

Modélisations quantiques de la conscience et métathéorie mathématique

Daniel Parrochia

▶ **To cite this version:**

Daniel Parrochia. Modélisations quantiques de la conscience et métathéorie mathématique. 2021. hal-03227088

HAL Id: hal-03227088
https://hal.science/hal-03227088

Preprint submitted on 16 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Modélisations quantiques de la conscience et métathéorie mathématique

Daniel Parrochia

Université de Lyon (France)

Résumé. Après quelques considérations historiques sur la notion de «conscience» et son importance grandissante en physique, nous étudions quelques tentatives récentes de modélisation quantique de celle-ci en montrant que la philosophie qui les inspire n'est pas nouvelle. Bien des thèses évoquées aujourd'hui et présentées comme ayant leur origine dans les progrès de la philosophie anglo-saxonne de l'esprit ont en réalité des résonances plus anciennes. De certaines variantes de l'interprétation de Copenhague à la théorie de Penrose en passant par celle de Wheeler, on en découvre maintes expressions, dont une très intéressante dans les textes du philosophe français Raymond Ruyer (1902-1987), lui-même fortement influencé par Leibniz et certains physiciens quantiques. Flirtant volontiers avec le panpsychisme, ces théories prétendent parfois non seulement fournir un «modèle mathématique» de la conscience, mais, dès lors que celle-ci – au moins sous une forme embryonnaire – semble partout répandue, une modélisation de l'univers lui-même. Il faut alors se garder de certains excès portant à croire qu'on pourrait prouver physiquement que l'univers est conscient. En revanche nous savons, depuis l'avènement de la physique quantique, qu'il nous faut sans doute remettre en cause le modèle d'explication de l'expérience élaborée à partir de la physique classique. Cela, sans aucun doute, pose la question de la nature exacte de la matière et des entités subjectives-objectives avec lesquelles nous sommes en interaction.

Mots-clés. Subjectivité, modélisation mathématique de la conscience, Ruyer, Wheeler, Kleiner, physique quantique.

1 Brève histoire de la conscience

La notion de «conscience», très polysémique, a une longue histoire qui la rend, a priori, difficile à cerner. En français, le mot a d'abord eu le sens de «conscience morale» et ce n'est qu'à partir du XVII^{e} siècle qu'il en est venu à désigner progressivement la conscience psychologique ou la conscience intellectuelle, avant d'évoluer vers un certain sentiment d'être au monde ou, tout dernièrement, un éprouvé lié au fait d'être un "soi" particulier, tout à fait spécifique et, par conséquent, différent de ce que peut ressentir un autre individu, qu'il appartienne d'ailleurs à l'espèce humaine ou à une autre.

Inconnu de l'Antiquité, ce terme de «conscience», qui n'était guère employé par Descartes [1], et encore très peu par Malebranche [2] n'a vraiment trouvé son sens moderne qu'avec John Locke, qui nomme explicitement "consciousness" l'identité non substantielle du sujet au cours du temps, laquelle paraît perdurer au fil de ses expériences [3].

Par la suite, et pour des raisons assez voisines de Locke – échapper au substantialisme – la tradition phénoménologique définira la conscience par l'*intentionnalité*. Mais alors que Brentano, comme jadis la scolastique ou, plus tard, Searle, ne désignent par là que cette propriété des états mentaux d'avoir un rapport à des objets, donc d'être dirigés vers eux, Husserl (voir [Husserl 13], [Levinas 63]) identifie l'intentionnalité à la subjectivité elle-même et réduit la conscience à la capacité de se transcender (voir [Parrochia 93], 883). S'il y a donc un courant philosophique qui n'a jamais cédé à ce que Wittgenstein a pu appeler «le mythe de l'intériorité», c'est bien la phénoménologie, au point que Sartre a pu soutenir que la conscience était en fait toujours en dehors d'elle-même, qu'elle s'était purifiée jusqu'à devenir «claire comme

1. Natalie Depraz recense les rares usages de *conscientia, conscius esse* et *conscience* (en français) dans [Depraz 01], au chap. 1, § 1.3, concluant que la philosophie de Descartes et moins une philosophie de la conscience qu'une philosophie de la vérité et du fondement de la science.

2. Celui-ci, à la différence de Descartes, identifie la conscience avec ce qu'il appelle un «sentiment intérieur», c'est-à-dire «ce que nous sentons se passer en nous», autrement dit, ce qu'on appellerait, en termes modernes, notre propre activité psychique. Mais cette connaissance par conscience est «imparfaite» car notre moi ou notre âme ne fait pas partie des choses qui se connaissent par elle-même (comme Dieu) ou par idées (comme les corps). Là-dessus, voir [Malebranche 42], 261-263.

3. Dans *An Essay Concerning Human Understanding*, on lit, au livre II, chap. I (Of Ideas in general, and their Original) que la conscience est «la perception de ce qui se passe dans l'esprit d'un homme» ([Locke 99], 98). Plus loin, au chap. XXVII (Of Identity and Diversity), on apprend qu'elle «accompagne toujours la pensée» ([Locke 99], 318) et qu'elle «constitue» vraiment l'identité personnelle (consciousness makes personal identity) ([Locke 99], 319).

un grand vent», et que, vide de tout contenu intériorisé, elle se limitait désormais à un «mouvement pour se fuir», un «glissement hors de soi», un «tourbillon» ou une «fuite absolue» (voir [Sartre 47]).

Cette position, sans doute excessive, fut cependant nuancée par la psychiatrie française dès les années 1960. Tout en intégrant certains apports de l'analyse existentielle et même de la psychanalyse, une théorie organo-dynamique des activités cérébro-psychiques comme celle du neuro-psychiatre Henri Ey par exemple, qui, dans le sillage de Jackson et de Janet, mettait la maladie mentale sous le signe de la dissolution et de la décomposition des fonctions cérébrales supérieures, invitait, par contraste, à voir la conscience comme une organisation de la vie psychique, structurant l'ordre associé à son champ phénoménal (voir [Ey 54], 679). Alors que Kant se refusait à faire du moi, brisé par la ligne du temps en «je» divers, une entité unique et connaissable, Ey n'hésitait pas à écrire que la conscience était au temps «ce que le corps est à l'espace : un substratum de notre expérience sensible» (voir [Ey 54], 716). Ce substratum ou cette expérience étant plutôt, néanmoins, de l'ordre d'un «champ phénoménal», autrement dit un amalgame existentiel constituant l'intentionnalité de la conscience, il en venait, dans son ouvrage majeur, intitulé *La Conscience*, à définir le fait d'être conscient comme celui de «disposer d'un modèle personnel du monde» (voir [Ey 63], 36). La formule ouvrait ainsi, sans le savoir, la porte à la modélisation, même s'il n'était pas question, à l'époque, de modélisation au sens scientifique du terme.

