux fentes du dispositif de Young. Mais si nous répétons les expériences, que se passe-t-il ? En d'autres termes si nous additionnons un grand nombre de perceptions élémentaires, chacune étant un choix libre de la Nature (vis-à-vis de chacun des observateurs), alors les différents observateurs seront d'accord sur ce qu'ils observent : par exemple, la présence ou l'absence de franges d'interférence sur un écran, un chat de Schrödinger vivant dans la moitié des cas ou un dé (quantique) qui montre la face six dans un cas sur quatre (ce qui par conséquent montre que le dé est pipé).

Nous sommes donc sauvés du solipsisme. Nous pouvons échanger avec d'autres consciences, mais ce que nous échangeons ce ne sont pas des perceptions isolées, mais des régularités statistiques, des équations mathématiques ou des formes générales. Les perceptions individuelles de ces autres consciences nous restent toutefois inaccessibles et seule la répétition des mesures donne aux observations un sens *communicable*. Les probabilités sont donc bien les pierres qui construisent l'édifice que constitue la physique quantique.

En résumé, chaque événement (quantique) individuel est subjectif car c'est *une propriété commune à l'observateur et à l'objet observé/mesuré* ; il peut être assimilé à une perception. Seule la répétition des expériences permet d'élaborer des lois objectives ; l'accord intersubjectif est la seule réalité objective du monde.

Dans les deux chapitres qui suivent, nous décrivons deux interprétations de la physique quantique qui ont pour point de départ les observateurs et non pas les objets pour décrire la réalité physique.



L'important, c'est la relation : l'interprétation relationnelle

« *La vie est faite d'illusions. Parmi ces illusions, certaines réussissent. Ce sont elles qui constituent la réalité* ».

Jacques Audibert. *L'effet Glapion* (1959)

Les origines et les principes de l'interprétation relationnelle de Rovelli ¹

C'est en posant qu'il n'existait pas de temps absolu dans l'univers et que toute description de l'espace et du temps devait se faire par rapport à un référentiel (un observateur par exemple) que naquit la relativité restreinte. Cette « simple » remarque permit un changement de point de vue qui fut révolutionnaire pour la physique.

C'est une remarque du même ordre qui a permis à Carlo Rovelli de proposer l'interprétation relationnelle de la physique quantique (appelée également physique quantique relationnelle). Selon ce dernier c'est parce que l'on considère que l'« état » d'un système est indépendant de l'observateur que naissent les difficultés d'interprétation de la physique quantique.

L'une des idées essentielles de la physique quantique relationnelle est que différents observateurs peuvent faire des comptes-rendus différents des mêmes événements. En effet, selon la physique quantique, toute la connaissance concernant un objet physique peut être représentée par un vecteur d'état $|\psi\rangle$. Et, selon les différentes interprétations de la physique quantique, le vecteur d'état est considéré soit comme une *description de la réalité* (Everett), soit comme *l'information que nous possédons sur la réalité* (Bohr). L'interprétation relationnelle de la physique quantique de Rovelli appartient clairement à cette deuxième

¹ Rovelli C. Relational Quantum Mechanics. *International Journal of Theoretical Physics* 35; 1996: 1637–78; <http://arXiv:quant-ph/9609002>.

Rovelli C, Smerlak M. Relational EPR. <http://arXiv:quant-ph/0604064>.

Laudisa F and Rovelli C. Relational Quantum Mechanics; *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/fall2005/entries/qm-relational/>

catégorie. De plus, Rovelli fait un pas de plus en posant que le vecteur d'état est *l'information* que possède *un observateur donné* sur un objet quantique. Par conséquent, une description quantique de la réalité doit toujours être donnée en référence à un observateur. Et il n'existe pas par conséquent de « méta-observateur » de la réalité qui contemplerait la réalité d'un point de vue privilégié. Il n'existe donc pas de vecteur d'état de l'univers.

Le « classique » vecteur d'état de la physique quantique devient donc dans le cadre de l'interprétation relationnelle une description des *corrélations* de certains états de l'observateur et du système observé.

De plus, selon l'interprétation relationnelle de Rovelli, la physique quantique relationnelle s'applique à *tous les objets* qu'ils soient *microscopiques* ou *macroscopiques*, qu'ils soient *conscients* ou *non*, car ce sont *tous des systèmes quantiques*. Toute « mesure » est considérée comme une simple interaction physique et toutes les interactions physiques sont donc des interactions quantiques.

Il n'existe par conséquent pas de distinction entre monde microscopique et monde macroscopique. Ainsi la physique quantique relationnelle ne fait pas de distinction fondamentale entre l'interaction de deux particules et l'interaction d'une particule avec un appareil de mesure macroscopique.

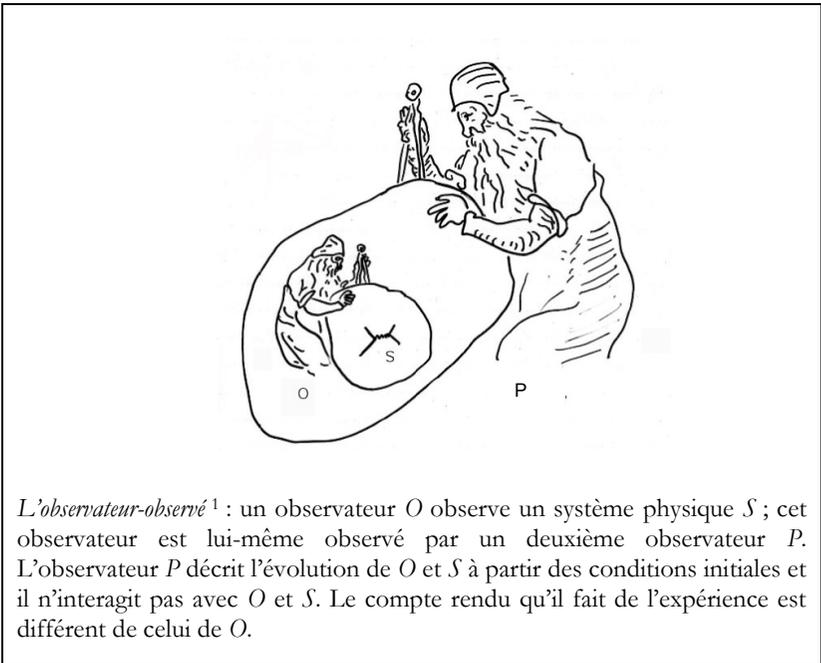
Enfin il n'y a *pas de « réduction » de la fonction d'onde* au sens où on l'entend dans l'interprétation de Copenhague. La raison pour laquelle un observateur qui mesure un système ne perçoit qu'un aspect de la « réalité » (et non pas une superposition des différentes issues possibles) est liée au fait qu'il a une *information incomplète* sur l'ensemble qu'il forme avec le système ; il ne perçoit pas en effet *les variables d'interaction* entre lui-même et ce système.

L'observateur observé

Rovelli suppose un observateur (appelé *O*) qui réalise la mesure d'un système quantique *S* pour lequel deux valeurs sont possibles, à savoir « 1 » et « 2 ». Après une mesure, *O* observe en effet que le système est soit dans l'état « 1 », soit dans l'état « 2 ».

Nous pouvons également imaginer qu'il existe un observateur *P* qui décrit l'évolution du système formé par *S* et *O* (voir dessin ci-dessous). Nous supposons que *P* a toute l'information disponible concernant l'état initial de ce système mais qu'il ne fait pas d'observation sur ce système au cours de son évolution. Pour *P*, qui n'est pas impliqué dans la mesure, une valeur définie a été obtenue après la mesure de *S* par *O* (« 1 » ou « 2 »). *P* sait qu'une valeur définie a été obtenue, mais il ne sait pas laquelle.

O et P font deux comptes-rendus différents des mêmes événements. Pour l'observateur O , le système a une valeur définie tandis que pour P , le système est dans un état qui n'est pas défini. Bien entendu, si P interagit *physiquement* avec S - O pour faire une mesure (observation), il constate que l'état de S et l'état de O sont corrélés (l'état de P est corrélé à ceux de O et S). C'est ce que Rovelli appelle l'« observation principale » sur laquelle repose l'ensemble de l'interprétation relationnelle : « *En physique quantique, des observateurs différents peuvent donner des comptes rendus différents de la même séquence d'événements* ».



Il est important de souligner que l'on ne peut pas résumer cette interprétation en disant que la différence entre O et P est que O sait quel est l'état de S et que P ne le connaît pas. Cette description, en effet, suggère implicitement qu'il existerait un état « absolu » de S , à savoir celui que O a mesuré, et que P n'a tout simplement pas connaissance de cet état. Dans l'interprétation relationnelle, un « état » doit toujours être compris de façon relative à un observateur. Nous pouvons en effet imaginer un autre observateur

¹ Image extraite de "Quantum Gravity" par C. Rovelli (*licence GFDL*).

Q qui décide de décrire S , O et P sans interagir avec eux et qui a une connaissance complète des conditions initiales. Tout ce que Q peut dire est que des corrélations ont été établies entre S , O et P mais Q ne peut pas dire quel résultat est observé.

La seule chose qu'un participant P non impliqué peut faire est de décrire la *forme* (corrélations), mais pas le contenu (enregistrements) de l'information disponible pour les observateurs qui interagissent avec S et entre eux. De cette façon, la cohérence de n'importe quelle mesure est garantie.

Grâce à cette interprétation, le « paradoxe » EPR se dissout car *chaque mesure est relative à chacun des observateurs*. La vérification des corrélations se fait après coup (par un moyen classique, en respectant par conséquent la relativité restreinte) et le formalisme garantit ces corrélations.



L'important, c'est la perception : le bayésianisme quantique

« Être c'est être perçu ou percevoir »

Berkeley

Probabilités objectives vs. probabilités subjectives

Il ne saurait être question de faire un cours sur les fondements des probabilités. Dans ce chapitre un certain nombre de principes simples seront simplement passés en revue ; ces principes composent une interprétation *personnaliste* (dite aussi *subjective*) des probabilités.

D'une manière générale, ces deux approches des probabilités reflètent une tension entre deux conceptions du rôle de la science. Le but de la science est-il de décrire le monde tel qu'il est ou est-il de décrire la connaissance que nous en avons ? Dans le premier cas, il s'agit d'une description terme à terme. Dans le second cas, les probabilités sont une mesure de l'ignorance de celui qui formule une probabilité (qui n'est rien d'autre qu'un pari).

Dans le domaine de la physique classique, ce sont essentiellement les probabilités « classiques » qui s'imposent car, comme pour la physique de Newton, c'est bien sur une description de la réalité à laquelle s'attachent les physiciens qui ont affaire à des objets « classiques ».

La tension entre les deux conceptions est plus aiguë dans le domaine de la physique quantique qui déconstruit la vision « classique » de la réalité. Dans le cadre formel de la physique quantique, l'outil mathématique qui représente l'état d'un système (vecteur d'état) est considéré par certains comme « réel » tandis que pour d'autres il est seulement un outil mathématique qui représente le niveau de connaissance qu'un agent a du système considéré. Le vecteur d'état a dans ce cas une fonction « épistémique ». Son intérêt est de pouvoir faire des prédictions mais il n'existe pas de correspondance terme à terme entre l'outil mathématique et la « réalité ».

Dans le domaine des probabilités, il existe une approche qui est dite bayésienne (du nom du mathématicien Bayes) où les probabilités sont

considérées comme un pari fait par un observateur en fonction des connaissances dont il dispose. Lorsqu'il obtient de nouvelles observations, l'observateur peut mettre à jour son estimation initiale sur la probabilité de survenue de l'événement qu'il étudie. Cette approche s'oppose à l'approche classique à laquelle nous sommes en général habitués et qui est dite fréquentiste. Dans le cadre fréquentiste, une probabilité est considérée comme le rapport entre le nombre de fois où l'événement est survenu et le nombre d'essais lorsque ce dernier tend vers l'infini. C'est précisément cette définition qui est critiquée par les bayésiens car le nombre d'essais ne peut jamais être infini (ou même très grand) et par conséquent on ne peut jamais définir précisément et objectivement une probabilité. Les bayésiens y voient de la subjectivité : à partir de quand un nombre d'essais est-il suffisamment « grand » ? Par ailleurs, quel est le sens d'une probabilité formulée pour un événement unique dans le cadre fréquentiste ? Par exemple, la probabilité qu'il pleuve ce soir.

L'approche bayésienne a été utilisée récemment dans une interprétation de la physique quantique. Cette interprétation permet de lever un certain nombre de « paradoxes » de la physique quantique. L'intérêt de cette approche appelée bayésianisme quantique (ou QBism) est qu'elle ne s'applique pas seulement à la physique quantique mais a une portée plus large et peut aussi s'appliquer à la physique classique et d'une façon générale à toute démarche scientifique.

Nous décrivons les principes essentiels de cette approche dans le paragraphe suivant sans chercher à les détailler mathématiquement, ni à les justifier sur un plan formel. Le lecteur intéressé pourra approfondir la question dans les références indiquées.

Qu'est-ce que le résultat d'une observation ?

Dans l'approche du bayésianisme quantique, le scientifique ou l'observateur est central dans la description, non seulement de phénomènes quantiques, c'est-à-dire des phénomènes microscopiques au niveau de l'atome, mais également du monde physique dans son ensemble. C'est la *perception* d'un événement et non l'événement lui-même qui est central dans toute description du monde physique : Le résultat d'une expérience est la perception qu'elle induit chez un observateur (*"The outcome of an experiment is the experience it elicits in an agent"*).¹

¹ Fuchs, C. A., Mermin, N. D., Schack, R., 2013. An introduction to QBism with an application to the locality of quantum mechanics. arXiv preprint arXiv:1311.5253.

Fuchs, C. A., 2010. QBism, the perimeter of quantum Bayesianism, arXiv preprint arXiv:1003.5209.

Mermin, N. D., 2014. Physics: QBism puts the scientist back into science. Nature 507, 421-423.

Ainsi la frontière – souvent fluctuante et mal définie – qui existe en physique quantique entre le microscopique et le macroscopique (i.e. entre les lois physiques quantiques et classiques) n'existe pas ; il existe en revanche une séparation entre le monde où vit l'observateur et sa perception du monde. Le résultat d'une observation est donc déplacé de l'objet à sa perception par l'observateur. En d'autres termes, *la perception est le résultat*. Par conséquent, une expérience qui n'a pas été réalisée par un observateur n'a pas de résultat pour ce dernier.¹ De plus, une mesure ou une observation ne révèle pas un état qui préexiste mais a pour conséquence quelque chose de nouveau.

Il faut néanmoins insister sur le fait que tous les observateurs sont d'accord quand ils comparent leurs observations et leurs mesures. Chaque observateur prend connaissance des perceptions rapportées par les autres observateurs et constate qu'elles sont cohérentes avec la sienne.

Les principes issus du bayésianisme quantique qui, encore une fois, dépassent le seul cadre quantique et s'appliquent à toute démarche scientifique, sont résumés dans l'encadré suivant :

- 1) Le résultat d'une observation est la perception qu'en a un observateur.
- 2) Une expérience non observée par Alice n'a pas de résultat pour Alice
- 3) Tous les observateurs sont d'accord sur leurs observations.

A noter que le point 2 est une simple conséquence du point 1. En effet, s'il n'y a pas eu de perception, il n'y a pas de résultat puisque la perception *est* le résultat. Pour le point 3, une interaction entre deux observateurs est considérée comme l'équivalent d'une mesure.

La mise en œuvre de ces principes est simple. Prenons l'exemple d'un parieur qui joue à pile ou face. Dans un cadre classique, nous dirions : le joueur joue à pile ou face et, après le lancer, la pièce montre pile (propriété de l'objet). Dans le cadre personnaliste (ou subjectiviste), on dira : le joueur joue à pile ou face et, après le lancer, il perçoit que la pièce montre pile (propriété de l'observateur). La nuance – en mettant l'accent sur la perception – peut laisser penser qu'il s'agit d'une régression puisque nous semblons par cette formulation renoncer à une description globale du monde, vu d'en haut en quelque sorte, et nous enfermer dans une vision du monde proche du solipsisme.

Il n'en est rien. Tout d'abord, un statut est reconnu à d'autres observateurs ; ces derniers sont d'accord sur leurs observations communes. Ils peuvent donc

¹ Savoir si la lune est là quand on ne l'observe pas est donc une question qui n'a pas de sens dans ce contexte.

faire des prédictions ensemble et bâtir des théories qui recevront l'assentiment de chacun. N'est-ce pas la définition de la science ? Par ailleurs, cette démarche a d'ores et déjà montré que certains des « paradoxes » rencontrés en physique quantique n'avaient pas lieu d'être. Enfin, le fait d'indexer le résultat d'une mesure selon chaque observateur a des précédents fructueux dans le cas, par exemple, de la relativité restreinte. Dans ce cadre, le temps n'est pas universel, identique pour tous, mais chaque observateur se déplace avec son propre repère galiléen.¹ Pour prendre un autre exemple simple, la vitesse d'un mobile n'est pas un absolu mais elle est toujours relative à un observateur. Ainsi, le son émis par une voiture de course passe de l'aigu au grave lorsque qu'elle passe devant un observateur donné, mais cette constatation n'est valable que pour lui. Le son n'est pas grave ou aigu « en soi ».

Dans l'un des chapitres précédents, nous avons vu que les résultats des expériences sur la « mémoire de l'eau » violent une loi qui est un des piliers des probabilités classiques. En conséquence, toute description reposant sur une conception « classique » est vouée à l'échec. Dans la dernière partie, nous allons tenter de donner un cadre formel et logique aux expériences de J. Benveniste, y compris dans leurs aspects les plus paradoxaux.



¹ Il existe une différence toutefois ; des observateurs différents peuvent faire des observations différentes dans le cadre de la relativité restreinte (les jumeaux de Langevin par exemple). Leurs observations sont toutefois concordantes s'ils partagent le même repère galiléen.

Troisième Partie

La possibilité d'une interprétation

3.1

La « mémoire de l'eau »... sans eau

*“Il n'y a pas d'explication objective
à ces observations.”*

John Maddox (1988)¹

Nous allons maintenant oublier tout ce que nous avons dit sur la logique quantique ! Nous allons en effet tenter de modéliser les expériences dites de la « mémoire de l'eau » en partant d'une feuille blanche et en ne faisant appel qu'aux *probabilités classiques*. Mais alors, pourquoi avoir imposé au lecteur de longs développements sur la physique quantique et sa logique déroutante ? Tout simplement parce que, chemin faisant, nous verrons émerger des corrélations que nous qualifierons de *quantum-like* ou quasi-quantiques, c'est-à-dire des corrélations non locales.

Pour réaliser cette modélisation, nous intégrerons non seulement le dispositif biologique, mais également l'expérimentateur et leurs interactions. Pour cela, nous adopterons un *point de vue extérieur* au laboratoire où se déroule l'expérience.