Avec l'avènement de l'intelligence artificielle et des réseaux neuromimétiques, de nouveaux paradigmes virent le jour qui allaient alimenter, pour longtemps, la réflexion des supposées «sciences cognitives» et l'orienter, le plus souvent, dans une direction réductionniste, puisqu'il s'agissait essentiellement – quel que soit le modèle invoqué (et, cette fois-ci, il était désormais présumé «scientifique») – d'expliquer les fonctions supérieures du cerveau par des mécanismes computationnalistes ou neurophysiologiques les rendant possibles. De Simon à Minsky, de Mc Culloch et Pitts au néo-connexionnisme des années 1980, de Hebb à Kohonen puis à Edelman, les modélisations et leurs commentaires – modulaires, fonctionnalistes, physicalistes et autres (Fodor, Dennett, Searle, Pylyshyn, Putnam, Block...) – ont fait florès, les recherches concrètes n'accouchant au final, très souvent, que de modèles locaux plus ou moins dégradés. C'est ainsi que virent le jour des «systèmes experts» ou des mécanismes de reconnaissance de formes, juxtaposant des règles et des moteurs d'inférence ou, dans le cas des réseaux de neurones formels, alliant des algorithmes et des arguments de convergence n'ayant que de lointains rapports avec l'esprit.

Tout cela alla bon train jusqu'à ce qu'une réaction se fasse entendre. L'affirmation

d'une spécificité de la conscience (voir [Nagel 74]), suivi de la conviction, de Eccles, que si celle-ci n'est pas totalement séparée du corps, elle pourrait toutefois intervenir sur les constituants des synapses du cerveau pour influencer les événements en cours, et serait même susceptible, à la limite, de «contrôler» ce dernier (voir [Eccles 94]), a soudain émergé en opposition totale au matérialisme régnant jusque-là. Tout en renouant, sans le savoir, avec des thèses anciennes relayant les intuitions des premiers physiciens quantiques, elle a ainsi ouvert la porte à un autre type d'approche dont Chalmers (voir [Chalmers 21]), récemment, s'est fait le porte-parole, débouchant sur de nouvelles modélisations d'un genre très différent des précédentes.

2 L'importance grandissante de la conscience en physique

Même si la philosophie anglo-saxonne s'est intéressée à la question de manière plus prononcée ces derniers temps, les liens de la mécanique quantique et de l'esprit ne sont pas nouveaux. L'irruption de l'esprit dans la théorie quantique s'est produite, comme l'a bien montré Michel Bitbol (voir [Bitbol 05] 38-39), dans le contexte de la question de la mesure, la physique quantique – du fait de l'implication d'observateurs dans le résultat même des expériences – semblant remettre en cause l'hypothèse d'un réalisme scientifique fort ou celle, non moins habituelle, d'une ontologie exclusivement physicaliste. L'école de Göttingen-Copenhague, de ce point de vue, a joué un grand rôle dans ce rapprochement.

Heisenberg évoquait déjà, en son temps une «crise de la conception matérialiste» du monde (voir [Heisenberg 62], 16). Il soulignait que la croyance en une réalité objective des particules élémentaires s'était étrangement dissoute, «non dans le brouillard d'une nouvelle conception de la réalité obscure ou mal comprise, mais dans la clarté transparente d'une mathématique qui ne représente plus le comportement de la particule élémentaire mais la connaissance que nous en possédons» (voir [Heisenberg 62], 18). Dès lors, le sujet de la recherche en physique n'était plus la nature en soi mais la nature livrée à l'interrogation humaine. Dans le sillage de Bohr, il affirmait que, désormais, l'image de la nature n'était que l'image de nos rapports avec elle. Autrefois, oui, l'homme se trouvait face à face avec une nature objectivée, différente de lui. Mais avec la physique quantique, où qu'il regardât, il se retrouvait face à lui-même. L'homme et sa science cessaient ainsi d'être des spectateurs de l'univers pour devenir des acteurs à part entière, dans un théâtre empli d'eux-mêmes et où tout le monde jouait un rôle.

Arthur Mach, physicien autrichien, surenchérissait en insistant, quant à lui, sur la «désubstantialisation» de l'univers physique. «D'une certaine façon, écrivait-il, il ne serait pas impossible de prétendre que les états observés d'un atome sont provoqués par nous» (voir [March 65], 206). La notion de *substance*, en particulier, était entièrement réfutée, selon lui, par le type de statistique relative aux particules, et notamment par le principe d'exclusion de Pauli, qui interdit aux paires d'électrons d'exécuter un mouvement exprimé par les mêmes nombres. Or – s'interrogeait-il – comment les électrons peuvent-ils savoir quels sont les états interdits ? Sans doute – dira-t-on – parce qu'ils sont "influencés" par les autres. Mais comment s'exerce cette influence, qui peut d'ailleurs aller aussi loin qu'on veut ? En fait – observait March – la physique ne connaît pas de forces susceptibles d'agir à grande distance entre deux électrons. Selon lui, le principe de Pauli nous obligeait donc «à tirer cette conclusion que les électrons ne sont pas matériels au sens du langage courant, mais qu'ils doivent avoir une essence des plus singulières» (voir [March 65], 210).

Un argument en faveur de cette thèse était que les électrons, comme toute particule, ne sont connus qu'indirectement. «Il y a des phénomènes dont nous disons, pour les expliquer, qu'ils sont causés par des corps minuscules et imperceptibles, possédant une masse et une charge électrique déterminées» (voir [March 65], 211-212). Sur la base de cette hypothèse, diverses expériences permettent alors de donner deux nombres déterminés concordants avec ces grandeurs supposées. De plus, par diverses manipulations, nous pouvons aussi mettre en évidence une interaction entre ces particules et la matière (noircissement d'une plaque photographique, gouttelettes de brouillard engendrées dans une chambre de Wilson, etc.). Ce type d'expérience a permis de relever par instants la position de l'électron, donnée par la fonction de Schrödinger $\psi(x, y, z)$, laquelle obéit à une certaine équation différentielle. Cela donne certainement une *structure* à l'électron, mais pas forcément une *substance*.