Quelques conventions avant de commencer²

Supposons que nous nous intéressions à un paramètre d'un système biologique expérimental que nous étudions au laboratoire dans diverses conditions expérimentales. Un changement de ce paramètre au cours d'une expérience est noté Δ^+ alors qu'une absence de changement est notée Δ^0 . Les conditions expérimentales sont soit un contrôle (noté C), soit un test (noté T). Si nous observons que C est toujours associé à Δ^0 et que T est toujours associé à Δ^+ , nous en concluons qu'une relation existe entre les conditions expérimentales

¹ When to believe the unbelievable. *Nature* 1988; 333:787.

² Le texte qui suit est une traduction et adaptation de l'article suivant : Beauvais F. Benveniste's Experiments and the So-Called “Water Memory” Phenomenon: an Example of Serendipity? Preprints 2023, 2023010155 (doi: 10.20944/preprints202301.0155.v1).

(désignées par C et T que nous qualifierions d'*étiquettes*) et les états du système (Δ^0 et Δ^+ obtenus après une mesure du système). Par convention, nous nommons cette relation « directe » ; la relation « inverse » associerait C à Δ^+ et T à Δ^0 .

Considérations théoriques sur les corrélations en biologie expérimentale

Pour progresser dans la compréhension des phénomènes liés à la « mémoire de l'eau », nous considérons que les diverses procédures de dilution des solutions ou les dispositifs électroniques visant à « transférer l'activité biologique » n'ont aucun sens. Elles ne sont que des rituels et des gesticulations sans signification.

Par conséquent, dans la modélisation qui va suivre, les conditions de contrôle et de test sont *physiquement identiques* et leur différence réside uniquement dans les *étiquettes* (« contrôle » ou « test ») qu'elles reçoivent de manière aléatoire ou subjective. Les étiquettes et les états du système ne sont bien sûr pas liés par une relation causale. Comme il n'y a pas de lien entre ces variables, elles sont indépendantes et, par conséquent, la survenue de la réalisation de l'une de ces variables n'affecte pas la probabilité de réalisation de l'autre. Pourtant, une relation a bien été observée dans les expériences de J. Benveniste et c'est le problème que nous devons résoudre. Par conséquent, la question clé est la suivante : « *Est-il possible d'observer une corrélation entre des variables indépendantes qui imite une relation causale mais qui n'est elle-même pas causale ?* »

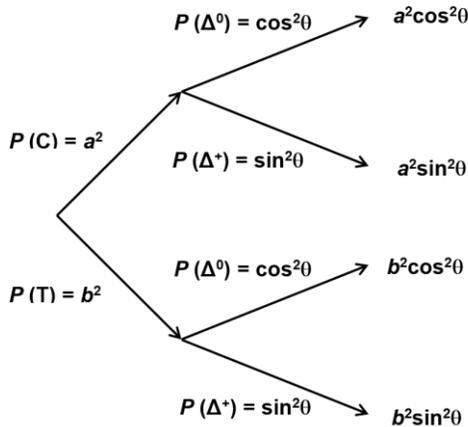


Figure 1. Loi de probabilité totale pour deux variables indépendantes : conditions expérimentales (contrôle C vs. test T) et états du système (pas de changement, Δ^0 vs. changement d'état du système, Δ^+). Selon la loi de probabilité totale, la somme des probabilités des quatre branches est égale à un.

Pour cela, nous supposons une situation simple où les étiquettes (contrôle, C ; test, T) et les états du système (aucun changement, Δ^0 ; changement d'état du système, Δ^+) sont des variables indépendantes (**Figure 1**). Dans ce cas, la loi de la probabilité totale est :

$$P(C) \times P(\Delta^0) + P(C) \times P(\Delta^+) + P(T) \times P(\Delta^0) + P(T) \times P(\Delta^+) = 1^1 \quad (\text{Eq. 1})$$

avec $P(C) + P(T) = 1$ et $P(\Delta^0) + P(\Delta^+) = 1$

Pour des raisons qui apparaîtront plus tard, nous écrivons :

- i. $P(C) = a^2$ et $P(T) = b^2$ avec a et b qui sont des nombres réels
- ii. $P(\Delta^0) = \cos^2\theta$ et $P(\Delta^+) = \sin^2\theta$

Avec ces conventions, la loi de probabilité totale décrite dans l'Équation 1 devient :

$$(a.\cos\theta)^2 + (b.\sin\theta)^2 + (b.\cos\theta)^2 + (a.\sin\theta)^2 = 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

Nous ajoutons $\delta = 2ab.\cos\theta\sin\theta - 2ab.\cos\theta\sin\theta = 0$ à l'Eq. 2 :

$$[(a.\cos\theta)^2 + (b.\sin\theta)^2 + 2ab.\cos\theta\sin\theta] + [(b.\cos\theta)^2 + (a.\sin\theta)^2 - 2ab.\cos\theta\sin\theta] = 1 \quad (\text{Eq. 3})$$

δ est égal à zéro, mais son addition permet de réorganiser l'équation avec deux identités remarquables : (Eq. 4)

$$(a.\cos\theta + b.\sin\theta)^2 + (b.\cos\theta - a.\sin\theta)^2 = (a.\cos\theta)^2 + (b.\sin\theta)^2 + (b.\cos\theta)^2 + (a.\sin\theta)^2 = 1$$

L'Équation 4 montre qu'il existe deux écritures possibles de la loi de probabilité totale pour deux variables indépendantes. On peut aussi représenter cette équation graphiquement (**Figure 2**). Nous reconnaissons une logique similaire à une expérience où un photon « interfère avec lui-même », comme dans l'expérience des deux fentes de Young ou avec un interféromètre de Mach-Zehnder.

Dans la même logique qu'une expérience d'interférence, la partie gauche de l'Équation 4 correspond à l'absence de mesure du chemin (superposition avec terme d'interférence), tandis que le côté droit correspond à la mesure du chemin (pas de terme d'interférence et étiquettes associés aléatoirement aux états du système). Le nombre réel a (resp. b) peut être assimilé à une « amplitude de probabilité » tandis que a^2 (resp. b^2) est la probabilité correspondante.

¹ Notons que $P(C)$ et $P(T)$ sont basés sur la connaissance *a priori* de l'expérimentateur du nombre de contrôles et de tests à évaluer (ce point est important pour les expériences en aveugle).

Par conséquent, il existe deux définitions possibles de P (*directe*) en fonction de la mesure du chemin ou non :

$$P(\text{directe})_{\text{I}} = (a.\cos\theta + b.\sin\theta)^2 \text{ en absence de mesure du chemin (Eq. 5)}$$

$$P(\text{directe})_{\text{II}} = (a.\cos\theta)^2 + (b.\sin\theta)^2 \text{ en cas de mesure du chemin (Eq. 6)}$$

De même, il existe deux définitions possibles de P (*inverse*):

$$P(\text{inverse})_{\text{I}} = (b.\cos\theta - a.\sin\theta)^2 \text{ en absence de mesure du chemin (Eq. 7)}$$

$$P(\text{inverse})_{\text{II}} = (b.\cos\theta)^2 + (a.\sin\theta)^2 \text{ en cas de mesure du chemin (Eq. 8)}$$

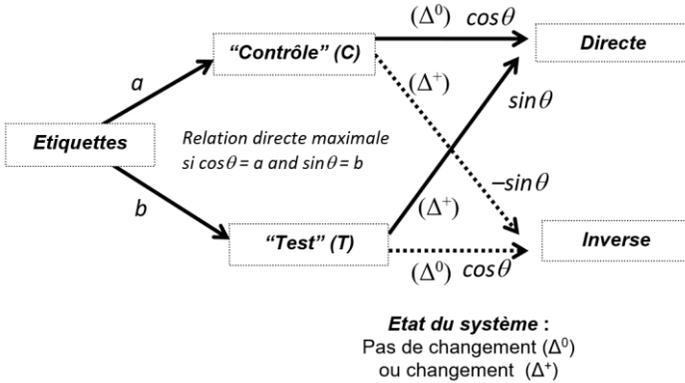


Figure 2. Construction d'une relation entre deux variables indépendantes dichotomiques (étiquettes et états du système). Les probabilités de la relation directe/inverse sont calculées comme le carré de la somme des amplitudes de probabilité des deux chemins possibles : $P(\text{directe})_{\text{I}} = (a.\cos\theta + b.\sin\theta)^2$ et $P(\text{inverse})_{\text{I}} = (b.\cos\theta - a.\sin\theta)^2$. En revanche, lorsqu'une mesure du chemin est effectuée, les probabilités sont calculées comme la somme des carrés des amplitudes de probabilité des chemins : $P(\text{directe})_{\text{II}} = a^2\cos^2\theta + b^2\sin^2\theta$ et $P(\text{inverse})_{\text{II}} = b^2\cos^2\theta + a^2\sin^2\theta$.

$P(\text{directe})_{\text{II}}$ peut également s'écrire en utilisant les probabilités conditionnelles où $P(X|Y)$ signifie la probabilité de l'événement X sachant que l'événement Y s'est produit :

$$P(\text{directe})_{\text{II}} = a^2\cos^2\theta + b^2\sin^2\theta = P(C) \times P(\Delta^0|C) + P(T) \times P(\Delta^+|T) \quad (\text{Eq. 9})$$

Nous voyons clairement avec l'Équation 9 comment $P(\text{directe})_{\text{II}}$ est lié à la connaissance (ou à la mesure) du chemin (d'un point de vue extérieur au laboratoire).

On pourrait être tenté d'utiliser les probabilités conditionnelles pour réécrire l'Équation 3. Cependant, la différence δ des « termes d'interférence » n'est pas égale à zéro dans tous les cas :

$$\delta = 2ab\sqrt{P(\Delta^0|C)}\sqrt{P(\Delta^+|T)} - 2ab\sqrt{P(\Delta^0|T)}\sqrt{P(\Delta^+|C)} \quad (\text{Eq. 10})$$

En effet, $\delta = 0$ seulement si $P(\Delta^0|C) = P(\Delta^0|T) = P(\Delta^0)$ et si $P(\Delta^+|T) = P(\Delta^+|C) = P(\Delta^+)$. En d'autres termes, les deux « termes d'interférence » ne s'annulent que si les étiquettes (C ou T) et les états du système (Δ^0 ou Δ^+) sont des variables indépendantes, comme le postule initialement l'Équation 1. Le « même hasard » doit opérer pour la sélection des états du système, indépendamment des chemins C et T (voir **Figure 2**). Une autre remarque importante concerne un cas particulier de l'Équation 5 et de l'Équation 7 :

$$\text{Si } a = \cos\theta \text{ et } b = \sin\theta, \text{ alors } P(\text{directe})_I = 1 \text{ et } P(\text{inverse})_I = 0 \quad (\text{Eq. 11})$$

L'Équation 11 signifie que nous avons répondu à la question initiale : « *Est-il possible d'observer une corrélation entre des variables indépendantes qui imite une relation causale, mais qui n'est elle-même pas causale ?* » La réponse est positive à la condition que θ soit différent de zéro (la corrélation est maximale avec $\sin\theta = b$ et $\cos\theta = a$). Une autre condition importante est de ne pas essayer de mesurer le chemin (selon le point de vue d'un observateur extérieur au laboratoire), sinon la relation est rompue et les étiquettes et les états du système sont alors associés de façon aléatoire. Par exemple, si $b = \sin\theta$ et $b^2 = 1/2$, alors $P(\text{directe})_I = 1$ tandis que $P(\text{directe})_{II}$ est égal à $1/2$.

Nous pouvons également représenter l'Équation 4 géométriquement dans un système de coordonnées cartésiennes (**Figure 3**). Dans cette représentation, deux bases, l'une pour les étiquettes (C et T) et l'autre pour les relations (directe et inverse) sont nécessaires. $\sin\theta$ et $\cos\theta$ sont les « amplitudes de probabilité » respectivement de Δ^0 et Δ^+ . Les deux bases sont reliées par une matrice rotation (avec $\theta > 0$ dans le sens horaire) :

$$\begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a\cos\theta + b\sin\theta \\ b\cos\theta - a\sin\theta \end{pmatrix} \quad (\text{Eq. 12})$$

L'action de la matrice rotation sur un point de coordonnées (a, b) donne un point dont les coordonnées sont les amplitudes de probabilité de $P(\text{directe})$ et $P(\text{inverse})$.

Chaque point peut être projeté (c'est-à-dire exprimé) dans l'une ou l'autre base (C/T ou directe/inverse). La projection d'un point du cercle unité conduit à des résultats différents selon qu'il est projeté directement sur la base directe/inverse ou s'il est projeté d'abord sur la base C/T et ensuite sur la base

directe/inverse. Ce dernier cas (projection d'abord sur la base C/T) est équivalent à une mesure du chemin. Pour $\theta \neq 0$, les relations directes/inverses et les étiquettes contrôle/essai sont des variables qui sont dites « non-commutatives ». Cette représentation géométrique n'apporte rien de plus que les Équations 5 à 9, mais elle permet de visualiser globalement les étiquettes, les états du système et leur relation.

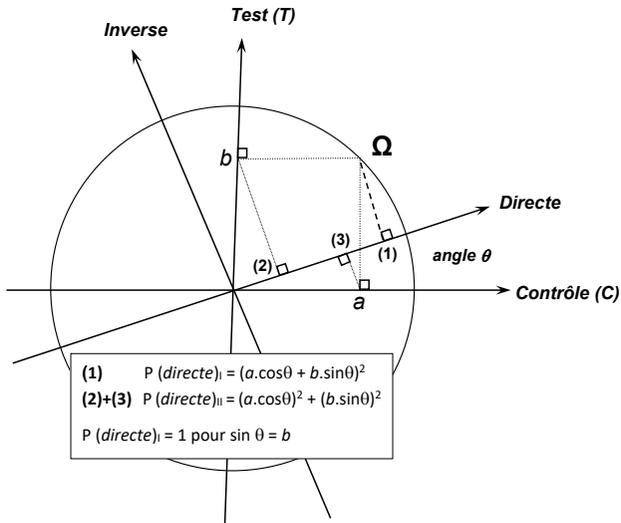


Figure 3. Représentation géométrique des deux bases décrivant les amplitudes de probabilité des étiquettes et les états du système. Le point Ω de coordonnées a et b dans la base C/T a pour coordonnée $a \cdot \cos\theta + b \cdot \sin\theta$ sur l'axe « relation directe » ; la probabilité associée est donc $(a \cdot \cos\theta + b \cdot \sin\theta)^2$. Si la relation est évaluée séparément pour C et T (mesure du « chemin »), les coordonnées sur l'axe « relation directe » sont $a \cdot \cos\theta$ pour C et $b \cdot \sin\theta$ pour T, avec la probabilité correspondante égale à $(a \cdot \cos\theta)^2 + (b \cdot \sin\theta)^2$. Par souci de clarté, les projections pour la relation inverse ne sont pas représentées sur la figure.

Quelle est l'origine de la base « directe/inverse » ?

Les probabilités dans la logique quantique font le lien entre la réalité et le modèle théorique basé sur les amplitudes de probabilité. Ces objets mathématiques n'ont pas de correspondance dans le monde réel et c'est en portant au carré les amplitudes de probabilité que l'on calcule des probabilités qui peuvent être évaluées par des expériences *réelles*. En absence de mesure du

chemin, les carrés des combinaisons respectives des amplitudes de probabilité des différents événements sont $(a.\cos\theta + b.\sin\theta)^2$ et $(b.\cos\theta - a.\sin\theta)^2$. Nous voyons que les étiquettes et les états du système doivent être considérés comme une *entité indissociable*. Si nous essayons de la dissocier (par la mesure du chemin), c'est le bras droit de l'Équation 4 qui s'applique et les probabilités de *chacun des chemins* sont calculées avec les probabilités conditionnelles.

Les étiquettes, qui participent à cette entité indissociable, ne sont pas des objets physiques mais sont le résultat des décisions ou des opinions de l'expérimentateur sur les propriétés des échantillons à évaluer. Elles sont donc un produit des états cognitifs de l'expérimentateur. Nous proposons que la structuration des états cognitifs de l'expérimentateur et des états du système pris dans leur ensemble (décrits mathématiquement dans les Équations 5 et 7) a son origine dans l'observation répétée de corrélations entre les étiquettes et les états du système. Ces observations corrélées sont, par exemple, l'observation par l'expérimentateur d'une relation causale classique lors d'expériences avec le système expérimental. Par « classique », nous entendons une expérience avec une cause locale (par exemple, un composé pharmacologique à concentration micromolaire ajouté au système biologique). À noter que c'était le cas dans le laboratoire de J. Benveniste ; les systèmes expérimentaux étaient régulièrement utilisés pour des expériences « classiques » et ils étaient également utilisés pour vérifier que les systèmes utilisés pour démontrer des relations « non classiques » fonctionnaient correctement dans des conditions « classiques ». Les divers expérimentateurs étaient donc entraînés à manipuler ces systèmes dans les conditions « classiques ».

Supposons une expérience avec un stimulus « classique » pour laquelle la corrélation entre les étiquettes et les états du système est « parfaite », c'est-à-dire pour laquelle $P(\textit{directe}) = 1$. Pour cette relation causale/locale, nous pouvons écrire :

$$P(\textit{directe})_{\text{causale}} = P(C) \times P(\Delta^0|C) + P(T) \times P(\Delta^+|T) = 1 \quad (\text{Eq. 13})$$

avec $P(\Delta^0|C) = 1$ et $P(\Delta^+|T) = 1$

Nous appelons n_1 le nombre d'essais où l'expérimentateur observe que Δ^0 est associé à C et n_2 le nombre d'essais où l'expérimentateur observe que Δ^+ est associé à T (avec $n_1 + n_2 = N$). L'expérimentateur enregistre des couples de résultats qui vérifient $P(\textit{directe})_{\text{causale}} = 1$, par exemple (C, Δ^0), (T, Δ^+), (T, Δ^+), (C, Δ^0), (C, Δ^0), (T, Δ^+), (T, Δ^+), etc. Lorsque le nombre d'essais N augmente, on peut écrire que $n_1/N \rightarrow a^2$ and $n_2/N \rightarrow b^2$.

Puisque $a^2 + b^2 = 1$, le point Ω de coordonnées $a = \sqrt{n_1/N}$ et $b = \sqrt{n_2/N}$ peut être représenté sur le cercle unité de la **Figure 4**. Le point Ω , correspondant à

$P(\text{directe})_{\text{causale}} = P(\text{directe})_{\text{I}} = 1$, permet de définir l'axe de la relation directe et l'axe perpendiculaire pour la relation inverse. Il définit également la valeur de θ puisque $\sin\theta = b$.