L'importance du principe de Pauli, selon March, tenait dans le fait qu'il éliminait cette dernière possibilité. Si les électrons étaient des corps minuscules mais substantiels, des systèmes comme l'atome pourraient être composés d'un certain nombre d'électrons qui se trouveraient tous dans le même état, lequel serait décrit par la fonction ψ. «Si, par contre, écrivait le physicien, la particule n'a pas de substance, deux électrons, ou plus, appartenant au même système n'auront pas le même état. Car si l'on peut les énumérer comme deux, ou plus, c'est qu'il y a en eux quelque chose qui les distingue les uns des autres. Mais s'ils n'ont pas de substance cette particularité leur manque en sorte qu'il est impossible de relever le même état pour une pluralité d'électrons. Le système ne peut alors jamais posséder plus d'un électron dans un état donné...» (voir [March 65], 213-214).

Le principe de Pauli, selon March, invitait donc à conclure que les électrons, qui sont formés de qualités et de rien d'autres, *n'ont pas de substance*. En particulier, ils n'ont pas de noyau immuable qui préserverait leur identité et auquel les qualités viendraient s'accrocher «comme des vêtements dans une armoire». «Voilà pourquoi nous ne pourrons jamais affirmer que la particule que nous rencontrons est "la même" que celle déjà rencontrée auparavant» (voir [March 65], 214). Il s'ensuit une véritable *dématérialisation* de la particule élémentaire, qui est un trait hautement caractéristique de la nouvelle physique [4].

Que les particules élémentaires ne soient pas, à proprement parler, de la matière au sens où l'entend la physique classique ou notre expérience macroscopique ne prouve pas encore, cependant, qu'elles peuvent avoir un rapport quelconque à l'esprit ou à la conscience. Mais des phénomènes particuliers, propres à la physique quantique, y mènent par une autre voie.

Considérons, par exemple, l'intrigante expérience (quantique) des fentes d'Young percées dans un écran placé devant une plaque de réception. Elle semble montrer que chaque particule passe simultanément à travers les deux fentes et interfère ainsi avec elle-même, traduisant une superposition d'états qui cesse avec la présence d'un détecteur. La situation avait déjà suggéré à Pascual Jordan que les observations ne se contentent pas, d'une façon générale, de *perturber* ce qui doit être mesuré, mais que, d'une certaine manière, elles le *produisent*, de sorte que, selon cette interprétation, c'est l'observateur qui se trouve à l'origine des résultats des mesures.

Les expériences à choix retardés envisagés par Wheeler dès les années 1970 ne firent que confirmer cette interprétation : des mesures effectuées sur les «chemins» des particules (généralement, des photons) après qu'elles auraient dû choisir de prendre une des «voies» ou de rester dans une superposition d'états, confirmaient les prédictions de la mécanique quantique. On perdait l'interférence dès qu'on mesurait le trajet du photon, et ce, même avant que son arrivée au détecteur ne soit finalement enregistrée. En gros, tout se passait comme si la nature "savait", non seulement qu'on cherchait à regarder, mais même qu'on prévoyait de le faire. Il était alors difficile d'éviter l'implication de la conscience des observateurs dans la mécanique quantique.

Face à ce conflit évident entre la description de l'univers physique et les pratiques

4. Selon March, les particules élémentaires n'étaient ni ponctuelles, ni étendues, conviction à laquelle il était arrivé à l'issue de ses recherches sur l'existence d'une longueur minimale en physique. Là-dessus, voir [Kragh 95], 425). Bien que sa théorie, qui intéressait Heisenberg, soit restée marginale, son approche philosophique de la physique quantique est assez caractéristique de l'école de Bohr et Heisenberg.

permettant son attestation expérimentale, une issue se profilait donc via des solutions «mentalistes», telles que celles proposées successivement par C. G. Darwin (1929), J. von Neumann (1932), F. London et E. Bauer (1939), D. Bohm (1951) et E. Wigner (1961). Ces interprétations accordaient à la conscience un rôle différent de celui des instruments inanimés, admettant notamment que celle-ci puisse forcer à la détermination l'état de ce qu'elle prenait pour objet, ce qui signifiait globalement, pour résumer un point de vue largement connu au moins depuis Wigner, qu'il y a «une influence de la conscience sur le monde physique» (voir [Wigner 79], 181). Ainsi que Wheeler le développa plus tard – les observateurs étaient en fait des *participants* à l'évolution de l'Univers, et cela, depuis ses tout débuts. Selon ses propres termes, nous vivions donc dans un univers *participatif* (pour une analyse de ces expériences, voir [Parrochia 19]).

Comment une telle influence de la conscience sur le monde physique pouvait-elle être possible ? Comment pouvait-elle être expliquée ?

3 La réflexion philosophique sur la conscience

Pour répondre à ces questions, il s'est alors agi de définir plus précisément la conscience, en discernant à la fois ce qui pouvait être compris d'elle en termes de fonctions – et ainsi relever d'une perspective fonctionnaliste, épiphénoménaliste ou réductionniste – et ce qui échappait à celle-ci, à savoir l'expérience consciente elle-même ou, comme l'écrivirent les philosophes anglo-saxons, réutilisant un terme inventé par Charles S. Peirce en 1866, mais seulement défini rigoureusement par C. I. Lewis en 1929 (voir [Lewis 56]), les fameux "qualia".

Ces "qualia" ou qualités ressenties de certains de nos états mentaux (sensation visuelle de rouge, sensation olfactive de jasmin, expériences de plaisir ou de douleur, etc.) semblent être des expériences purement subjectives parfaitement incommunicables et qu'on ne voit pas bien comment expliquer car, à la limite, le fonctionnement cérébral pourrait parfaitement s'en passer tout en restant le même.