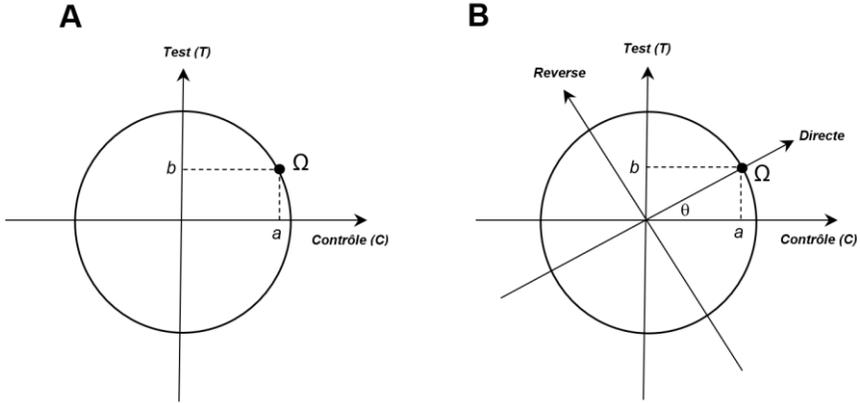


Figure 4. Construction de la base directe/inverse. (A) Lors de mesures répétées d'une relation causale/locale avec un composé biologiquement actif « classique, C est systématiquement associé à Δ^0 et T à Δ^+ . Puisque $P(C) = a^2$ et $P(T) = b^2$, ces corrélations peuvent être représentées sur le cercle unitaire par le point Ω de coordonnées a et b . (B) Le point Ω permet de définir une « relation directe » et une nouvelle base (directe/inverse). Dans cette nouvelle base, la relation directe est reconnue *comme telle*, indépendamment des éléments (observations expérimentales) qui ont permis de la définir. Le point Ω , qui *intègre* les résultats des mesures répétées des corrélations expérimentales, est donc un *point de passage* entre une relation causale classique et une corrélation (non classique) entre deux variables indépendantes.

Après cette phase, qui peut être considérée comme un *apprentissage* ou un *conditionnement*, nous devons expliquer comment se maintient la structuration de l'entité constituée des états cognitifs de l'expérimentateur et des états du système expérimental. Pendant la phase « d'apprentissage », la relation non-classique se *façonne* sur des variables corrélées. Par conséquent, les deux types de relations – la classique et la non classique – coexistent lorsque l'apprentissage est suffisamment avancé et que la cause « classique » est encore présente. Notons que la structuration de l'ensemble expérimentateur plus système expérimental ne dépend pas de la nature sous-jacente de la corrélation observée entre les étiquettes et les états du système (causalité locale ou autres types de corrélations). En d'autres termes, une fois établie, cette structuration est *auto-*

entretenu. Cela explique pourquoi, même si la cause classique/locale a été supprimée, la même relation continue d'être observée entre les étiquettes et les états du système.

Tous les systèmes expérimentaux sont-ils adaptés ?

Jusqu'à présent, nous n'avons imposé aucune condition au système expérimental. Nous avons simplement essayé de construire une structure logique permettant de décrire les expériences de J. Benveniste. Dans ce modèle, les conditions expérimentales (étiquettes) et les états du système ne sont rien d'autre que des variables aléatoires indépendantes auxquelles nous pouvons associer des probabilités de survenue. Cependant, on peut intuitivement penser qu'il est difficile d'envisager de remplacer le système biologique par n'importe quel autre système produisant du hasard tel qu'un tirage aléatoire de boules noires et blanches ou un lancer de dés.

Tous les systèmes expérimentaux utilisés dans les expériences de J. Benveniste étaient des systèmes biologiques impliquant des cellules, des organes isolés ou des réactions enzymatiques. Nous supposons que – en l'absence d'un expérimentateur conditionné – θ n'est pas strictement égal à zéro, mais varie légèrement autour de zéro en raison de minuscules fluctuations aléatoires du système expérimental. Puisque $P(\Delta^+) = \sin^2\theta$, la transition $\Delta^0 \rightarrow \Delta^+$ est un événement possible, même si sa probabilité est faible. Cela signifie qu'il existe au moins une séquence d'événements aléatoires élémentaires qui conduit de Δ^0 à Δ^+ . Par conséquent, le système biologique peut subir une transition de Δ^0 à Δ^+ lors d'une expérience réalisée par un expérimentateur conditionné. Le système expérimental doit obéir à $P(\text{directe})_1 = 1$ et il se comporte comme une pomme tombée qui se déplace selon le champ gravitationnel (s'il n'y a pas d'obstacle sur son chemin).

En revanche, supposons un sac rempli de nombreuses boules blanches (Δ^0) et de seulement quelques boules noires (Δ^+). La probabilité de tirer une boule noire est faible et les boules blanches ne peuvent pas se transformer en boules noires ; en effet, il n'y a pas ici de « séquence d'événements aléatoires élémentaires » conduisant à transformer une boule blanche en boule noire. Puisque la probabilité de tirer des boules noires ne peut pas augmenter, un tel système expérimental ne permettrait pas d'établir une relation avec une autre variable indépendante (étiquettes, par exemple), comme c'est le cas dans les expériences de J. Benveniste.

Expériences en ouvert vs. à l'aveugle

Expériences en ouvert/à l'aveugle avec superviseur interne. Les étiquettes (C ou T) et les états du système (Δ^0 ou Δ^+) sont des événements aléatoires qui sont gouvernés par leurs probabilités respectives. Les enregistrements de ces événements par l'expérimentateur sont des mesures : lors des expériences en ouvert, l'expérimentateur prend d'abord connaissance l'étiquette (C ou T), puis mesure l'état du système (Δ^0 ou Δ^+) ; lors d'une expérience à l'aveugle avec un superviseur interne, l'expérimentateur mesure d'abord l'état du système puis prend connaissance de l'étiquette (**Figure 5**). L'expérience avec aveugle interne peut être réalisé par un dispositif automatique ou par un collègue présent dans le voisinage de l'expérimentateur. Dans ce cas, le dispositif pour réaliser le masquage des étiquettes (machine ou humain) n'est rien d'autre qu'une partie du système expérimental.

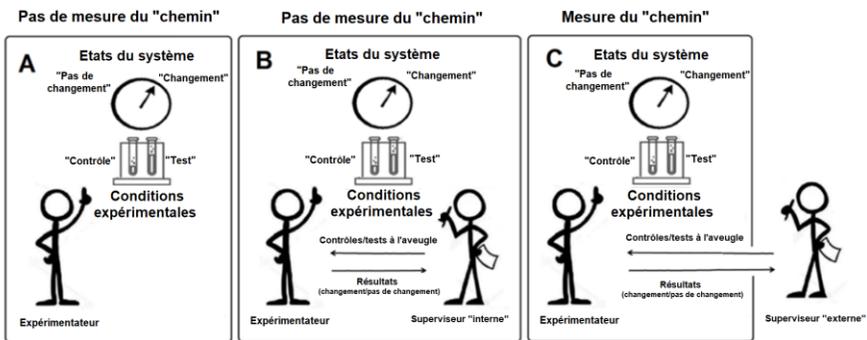


Figure 5. Configurations pour les expériences (A) en ouvert, (B) à l'aveugle « interne » et (C) à l'aveugle « externe ». Le superviseur « interne » ou « externe » fournit à l'expérimentateur des échantillons « contrôle » et « test » dont les noms ont été masqués. Une fois l'expérience terminée, l'expérimentateur envoie au superviseur les résultats obtenus (pas de changement ou changement de l'état du système (notés respectivement Δ^0 et Δ^+) pour chaque contrôle ou test. Le superviseur évalue le taux de « réussite » de l'expérience (c'est-à-dire combien de relations directes ont été obtenues avec les échantillons masqués : « contrôle » associé à « pas de changement » ou « test » associé à « changement »).

Nous voyons sur la **Figure 1** et dans l'Équation 1 qu'il n'y a pas d'ordre imposé pour les étiquettes et les états du système. Ainsi, dans l'Équation 3, l'ordre des amplitudes de probabilité qui se réfèrent aux étiquettes et aux états

du système n'a pas d'importance. Même si les **Figures 1** et **2** suggèrent que les étiquettes sont évaluées en premier, nous pourrions décrire la même situation en échangeant ce qui fait référence aux étiquettes avec ce qui fait référence aux états du système. Par conséquent, dans notre modélisation, il n'y a pas de différence de nature entre les expériences en ouvert et les expériences à l'aveugle interne.

De plus, nous avons vu que $P(\text{directe}) = 1$ et $P(\text{inverse}) = 0$ pour $\sin\theta = b$ et $\cos\theta = a$, montrant ainsi que les amplitudes de probabilité des étiquettes et des résultats « fusionnent » lorsque la corrélation est maximale. C et Δ^0 sont combinés dans un chemin unique (Chemin 1) et T et Δ^+ sont combinés dans un autre chemin unique (Chemin 2) (**Figure 6**).

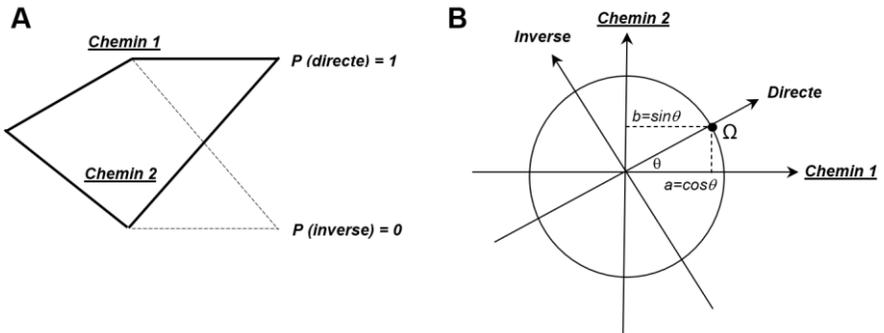


Figure 6. Corrélations maximales entre les étiquettes et les états du système et conséquences sur les expériences en ouvert, à l'aveugle « interne » et à l'aveugle « externe ».

(A) Les corrélations entre les étiquettes et les états du système sont maximales avec $a = \cos\theta$ et $b = \sin\theta$. Dans ce cas, C et Δ^0 sont combinés dans un seul chemin (chemin 1) et T et Δ^+ sont combinés dans un autre chemin unique (chemin 2). Dans ce cas, $P(\text{directe})_{\text{I}} = [P(\text{C}) + P(\text{T})]^2 = 1$ (pas de mesure du chemin ; expériences en ouvert ou avec aveugle interne) et $P(\text{directe})_{\text{II}} = [P(\text{C})]^2 + [P(\text{T})]^2$ (mesure du chemin ; aveugle externe).

(B) Représentation géométrique sur le cercle unitaire des deux bases C/T et chemin 1/chemin 2.

Les expériences avec aveugle interne ont toujours fait impression sur l'équipe de J. Benveniste car elles suggéraient fortement que les effets des hautes dilutions ou de la biologie numérique étaient une réalité tangible (« ça marche »). Ce sont ces expériences qui ont convaincu Benveniste qu'il devait persévérer et

qu'un jour ses théories et ses découvertes seraient reconnues. Cependant, nous avons vu au-dessus qu'une autre logique qu'une relation causale classique est possible. Cela ne signifie pas que la causalité est absente de cette description, mais la causalité opère à un niveau supérieur, c'est-à-dire au niveau de la relation.

Les expériences de J. Benveniste avec aveugle interne ne devraient pas être plus surprenantes que celles pour une relation causale classique réalisée également avec aveugle interne. Il faut simplement admettre que ce qui est en jeu n'est pas la composition physique de l'échantillon à tester – ils sont en effet tous identiques – mais sa *désignation* (étiquette C ou T). Cette étiquette peut être « mesurée » comme tout autre paramètre et une probabilité peut lui être attribuée.

Expériences à l'aveugle avec superviseur externe. Les expériences à l'aveugle avec superviseur externe – qui constituaient la « pierre d'achoppement » décrite ci-dessus s'expliquent simplement par une « mesure du chemin » (**Figure 6**). Tout se passe comme si le superviseur externe effectuait une mesure du chemin depuis l'extérieur en échangeant des données sur les étiquettes et les états du système (**Figure 5**). C'est le superviseur externe qui fournit à l'expérimentateur les échantillons codés à tester ; enfin, le superviseur externe reçoit les enregistrements des états du système correspondants et, après avoir levé l'aveugle, établit si l'expérience est « réussie ». Cette « mesure du chemin » considère le laboratoire dans son ensemble comme un « interféromètre ». On peut donc comprendre pourquoi ces expériences ont été si perturbantes pour l'équipe de J. Benveniste. En effet, même si ces expériences étaient considérées comme des « échecs », elles indiquaient néanmoins que « quelque chose » se passait car des changements du système étaient enregistrés (mais associés de façon aléatoire à C et T). Toutefois, les expériences semblaient devenir « folles » du fait du mélange des étiquettes et des états du système correspondants. Selon l'approche « classique » et locale de l'équipe de J. Benveniste, il n'y avait pas de place pour de tels résultats et la recherche de causes externes à ces perturbations a conduit à une course technologique à l'expérience « parfaite » et indiscutable.

Discussion

Dans cette analyse des expériences de J. Benveniste, les détails concernant les modèles biologiques et les différentes méthodes utilisées pour « informer » l'eau ont été laissés de côté. Seule la structure logique des résultats ont été analysée. Afin de réexaminer ces expériences avec une perspective renouvelée, un choix radical a été fait en considérant que les conditions de contrôle et de test qui ont été évaluées par l'équipe de J. Benveniste ne différaient que par leur désignation par l'expérimentateur. En effet, nous avons constaté dans la première partie que

quel que soit le procédé utilisé pour informer l'eau (hautes dilutions, transmission électromagnétique directe, enregistrement sur une mémoire d'ordinateur, etc.), l'amplitude de l'effet obtenu était du même ordre de grandeur quel que soit le système expérimental. Cela suggérait une explication alternative unique, indépendante des différentes méthodes et dispositifs utilisés. Ce choix radical semble rendre toutefois encore plus problématique toute explication des expériences de J. Benveniste. En effet, comment une relation peut-elle être observée si les échantillons testés sont tous physiquement comparables à de simples contrôles ? Nous nous sommes alors demandé s'il était possible de construire une relation entre deux variables indépendantes qui avait – jusqu'à un certain point – l'apparence d'une relation causale, mais qui ne l'était pas.

Le formalisme mathématique que nous proposons part de zéro avec la définition de la loi de probabilité totale pour deux variables indépendantes dichotomiques. Ces deux variables sont les étiquettes (qui désignent les conditions expérimentales) et les états du système. Nous obtenons alors aisément l'Équation 4 où les parties gauche et droite peuvent être considérées comme complémentaires. Elles sont les deux pôles opposés d'une même réalité, mais tous deux sont nécessaires pour comprendre la logique des expériences. Le formalisme exige une description de l'extérieur où le laboratoire et son contenu se comportent avec la même logique qu'un « interféromètre ». La « causalité » de la relation décrite par le formalisme actuel n'est qu'apparente puisque la mesure du « chemin » détruit les corrélations : les étiquettes (C vs. T) sont alors associées de façon aléatoire aux états du système (pas de changement vs. changement). C'est précisément la description de la pierre d'achoppement dont nous avons largement parlé dans la première partie.

Les étiquettes (« contrôle » et « test ») dans notre modélisation ne sont pas des objets physiques, mais des concepts construits et manipulés par les structures cognitives de l'expérimentateur. Néanmoins – comme pour toute variable « physique » – ces entités subjectives et abstraites peuvent être mesurées. Dans le domaine de la psychologie expérimentale, la logique de type quantique a été utilisée avec succès dans une nouvelle approche appelée cognition quantique. Les processus cognitifs tels que la prise de décision, le jugement, la mémoire, le raisonnement, le langage ou la perception, qui ne sont pas décrits de manière adéquate par les probabilités « classiques », sont modélisés à l'aide d'outils mathématiques basés sur les outils de la logique quantique, permettant ainsi de mieux rendre compte de certaines données

expérimentales.¹ Cependant, dans le domaine de la cognition quantique, tous les processus sont censés être limités au cerveau, alors que notre modélisation implique non seulement les structures cognitives de l'expérimentateur, mais aussi un système biologique expérimental. On considère généralement que les structures cognitives sont limitées au cerveau ou à l'enveloppe externe du corps si le système nerveux périphérique et les organes des sens sont également inclus. La thèse de l'esprit étendu (EMT) propose d'étendre les structures cognitives au monde physique extérieur au corps.² Ainsi, les dispositifs et les machines utilisés pour calculer ou mémoriser pourraient être considérés comme une extension des structures cognitives. De même, on peut considérer que les dispositifs de mesure ne sont rien d'autre qu'une extension des organes des sens. Une telle définition élargie des structures cognitives est implicite dans notre modélisation lorsque les étiquettes – inscrites dans les structures cognitives – et les états des systèmes biologiques sont considérés comme une entité unique et indissociable. Cependant, il n'y a rien de magique dans cette description puisqu'il n'y a pas d'« action » des structures mentales sur le système expérimental. Si l'on tente d'utiliser les corrélations de manière causale pour réaliser une action (par exemple, donner un ordre ou envoyer un message), la relation entre l'expérimentateur et le système se rompt.

La source des corrélations non classiques entre l'expérimentateur et le système expérimental a son origine dans la complémentarité des mesures locales (étiquettes et états du système) et de la mesure globale (relation). Un parallèle peut être établi avec la dualité onde-particule, la mesure globale correspondant à la détection des « ondes » et les mesures locales à celle des « particules ». « Particules » et « ondes » sont des concepts classiques que nous pouvons appréhender avec nos outils de mesure, nos sens, notre langage et nos concepts habituels pour décrire la réalité. En fonction de l'environnement expérimental, les descriptions « onde » ou « particule » sont appropriées (on dit qu'elles sont complémentaires). Ainsi, la lumière se comporte comme des ondes lorsqu'elle n'interagit pas avec la matière et se comporte comme des particules (c'est-à-dire des photons) lorsqu'elle interagit avec la matière (par exemple, avec un appareil de mesure). Ces deux descriptions – particules et ondes – sont des images incompatibles de la réalité (nous ne pouvons pas les « penser » simultanément). Néanmoins, les deux descriptions sont nécessaires pour rendre compte des phénomènes quantiques (ou de type quantique) lorsque nous utilisons nos concepts habituels pour décrire la réalité. Dans le formalisme de cet article, les

¹ Busemeyer J, Bruza P. Quantum models of cognition and decision: Cambridge University Press; 2012; Bruza PD, Wang Z, Busemeyer JR. Quantum cognition: a new theoretical approach to psychology. *Trends Cogn Sci.* 2015;19:383-93.

² Clark A, Chalmers D. The extended mind. *Analysis.* 1998;58:7-19.