Par ailleurs, si, par empathie, on peut à la rigueur tenter de se mettre à la place d'un autre être humain, accédant ainsi à un semblant d'équivalent de ses propres représentations (même si ce ne sont pas, à vrai dire, tout à fait les mêmes), en revanche, personne ne saura jamais ce que ressent vraiment une chauve-souris (voir [Nagel 74]). En conséquence, le problème de la conscience, à ce niveau-là, est, selon Chalmers (voir [Chalmers 95] ; [Chalmers 96]), un problème vraiment «difficile» et

qui semble trahir une spécificité du mental que n'arriveront jamais à expliquer les réductions ou décompositions physicalistes.

Aussi bien Chalmers a-t-il proposé d'élargir l'ontologie des sciences à ce genre de propriétés purement expérientielles et de compléter le système des lois de la physique par ce qu'il appelle des lois fondamentales psycho-physiques – cela pour un coût jugé parfois excessif : la dissociation entre fonctionnement neurophysiologique et expérience consciente, c'est-à-dire un nouveau dualisme [5].

En Europe, la réflexion philosophique avait pris une toute autre voie. L'implication de la conscience dans les expériences quantiques donna à penser que les liens pouvaient aussi bien être lus dans l'autre sens. Dès le milieu du XX^{e} siècle, un physicien comme Pascual Jordan considérait que tout individu ayant une unité organique et une unité de comportement pouvait être rattaché (par les gènes) à des systèmes de l'ordre de grandeur des systèmes atomiques (voir [Jordan 41], [Broglie (de) 47], [Bouchet 49]). Le philosophe français Raymond Ruyer (1902-1987) en tira l'idée que le champ de conscience, bien que sans commune mesure avec les atomes ou les particules, avait cependant le même type d'unité ou de liaison que ceux-ci, impliquant une sorte de survol absolu et de trans-spatialité. Ruyer allait même beaucoup plus loin en affirmant qu'un champ de conscience ou de subjectivité était un domaine de liaisons type, sur le modèle duquel il fallait concevoir les domaines de liaisons microscopiques (voir [Ruyer 66], 112). Ce n'était pas, en fait, la microphysique qui était le modèle de la conscience, mais l'inverse, le champ de conscience et son domaine de survol absolu qui constituaient le modèle des entités microphysiques.

4 La théorie de Ruyer

Le fait remarquable est que les thèses de Ruyer anticipaient d'environ quarante ou cinquante ans, sinon plus, celles qui seront soutenues par la philosophie anglo-saxonne à partir du célèbre article de Nagel (voir [Nagel 74]).

Au début de son ouvrage *Paradoxes de la conscience et limites de l'automatisme*, Ruyer posait un constat qui sera celui de tous les auteurs ayant pris au sérieux les thèses de Nagel, de Chalmers et de leurs épigones, et qui alimenteront, *in fine*, des positions qu'on qualifiera plus tard, comme on le verra plus loin, de «panpsychistes».

5. Le «hard problem» de Chalmers a donné lieu à toute une littérature, dont on trouvera quelques références sur le site https ://philpapers.org/rec/ROCTHP, une page des «philpapers» consacré à un article de Teed Rockwell (voir [Rockwell 14]).

«La qualité sensible, comme la conscience même – écrit en effet Ruyer – est une émergence mystérieuse pour la science classique, pour la physique mécaniste, qui a pris son vrai départ au XVII^{e} siècle, précisément en renonçant à comprendre la qualité» (voir [Ruyer 66], 29).

Mais, une trentaine d'années avant cette remarque, la première partie du livre de Ruyer intitulé *La conscience et le corps*, déployait déjà une critique extrêmement vive de la plupart des doctrines philosophiques ayant tenté d'expliquer les rapports de la conscience et de l'organisme (parallélisme, épiphénoménisme, spiritualisme dualiste, monisme neutre, idéalisme critique) au profit d'une doctrine qu'il baptisait «inverse de l'épiphénoménisme» (voir [Ruyer 20], 30) ou «épiphénoménisme retourné» (voir [Ruyer 20], 54) et qui pose que les subjectivités seules sont réelles.

4.1 L'épiphénoménisme retourné

L'argumentation de Ruyer est assez subtile. Le parallélisme psycho-physique est, selon lui, généralement faussement compris, car totalement décalé : on va le situer par exemple entre l'onde du physicien et la sensation subjective de lumière dans le cerveau. Mais il y a là un certain flou et il faut être beaucoup plus précis. En réalité, il y a – d'une part – une correspondance entre la lumière en soi (les ondes lumineuses réelles) et la sensation subjective de lumière, ou encore, entre les ondes objectivement décrites par le physicien et un certain étage de l'aire de Broadmann activé au moment de la sensation ; et, d'autre part, il y a parallélisme entre lumière en soi et lumière du physicien, ou encore, entre sensation de lumière et cortex cérébral.

Sont donc rejetés l'épiphénoménisme (qui dénie toute efficacité à la série subjective), le spiritualisme dualiste (qui, à l'inverse, fait du corps l'organe de l'esprit), le monisme neutre (qui n'admet que la sensation et nie l'existence réelle du sujet comme de l'objet, sorte d'avatar de l'idéalisme berkeleyen), enfin celle de l'idéalisme critique, proche de la précédente puisque, même si elle distingue le sujet pensant de ses contenus de pensée, elle se refuse de faire de celui-là une réalité en soi.

Mais nous ne sommes pas des ramassis de sensations : celles-ci sont prises dans ce que Ruyer appelle un «champ de conscience», lequel est bien une réalité en soi. Dès lors, le système nerveux ne représente que l'apparence, sous forme d'objet, de cet être tout à fait réel qu'est notre champ de conscience. D'où la thèse générale de Ruyer qui, sous sa forme positive, s'énonce ainsi :

«Nous sommes donc, comme tous les êtres, de pures subjectivités. Notre organisme

lui-même (système nerveux exclu) est un ensemble de subjectivités, d'un ordre différent de la subjectivité consciente. Nous ne sommes objets qu'en apparence, c'est-à-dire que notre corps n'est un objet qu'abstraitement, dans la subjectivité de ceux qui nous observent (ou même, partiellement, dans la nôtre, lorsque nous nous regardons dans un miroir, ou que nous nous entrevoyons comme image particulière dans notre champ visuel)» (voir [Ruyer 20], 53) [6].