« éléments » expérimentaux (C, T, Δ^0 et Δ^+) sont décrits comme des « particules » tandis que leurs relations sont décrites comme une « onde ». Ainsi, $P(\text{directe})_{II} = (a.\cos\theta)^2 + (b.\sin\theta)^2$ est une description de type « particule » de la situation expérimentale ; $P(\text{directe})_I = (a.\cos\theta + b.\sin\theta)^2$ est une description de type « onde » qui diffère de $P(\text{directe})_{II}$ par le terme d'interférence $2ab.\cos\theta\sin\theta$. Les interférences sont caractéristiques des interactions entre ondes qui peuvent être constructives ou destructives selon les valeurs des amplitudes des ondes qui se superposent en un point donné. Ainsi, pour calculer $P(\text{directe})_I$, les deux amplitudes $a.\cos\theta$ et $b.\sin\theta$ sont additionnées (les amplitudes peuvent être positives ou négatives). Dans le formalisme quantique ou de type quantique, les amplitudes sont des amplitudes de probabilité qui n'ont pas de correspondance dans la réalité. La connexion avec la réalité se fait via les probabilités qui sont obtenues après avoir élevé au carré la somme de toutes les amplitudes de probabilité qui concourent au résultat (relation directe ou inverse dans le cas présent).

Le point crucial de notre description des expériences de J. Benveniste est l'explication de la structuration de l'entité correspondant aux états cognitifs de l'expérimentateur et des états du système expérimental. Pour cela, nous proposons que l'expérimentateur apprend inconsciemment à reconnaître l'association entre les étiquettes et les états du système après l'observation répétée d'une relation « classique » avec un système expérimental comparable. Cette étape peut être comparée à un conditionnement pavlovien : les structures cognitives associent l'étiquette « test » à un changement de l'état du système et l'étiquette « contrôle » à une absence de changement. Il est important de souligner que cette association d'une étiquette avec l'état du système correspondant n'est pas une simple addition ou juxtaposition. En effet, au cours de ce processus, la relation est reconnue comme telle (c'est-à-dire indépendamment de ses éléments constitutifs). Il s'agit d'un niveau de description plus abstrait qu'un simple compte rendu d'événements expérimentaux individuels. Ces considérations rappellent la théorie de la Gestalt. Selon cette théorie, les objets sont perçus comme un tout ou comme une forme (Gestalt) par l'esprit humain et non comme la somme de leurs parties ; le tout a donc une existence indépendante.¹

¹ Jakel F, Singh M, Wichmann FA, et al. An overview of quantitative approaches in Gestalt perception. *Vision Res.* 2016;126:3-8; Amann A. The Gestalt problem in quantum theory: generation of molecular shape by the environment. *Synthese.* 1993;97:125-56.

L'automatisation du processus expérimental n'est pas nécessairement la solution pour éviter un « effet expérimentateur ». Comme indiqué précédemment, l'équipe de J. Benveniste avait mis au point un robot analyseur (basé sur la coagulation du fibrinogène) qui ne nécessitait que d'appuyer sur un interrupteur pour lancer une expérience. Le choix des conditions expérimentales (contrôle et test) était randomisé par un ordinateur et l'expérimentateur était informé des résultats lorsque l'expérience était terminée. Une expertise de cet appareil avait été mandatée par le DARPA et a été réalisée en été 2001 dans un laboratoire américain à Bethesda (*ADM 2 Chapitres 23 et 24*).¹ Dans leur rapport, l'équipe multidisciplinaire avait conclu qu'elle n'avait rien observé d'anormal concernant le robot analyseur et que les expériences qu'elle avait observées en présence de l'équipe de J. Benveniste semblaient confirmer les concepts de la « biologie numérique ». Les experts avaient cependant noté que la présence de l'expérimentateur dédié à ces expériences semblait nécessaire pour que les résultats attendus soient observés. Ils ont également rapporté qu'après le départ de l'équipe de J. Benveniste, aucun effet (c'est-à-dire aucun changement d'état du système quelle que soit l'étiquette) n'a pu être observé en utilisant ce robot. L'existence de « facteurs liés à l'expérimentateur » encore inconnus a été néanmoins suggérée par certains membres de l'équipe de supervision. La conclusion finale était que le phénomène allégué basé sur la « biologie numérique » n'était pas reproductible. Il convient de noter que cet échec était différent des échecs des expériences avec aveugle externe. Ici, le point soulevé dans l'expertise de la DARPA était la nécessité d'un expérimentateur « expérimenté » pour enregistrer un changement de l'état du système. La relation entre l'expérimentateur conditionné ou non conditionné, d'une part, et le « succès » ou l'« échec » de l'expérience, d'autre part, semble être la relation causale qui était à l'œuvre pendant les expériences de J. Benveniste. Incidemment, ceci suggère une autre interprétation du présent formalisme où ce qui est mesuré n'est pas l'état du système biologique mais le degré de conditionnement de l'expérimentateur en utilisant le système biologique comme dispositif de mesure.

Avec ce dernier épisode de l'expertise de la DARPA, qui clôt la saga de la « mémoire de l'eau », il n'est pas raisonnable de persister à considérer – comme l'ont fait J. Benveniste et ses partisans – que les hautes dilutions, la « mémoire de l'eau » ou la « biologie numérique » constituaient une avancée majeure en biologie et en médecine. Si de simples relations causales étaient réellement à

¹ Jonas WB, Ives JA, Rollwagen F, et al. Can specific biological signals be digitized? *FASEB J.* 2006;20:23-8.

l'œuvre, l'existence de la « mémoire de l'eau » et de ses avatars aurait certainement été démontrée sans les difficultés que nous avons décrites. Il est même possible que de telles corrélations non classiques entre les étiquettes et les systèmes biologiques se produisent dans d'autres laboratoires, à l'insu des expérimentateurs qui pensent avoir mis en évidence une « vraie » relation (causale). On peut également émettre l'hypothèse que l'absence de reproductibilité de certaines expériences pourrait s'expliquer par un tel phénomène non classique. Si l'on soupçonne ce type de phénomène, des expériences avec un superviseur externe peuvent aider à éclaircir le problème. Cette modélisation pourrait également être utile dans la description de l'effet placebo ou les résultats revendiqués dans certaines médecines alternatives.

En conclusion, nous avons vu comment de simples considérations basées sur la théorie des probabilités conduisent à décrire des corrélations non classiques impliquant l'expérimentateur. Cette modélisation probabiliste permet de proposer une explication alternative aux expériences de J. Benveniste où l'eau ne joue aucun rôle et où la place de l'expérimentateur est centrale. Tous les aspects des expériences de J. Benveniste sont pris en compte dans cette modélisation, y compris les « discordances cohérentes » dont nous avons largement parlé dans la première partie. Ces discordances empêchaient de démontrer la relation de causalité entre l'information supposée stockée dans l'eau et l'« effet » correspondant observé sur le système biologique. Néanmoins, parce que Benveniste a persisté dans sa quête de l'expérience définitive qui convaincrerait tout le monde, il nous a transmis un corpus d'expériences bien menées. Pour cette raison, nous devons lui exprimer notre gratitude. Il poursuivait ce qui semble aujourd'hui une chimère, mais ses données expérimentales nous permettent de suggérer l'émergence possible de corrélations non classiques entre un expérimentateur et un système biologique. Ces corrélations imitent les relations classiques, mais ne sont pas causales car aucun effet local n'est impliqué. La causalité n'est cependant pas absente, mais la cause de ces corrélations se situe au niveau des états cognitifs de l'expérimentateur et non au niveau des éléments expérimentaux.



3.2

L'au-delà de l'eau

Se non è vero è bene trovato...

(Expression italienne)

Arguments en faveur de la modélisation proposée

Le principal argument en faveur de la modélisation du chapitre précédent, est la possibilité de décrire les expériences de J. Benveniste dans un cadre logique et cohérent. Dans ce contexte, toutes les caractéristiques de ces expériences, y compris leurs « bizarreries », y trouvent leur place :

- 1) Émergence d'un « signal » biologique (changement d'état d'un paramètre d'un système biologique)
- 2) Relation significative entre « étiquettes » et états du système biologique
- 3) « Sauts » erratiques du « signal » biologique au cours des expériences à l'aveugle avec superviseur externe.

Les « sauts » au hasard qui avaient posé tant de problèmes à J. Benveniste et son équipe sont par conséquent parfaitement décrits sans qu'il soit besoin de faire appel à des explications *ad hoc* telles que des contaminations ou des « perturbations électromagnétiques ».

Bien que l'hypothèse de « mémoire de l'eau » ou toute autre explication « locale » ne puisse être formellement écartée, aucune hypothèse sur des différences physiques entre les différents échantillons n'a été introduite ; seules les « étiquettes » des échantillons permettent de les différencier.

Psychologie de la Gestalt et structure quantique

Comme nous l'avons dit, la modélisation proposée a certains points communs avec la psychologie de la Gestalt. Selon cette théorie (appelée également psychologie de la forme), l'esprit humain tend à appréhender les objets comme un tout ou une forme (Gestalt en allemand) et pas comme la somme de leurs éléments constitutifs. Le « tout » a sa propre existence indépendante. Le cube de

Necker est un exemple de la perception d'une figure en trois dimensions là où n'existe qu'un tracé en deux dimensions (**Figure 1**).