Autrement dit, Ruyer se faisait le défenseur d'une sorte de réalisme particulier et qu'on pourrait qualifier, en souvenir de Leibniz, de monadologique. Pour lui, les seules réalités existantes sont les monades, qui sont, en quelque sorte, comme chez Leibniz, des points de vue sur le monde. Mais, à l'intérieur de celles-ci, il faut distinguer les monades conscientes et les autres, qui sont d'un ordre différent. On a donc affaire à un pan-subjectivisme (expression que nous préférons à pan-psychisme), tous les sujets, apparemment, n'ayant précisément pas une "psuchè", c'est-à-dire un psychisme ou un champ de conscience comparable à celui dont l'homme est doté.

On pourrait fort bien illustrer ces propos à l'aide de considérations bio-éthologiques : dans *Mondes animaux et mondes humains*, J. von Uexküll décrivait toute sorte de modes de rapport au monde, de la part de vivants plus ou moins élevés dans la hiérarchie organique universelle. Certains de ceux-ci ne possédent qu'un milieu d'action (Umwelt), comme, par exemple, la tique, qui ne réagit qu'à l'acide butyrique ; d'autres ont, semble-t-il, une vague conscience de l'environnement géographique qui les entoure (Umgebung), mais le perçoivent de façon souvent très différente de l'homme (ils ne voient pas forcément toutes les couleurs et vivent la succession de leurs sensations selon des rythmes différents (animaux à film lent, comme les poissons, ou à film rapide comme l'escargot). Seul, l'homme, cependant, possède un Welt, c'est-à-dire évolue dans un monde signifiant (voir [Uexküll (von) 65]).

L'idée que les entités ou individus, au-delà de leur apparence, sont des êtres en soi et – en ce sens – des sujets et non de simples ob-jets dans un champ de conscience, a des aspects satisfaisants. Elle permet d'éviter notamment cette difficulté majeure de

6. Philippe d'Arcy, l'un des auteurs qui ont le mieux compris R. Ruyer, montre très bien, dans *La Réflexion*, comment le sujet voit le monde comme un sous-marinier dans un périscope, les objets n'étant situés à distance qu'à force d'habitude et par l'application d'une sorte de «règle de trois» permettant de convertir les mini-images rétiniennes en images «grandeur nature». La conscience suppose donc le corps ou l'organisme comme surface absolue, et cette conception permet alors de distribuer les philosophies en fonction des stades de la réflexion auxquelles elles sont prioritairement attachées (conscience naïve irréfléchie, découverte de la subjectivité (Descartes), stade du reflet (Pascal), stade du miroir (Kant, la phénoménologie), stade du milieu lumineux (Spinoza, Leibniz, Nietzsche...) (voir là-dessus [Arcy (d') 72]).

l'idéalisme subjectif de Berkeley, à savoir que, lorsqu'on quitte une pièce, l'ensemble de ce qu'elle contient pourrait bien disparaître, dès lors qu'*être* n'est autre chose qu'*être perçu* (*esse est percipi*).

Il y a cependant un prix à payer pour défendre cette thèse ruyerienne. C'est la forme négative de son propos :

«Nous ne sommes pas, et les autres êtres ne sont pas plus que nous, réellement incarnés. La dualité du corps et de l'esprit est illusoire, *parce que nous n'avons pas de corps*, parce que notre organisme n'est pas un corps. (...) Nous ne connaissons jamais que le corps des autres ; nous n'intuitionnons jamais que notre conscience» (voir [Ruyer 20], 53-54).

Il est évidemment assez légitime de penser que nous ne voyons pas les êtres là où ils se trouvent réellement en tant qu'êtres-en-soi, mais que nous les voyons au fond de notre rétine. Que celle-ci, en effet, subisse quelque altération (décollement, déchirure ou autre), notre vision de la "réalité extérieure" en sera profondément affectée. L'ensemble de l'«objectivité», le prétendu «monde extérieur» est donc, en réalité, intégralement compris dans notre champ de conscience, et il en va de même pour tous les êtres conscients.

«L'hypothèse à laquelle nous sommes conduits par l'examen critique des doctrines précédentes, conclut Ruyer, est donc un *épiphénoménisme retourné*[7]. Toute la réalité, toute l'efficacité, appartient au subjectif. L'objectif n'est qu'un épiphénomène, qui, par lui-même, n'est ni réel, ni agissant. Le monde des objets comme tels n'est rien en dehors des consciences des animaux et des hommes, puisqu'il ne se définit qu'abstraitement dans ces consciences. Les consciences supprimées, le monde physique ne s'évanouit pas : il n'y a plus d'objets, mais la vie personnelle et subjective des êtres continue» (voir [Ruyer 20], 54).

Cette thèse (ou hypothèse) de Ruyer, dont il rappelle l'origine leibnizienne et la reprise plus récente dans des œuvres comme celle de Strong ou Russell (dernière manière) suppose pour être correctement établie un nouvel examen du mécanisme de la connaissance et une distinction précise entre subjectivité et subjectivité consciente.

Pour Ruyer, le mécanisme de la connaissance, qui revient, en quelque sorte, à transformer une subjectivité en un objet, consiste en fait à associer une structure à une forme, ce qui fait de la structure un aspect nécessairement dégradé de la forme, c'est-à-dire ce qui est connu d'elle et qui coïncide le mieux avec elle. Dans sa démarche

7. C'est nous qui soulignons.

progressive, la science s'est d'abord livré à une décomposition du réel qui a fait apparaître des éléments. Mais, arrivée à l'échelle subatomique, elle a dû «se résoudre à construire les atomes eux-mêmes, non avec d'autres atomes, mais avec des ondes, sans support, c'est-à-dire avec des liaisons pures» (voir [Ruyer 20], 59). Parvenue là, la science ne peut aller au-delà. *«Les liaisons, quelles qu'elles soient, ne sont jamais à proprement parler connues. Elles demeurent un pur fait. Elles ne sont donc jamais comprises que d'une manière métaphorique et analogique»* (voir [Ruyer 20], 59-60). Il y a donc, dans toute liaison, quelque chose d'à la fois paradoxal et, en même temps, nécessaire : «la structure d'un atome, son unité, tout comme la structure et le fonctionnement unifié du cerveau, suppose une "âme" de liaisons inaccessibles à la connaissance»(voir [Ruyer 20], 64).