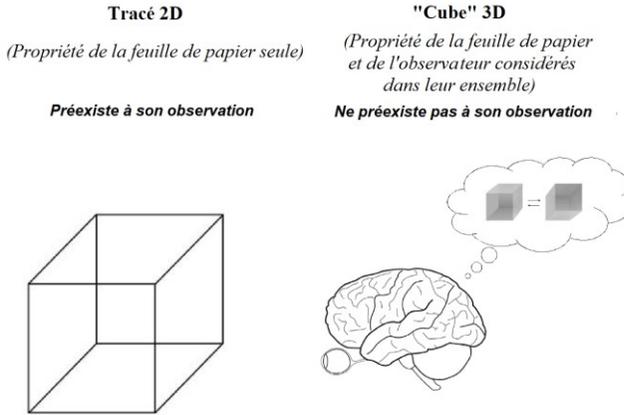


Figure 1. Le cube de Necker : un exemple d'apprentissage d'un pattern. (A) Le cube de Necker est un dessin en deux dimensions qui nous percevons comme un volume en trois dimensions suite à un apprentissage dans l'enfance. Du fait de l'ambiguïté du tracé, les perceptions avec vue de dessus ou vue de dessous alternent (une seule des deux configurations est « vue » à un instant donné). (B) Le dessin à deux dimensions est une propriété de la feuille de papier seule, tandis que l'interaction de l'observateur avec le tracé à deux dimensions crée littéralement le cube à trois dimensions qui ne préexiste pas à son observation. De même que le cube de Necker avec ses deux configurations dessus/dessous, les relations directes/inverses sont perçues comme des patterns après apprentissage (par le conditionnement classique). Le cube de Necker à trois dimensions et les relations (entre « étiquettes » et états du système) sont des constructions de l'esprit de l'observateur qui les considère dans leur entièreté et non pas comme la simple somme de leurs composantes individuelles. Des mélanges des deux relations sont possibles (par exemple, une moitié de relation directe et une moitié de relation inverse), mais chaque relation est toujours perçue ou attendue dans son entièreté par l'expérimentateur conditionnée.

Ce « cube » perçu dans ses trois dimensions n'existe que dans l'esprit de l'observateur. Par conséquent, le « cube » n'est pas une propriété de la feuille de papier où un dessin en deux dimensions a été tracé, mais est une propriété de la feuille de papier et de l'observateur pris dans leur ensemble. Le « cube » en trois dimensions ne préexiste pas à son observation mais est créé dès lors qu'il est observé.

Le lien entre la modélisation que nous avons décrite, la logique quantique et la psychologie de la Gestalt n'est pas fortuit. En effet, comme souligné par Amann, il existe une relation entre la physique quantique et les concepts de la psychologie de la Gestalt :

*« De même que dans le concept de Gestalt, la forme d'un objet quantique **n'existe pas a priori** mais dépend de l'interaction de cet objet quantique avec l'environnement (par exemple, un observateur ou un appareil de mesure).*

*La mécanique quantique et la perception de la Gestalt sont organisées de façon holistique. **Il n'existe pas nécessairement de sous-entités distinctes** avec une existence individualisée.*

*Dans le cadre de la mécanique quantique et de la perception de la Gestalt, les objets **doivent être créés** par élimination des corrélations holistiques avec le "reste du monde". »¹*

Au-delà de la « mémoire de l'eau »... sans eau

On pense généralement que le monde macroscopique échappe aux conséquences de la physique quantique du fait du phénomène de décohérence dont nous avons parlé dans la deuxième partie. Par conséquent, on considère le plus souvent que les systèmes biologiques ont un comportement qui est toujours classique. Néanmoins, certains phénomènes biologiques tels que la photosynthèse ou l'orientation des oiseaux selon le champ magnétique terrestre semblent avoir des fondements quantiques.²

De plus, des situations expérimentales avec des dispositifs macroscopiques peuvent avoir un comportement qui suit la logique quantique. Ainsi, Aerts a montré que les probabilités quantiques pouvaient être introduites comme la conséquence d'un manque de connaissances à propos des fluctuations qui se produisent durant l'interaction entre un appareil de mesure et l'objet à mesurer.³ En psychologie expérimentale, certains phénomènes cognitifs semblent obéir à des lois quasi-quantiques.⁴

La plupart des auteurs qui utilisent les probabilités quantiques en dehors de la physique quantique ne considèrent pas que les systèmes qu'ils décrivent sont

¹ Amann, A. The Gestalt problem in quantum theory: generation of molecular shape by the environment. *Synthese* 1993; 97: 125-156 (c'est moi qui souligne dans les citations).

² Lambert, N et al. Quantum biology. *Nat Phys* 2013; 9: 10-18.

³ Aerts, D. Quantum structures due to fluctuations of the measurement situations. *Int J Theor Phys* 1993; 32: 2207-2220.

⁴ Busemeyer, J.R. and Bruza, P.D. Quantum models of cognition and decision, Cambridge University Press (2012).

réellement quantiques. Des outils issus des probabilités quantiques sont simplement utilisés pour décrire des résultats qui seraient sans cela considérés comme paradoxaux (par exemple, dans le domaine de la psychologie, dans la prise de décision ou les erreurs de jugements). En effet, la physique quantique est non seulement une nouvelle physique mais également une nouvelle théorie des probabilités. L'extension des probabilités classiques avec certains outils empruntés aux probabilités quantiques (par exemple, superposition, intrication, interférences) apparaît donc fructueuse dans ces différents domaines.

Seul le futur dira si l'hypothèse que nous proposons – c'est-à-dire la « mémoire de l'eau... sans eau » – a quelque fondement et si « l'au-delà de l'eau » n'est qu'un simple palindrome syllabique ou s'il illustre le rôle de diversion que joua l'eau dans cette histoire. En d'autres termes, les chercheurs qui pensaient explorer le monde n'auraient fait qu'observer leurs propres attentes dans le miroir de l'eau... Le but de ce livre était de montrer la nécessité de ne pas se laisser fasciner par son propre reflet dans ce miroir mais de tenter de passer au travers.

L'un des intérêts de l'hypothèse développée ici est de montrer qu'il existe une voie moyenne entre d'une part l'adhésion à tout crin à la « mémoire de l'eau », aux effets des hautes dilutions et à la « biologie numérique » et d'autre part le refus total de ces expériences. Dans cette optique, les expériences concernant la « mémoire de l'eau » sont un épiphénomène dont les fondements étaient mal compris. Il est d'ailleurs possible que des phénomènes comparables soient parfois rencontrés dans certains laboratoires (ou hors des laboratoires...) mais ne soient pas reconnus comme étant liés à l'expérimentateur/observateur et son conditionnement.¹ Lorsqu'il est confronté à ce type de situation, l'expérimentateur qui pense être dans une situation causale classique ne fait que construire ce qu'il décrit et décrire ce qu'il construit.

Les expériences de la « mémoire de l'eau » auront eu au moins ce mérite de nous rappeler que nous ne devons pas confondre la représentation que nous nous faisons du monde et le monde lui-même auquel nous n'avons accès que par la médiation de nos corps matériels et de nos sens.

Et maintenant nous devons peut-être commencer à nous convaincre que décidément nous ne vivons pas dans un monde « classique »...

¹ Ainsi, en médecine, les effets attribués à divers placebos ou à l'homéopathie (une simple collection de placebos ?) pourraient s'expliquer par ce même mécanisme. L'échec des essais cliniques en homéopathie lors de la procédure en double aveugle (équivalente à une évaluation par un superviseur distant) est un argument dans ce sens.



Afin de compléter la lecture de cet ouvrage, des articles scientifiques sur le même sujet sont disponibles sur le site www.mille-mondes.fr

« Et même aussi j'ose croire que la joie intérieure a quelque secrète force pour se rendre la fortune plus favorable. Je ne voudrais pas écrire ceci à des personnes qui auraient l'esprit faible, de peur de les induire à quelque superstition ; mais, au regard de Votre Altesse, j'ai seulement peur qu'elle se moque de me voir devenir trop crédule. Toutefois j'ai une infinité d'expériences, et avec cela l'autorité de Socrate, pour confirmer mon opinion. Les expériences sont que j'ai souvent remarqué que les choses que j'ai faites avec un cœur gai, et sans aucune répugnance intérieure, ont coutume de me succéder heureusement, jusques là même que, dans les jeux de hasard, où il n'y a que la fortune seule qui règne, je l'ai toujours éprouvée plus favorable, ayant d'ailleurs des sujets de joie, que lorsque j'en avais de tristesse. »

Descartes. *Lettre à la Princesse Palatine*, novembre 1646.





TABLE DES MATIERES

Avant-propos	5
--------------------	---

Les faits

Introduction	11
En guise de résumé des phénomènes liés à la « mémoire de l'eau ».....	14
« Mémoire de l'eau » : une hypothèse inutile ?.....	20
Corrélations des mesures et causalité	29
Données expérimentales et contextualité	37
Corrélations et transmission d'informations	48
A l'impossible nul n'est tenu.....	52

La nouvelle physique

L'étrange monde quantique	61
Une seule physique quantique... plusieurs interprétations... ..	81
Nos outils d'exploration des mondes possibles.....	90
Notre première exploration des mondes possibles.....	96
Un même événement aléatoire à deux endroits à la fois ?	100
Un effet peut-il précéder sa cause ?	104
Des liens hors de l'espace et du temps ?.....	106
Quand le passé se conjugue au futur.....	110
Probabilités classiques, probabilités quantiques	115
Le vieux monde est derrière nous.....	122
L'important, c'est la relation : l'interprétation relationnelle.....	129
L'important, c'est la perception : le bayésianisme quantique	133

La possibilité d'une interprétation

La « mémoire de l'eau »... sans eau	139
L'au-delà de l'eau	156