On arrive donc à la formulation d'un principe au fond assez comparable au principe d'indétermination de Heisenberg pour la physique quantique :

«Il faut choisir : si l'on a la prétention de tout connaître des êtres physiques, l'intuition de la conscience devient inintelligible ; si l'on veut réserver la place de la conscience, il faut reconnaître déjà une trame d'inconnaissable dans le monde physique» (voir [Ruyer 20], 64).

Par ailleurs, la distinction entre subjectivité et subjectivité consciente peut se décrire à partir de l'expérience de pensée de leur disparition. «Toute rupture de liaison, non seulement dans un animal ou une plante, mais dans toute réalité physique, manifeste (...) la disparition réelle d'un être authentique et une véritable mort» (voir [Ruyer 20], 75). Mais, bien sûr, une subjectivité consciente s'accompagne de tout un ordre de liaisons qui peuvent être altérées ou perturbées, et aussi, en fonction de ruptures partielles, qui peuvent aussi expliquer les différents mécanismes de la mémoire ou de l'oubli, et notamment les fluctuations des souvenirs.

Avec son épiphénoménisme retourné, Ruyer pose donc que toute forme vraie est une subjectivité, et la réalité une entité dont la structure n'est qu'une apparence et l'élément un résidu ou «le point de fuite de la connaissance dans le monde inaccessible de la métaphysique transcendante» (voir [Ruyer 20], 75).

Il reste alors à préciser la solution trouvée : en quoi consiste ce qui a pu être appelé par le philosophe un «champ de conscience», associé à ce type de subjectivité particulier qu'est la subjectivité humaine.

4.2 L'idée de *surface absolue*

Notre champ sensoriel s'étale devant nous et nous avons l'impression que nous le survolons. En réalité, les images du monde extérieur s'inscrivent sur notre rétine, mais il n'y a pas de super-rétine en nous pour percevoir la première. À raisonner ainsi, on serait d'ailleurs pris dans le paradoxe d'une régression indéfinie. Il faudrait à nouveau une autre rétine – une super-super-rétine, cette fois-ci – pour voir la première super-rétine, et ainsi de suite. En réalité, il n'y a aucune super-rétine dans une dimension perpendiculaire à notre champ visuel, qui est ainsi une surface intuitionnée sans troisième dimension. Pourtant, tous les détails de l'étendue sensible sont présents et visibles, et celle-ci est extériorité et distinction réciproque de parties, malgré l'absence de tout centre de perspective. En d'autres termes, comme l'écrit Ruyer, ce qu'on appelle «la conscience» est «une sorte de *surface absolue*, ce qui heurte violemment en nous le sens géométrique, éduqué par le monde de la perception» (voir [Ruyer 20], 82).

Le point de vue de Ruyer consiste à admettre ce paradoxe comme tel : ce qu'on appelle la subjectivité n'est pas, à proprement parler, un sujet conçu comme centre de perspective. C'est le caractère de toute forme absolue en tant qu'elle exprime la non-ponctualité de l'étendue sensible. *«Il est* – écrit Ruyer en soulignant l'importance de cette remarque – *dans la nature de toute forme de paraître "se survoler" elle-même. Chaque fois qu'un ensemble vrai, une vraie forme, un vrai domaine indivisible de liaison existe, un point mythique de perspective est virtuellement créé.»* (voir [Ruyer 20], 90).

Ruyer montre alors que le modèle objectif d'une telle subjectivité consciente ne peut pas être un modèle mécaniste au sens matérialiste du mot (voir [Ruyer 20],108). En ce sens, une cellule photo-électrique (comme on commençait d'en accompagner, à l'époque, les appareils photographiques) ne pouvait être pour lui qu'une caricature de récepteur sensoriel. Et il aurait sans doute dit la même chose des rétines artificielles comme le perceptron de Rosenblatt s'il l'avait connu.

Il faut alors préciser ce que veulent dire des expressions telles que «une forme vraie» ou «un ensemble vrai».

Ce ne sont pas seulement des formes ou des ensembles au sens de la Gestalt-theorie. Celle-ci, sans doute, a eu le mérite de critiquer la conception de la perception qui en faisait une mosaïque d'éléments indépendants rassemblés de façon purement extérieure, voire contingente. Nous percevons en réalité des ensembles, des formes, comme le prouvent d'ailleurs nombre d'illusions d'optique auxquelles, de ce fait-même, nous

sommes aussi soumis : incertitudes sur le choix du fond et de la forme, effets de bords et décalages divers (voir en Fig. 1 les fameuses illusions de Hering, Zöllner ou Müller-Lver).

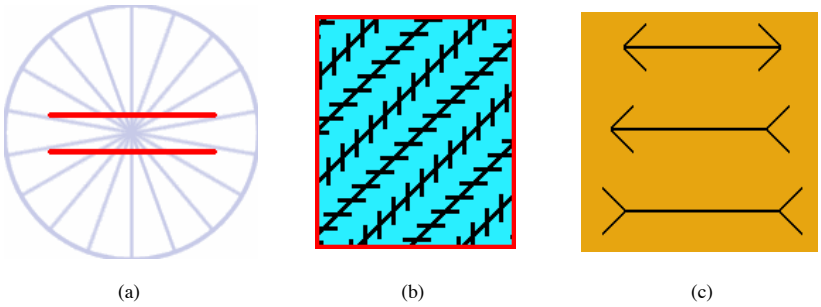


FIGURE 1 – Les illusions de Hering (a), Zöllner (b) et Müller-Lyer (c)

Mais l'explication des configurations par l'appel à un dynamisme physiologique élémentaire est insuffisante, car il y a, à côté de ces illusions d'optique, des illusions «de signification» ([Ruyer 20], 116), telle, par exemple, la constance psychologique des dimensions, malgré la variation de la projection rétinienne. Il existe en outre, en physique, des liaisons à distance qui ne s'expliquent pas par des dynamismes élémentaires impliquant des guidages ou des glissières.

Ce qu'il faut entendre alors par «forme», ou plutôt «forme vraie», n'est donc pas une simple configuration spatiale. » *Une forme* – écrit à nouveau Ruyer en soulignant – *qui n'est que la résultante d'un jeu d'éléments, qui ne dirige pas ses éléments, ne se les subordonne pas, n'est pas une forme, ce n'est qu'un aspect*» (voir [Ruyer 20], 119).

Au contraire, les «vraies formes», c'est-à-dire les formes conscientes sont des formes qui se voient elles-mêmes et qui ne se perdent pas de vue. Et il est de la nature de ces formes de fonctionner selon un mode de causalité finaliste. En conséquence, ces formes absolues impliquant causalité de l'idée et finalité «contiennent tout ce qu'il y a de réel et d'effectif dans ce qu'on appelle traditionnellement l'Esprit, la Conscience, la Pensée, au sens moderne du mot comme au sens cartésien. Mais il n'y a pas une âme distincte du corps et qui viendrait se rajouter à sa mécanique. En réalité, «l'âme est la forme "en soi" qui est observée comme corps» (voir [Ruyer 20], 123). Il est aussi de la nature d'une vraie forme ou forme en soi d'échapper au moins partiellement à la localisation, à la segmentation et à la vectorialisation, ce qui invite à reprendre – comme Bergson l'avait déjà fait – la question des localisations cérébrales ou celle du réflexe.

Cette conception débouche évidemment sur la question des rapports de la conscience et des organismes en général. Faut-il attribuer une conscience à tout être vivant ? N'y a-t-il qu'une différence de degrés entre les subjectivités des êtres, qu'ils soient ou non dotés d'organes, de sens ou de système nerveux ? Ruyer répond de façon plutôt plus prudente que les auteurs contemporains : il y a des propriétés de la conscience qui semblent liées à son caractère de surface absolue (perception, finalité instantanée, intelligence) et qui semblent solidaires de la présence d'un système nerveux compliqué. Mais il en est d'autres qui ne sont pas liées à cette forme d'ensemble mais appartiennent à toute cellule vivante et pourraient n'être qu'un effet de sommation de propriétés cellulaires.

Cette dualité entre unité d'organisation et unité de champ de conscience est une difficulté de la théorie, illustrée d'ailleurs, en biologie, par le mystère du mimétisme lorsqu'on rejette l'explication par la sélection naturelle : comment l'insecte a-t-il été capable de se voir lui-même du dehors au point de se rendre semblable à son environnement ou à un autre insecte – par exemple, plus toxique que lui – afin d'échapper à ses prédateurs ? Comme le note encore Ruyer, «l'unité-organisation se montre apparemment capable d'une véritable finalité, d'une finalité par "survol", et pourtant, il est impossible de l'assimiler à l'unité du champ de conscience qui est la condition normale d'une telle finalité» (voir [Ruyer 20], 155).

Ce qu'on appelle «l'instinct» chez les animaux, est peut-être le moyen terme qui permettrait d'assurer la liaison entre les deux formes d'unité, au sens où on pourrait le voir comme une sorte de prolongement de l'organisation dans la conscience, l'unité réelle coordonnant le développement cellulaire dans l'embryogénie du système nerveux de l'animal n'étant pas essentiellement distincte du domaine qui constituera spécialement sa conscience. L'écureuil qui, isolé dans une chambre, court cacher une noix avec les mouvements caractéristiques d'enfouir et tasser la terre alors qu'il ne dispose que d'un parquet, montre que son champ de conscience n'est qu'une partie de sa réalité biologique. de même le tâtonnement intuitif, dans un acte intelligent, semble dirigé par une organisation interne qui cherche à assimiler le milieu à sa structure. La conscience ne fait donc pas vraiment double emploi avec l'"entéléchie" dont elle est, au fond, un domaine.

Finalement, la conscience est une surface étroitement rattachées aux subjectivités organiques d'un "soi" comparable au "soi" freudien, un ordre d'affleurement, et cela, même si elle domine ou impose son unité à ces subjectivités. Le corps réel n'étant qu'un ensemble de subjectivités inconscientes, la conscience devient ainsi, pour Ruyer, comme déjà pour Freud ou pour Nietzsche, l'instrument du corps. Mais les subjectivités inconscientes, le vouloir-vivre commun aux animaux inférieurs et à

l'homme a peu d'intérêt en tant que tel. Ce qui est important est qu'il s'exprime, d'une manière absolument originale, grâce à la nature particulière de la conscience humaine. Les valeurs que celle-ci peut alors mettre en avant sont élaborées en interaction avec la vie organique.

4.3 Surfaces absolues et microphysique

À la fin des *Paradoxes de la conscience*, Ruyer résume son propos en affirmant que la conscience est évidemment irréductible à un montage mécanique quelconque et que son fonctionnement est plutôt solidaire d'un certain nombre de paradoxes. Il écrit notamment ceci : «le paradoxe fondamental, origine de tous les autres, est qu'un domaine de conscience, primaire ou à perception, est en "survol absolu". (...) Ce caractère n'a pas d'analogue dans la physique classique, il n'a d'analogue qu'en microphysique, et cela pour la raison que les domaines de conscience sortent directement des domaines microphysiques, qui sont déjà, eux aussi, en autosurvol et qui échappent aux propriétés "de proche en proche" de l'espace-temps commun, pour l'excellente raison qu'ils le constituent secondairement, par effet statistique» (voir [Ruyer 20], 285).

On peut sans doute encore saluer, dans ce texte, certaines de ses anticipations, peut-être prémonitoires : «Il n'est pas du tout exclu qu'un microphysicien, ou qu'un microbiologiste parvienne à "créer" un être vivant et conscient en provoquant, par exemple, l'accolement de domaines chimiques à liaisons délocalisées et en opérant sur des macro-molécules. En fait, déjà, on peut fractionner et resouder certains virus ; un biologiste peut opérer des greffes d'organes ou d'aires embryonnaires, dédoubler ou souder des individus vivants.» ([Ruyer 20], 285).

Mais tout cela ne dit pas vraiment ce qu'est une surface absolue ou en autosurvol et il faut, pour aller plus loin, bien étudier la situation quantique dont la situation conscientielle est supposée être l'analogue.

L'introduction de la dualité onde-corpuscule par Louis de Broglie et l'assimilation du mouvement des particules à l'image d'un mouvement ondulatoire avait posé, en physique, la question de savoir où était la vraie réalité : était-ce dans les particules ou dans les ondes ? Schrödinger, par exemple, mettait plutôt le réel du côté des ondes et considérait les particules comme provoquées par leurs interférences. Comme dans l'énergétisme défendu par Ostwald au XIX^{e} siècle, les particules n'étaient alors, dans cette théorie, que des gouttes d'énergie concentrée. Le problème d'une telle conception, outre le fait que rien ne permettait vraiment de l'étayer, était que l'espace total –

appelons-le E – rempli de mouvements et d'énergie, devait, en raison de la loi d'équivalence d'Einstein entre l'énergie et la masse, avoir une masse déterminée. Il devait donc lui-même se présenter comme une particule d'une certaine masse. Cependant, rien ne pouvait maintenir ensemble, en fait, les gouttes d'énergie concentrée liées aux particules, et qui, après un certain laps de temps plus ou moins long, étaient susceptibles de s'évanouir. À l'inverse, un mouvement ondulatoire ayant une existence relativement longue, du fait que les ondes qui lui sont liées se propagent à une vitesse déterminée dans l'espace – l'espace E, dans lequel les ondes se renforçaient – devait changer avec le temps de position, de grandeur, de forme, mais se maintenir en s'étendant. On se trouvait donc devant un espace en extension, et, en même temps, susceptible de s'évanouir à l'intérieur de ses propres limites. Cette contradiction interdisait d'identifier cet espace à une particule ayant une formation immuable dans le temps. Il avait donc fallu renoncer à l'interprétation de Schrödinger.

Max Born avait alors considéré, au contraire, que seules les particules étaient réelles. Les ondes, selon lui, ne devaient pas être vues comme un phénomène physique, mais seulement comme des fonctions mathématiques déterminant la probabilité de certains résultats des mesures. Cette théorie, qui devint par la suite dominante, permit à Heisenberg et à Dirac de fonder l'impressionnant formalisme mathématique sur lequel, aujourd'hui encore, repose la physique quantique, même s'il a été, depuis, perfectionné et systématisé par von Neumann. Mais il résulte de cette nouvelle interprétation des phénomènes quantiques une conséquence non triviale : comme l'écrit March, «si la conception de Born concorde avec les faits, il devient impossible de prétendre qu'un phénomène ondulatoire puisse réellement avoir lieu dans l'espace» (voir [March 65], 186). Presque 50 ans plus tard, la réflexion épistémologique de Michel Paty sur l'espace physique, vu du monde quantique, le confirmerait s'il en était besoin : le concept d'espace reste en fait étranger aux systèmes quantiques et on a beaucoup de problèmes pour relier ceux-ci à l'«espace vide environnant» dans lequel, pourtant, ils existent. Cela est d'autant plus difficile que cet espace supposé «vide» «n'est pas vraiment vide, conceptuellement et physiquement, puisqu'il comprend le vide quantique, lequel est matériel, et représenté en termes de champs quantiques (et de particules virtuelles, corollaires de ces champs)». En sorte que «les deux entités (systèmes quantiques, espace physique) s'appellent l'une l'autre, la primauté conceptuelle revenant, du point de vue adopté, aux concepts quantiques (et, fondamentalement, à celui de champ quantique)»(voir [Paty 07], 24).

On peut en tirer la conclusion que, si la conscience peut être associée à un phénomène ondulatoire, elle n'est effectivement pas "dans l'espace" – entendons l'espace ordinaire de l'expérience commune – et, en ce sens, l'expression ruyerienne de «trans-spatial»

est parfaitement justifiée.

Il reste que, d'une part, les particules élémentaires, elles, sont dans l'espace et plus l'agitation provoquée par les ondes sera forte en un lieu donné de coordonnées (x, y, z) – en termes plus précis, plus l'amplitude de probabilité sera importante – et plus la probabilité d'y trouver la particule sera grande. D'autre part, «ne pas être dans l'espace ordinaire» ne veut pas dire «ne pas être dans un espace». En fait, les phénomènes quantiques, comme, peut-être, les phénomènes conscientiels, adviennent dans un type d'espace qu'on peut dire «sans distance» ou, en termes mathématiques plus choisis, «non métrisable». En effet, l'influence d'une particule sur une autre, on l'a vu, est indépendante de la distance, comme le montrent non seulement le principe de «superposition», mais le principe de Pauli et les phénomènes d'intrication quantique (voir [Parrochia 21]). Cela dit, le physicien-mathématicien travaille dans ce genre d'espace, qui a donc, de ce point de vue, une "réalité", même si ce n'est pas la réalité ordinaire. Derrière la notion métaphorique de «surface absolue» ou de «domaine absolu», il y a donc en fait un type d'espace mathématiques sans distance ou à topologie faible, que seules peuvent être aptes à décrire les mathématiques puissantes d'aujourd'hui (voir Appendice).

En tout cas, irréductible à l'espace ordinaire, la conscience comme survol absolu semble liée à l'expérience singulière de sujets ou de subjectivités qui ne sont pas forcément, du même coup, liés à l'humain. L'origine d'une telle conception remonte à Leibniz, mais s'est trouvée reprise à différents moments de l'histoire, par exemple par Gabriel Tarde ou par Alfred North Whitehead. Didier Debaise, qui a commenté ces textes de ce point de vue (voir [Debaise 17]) l'a également retrouvée chez un auteur comme Bruno Latour (voir [Debaise 12]), dont le but semble avoir aussi été, depuis 1999, de dégager la subjectivité de son ancrage exclusivement anthropologique ou humain.

En liant ces considérations aux précédentes, on aboutit alors à l'idée, portée par certains philosophes et physiciens japonais – Teruaki Nagakomi (université de Kochi) et Kunio Yasue (Université de Kyoto, Université du Tōhoku, Université de Nagoya) – d'une «monadologie quantique» (voir [Nakagomi 92], [Nakagomi 03], [Yasue 99]), qu'il serait intéressant d'approfondir. Ruyer avait déjà noté jadis que l'unité d'une simple molécule comme H2O, la molécule d'eau, supposait, d'un point de vue quantique, que les fonctions d'onde des trois atomes se recouvrent partiellement, impliquant une perte partielle des électrons de valence, laquelle, gagnée par le système moléculaire, lui conférait une véritable unité (voir [Ruyer 52], 114-115) [8]. Mais, d'une

8. La représentation de Ruyer de l'unité de H2O (voir Appendice) est ultra-simplificatrice. En

certaine manière, l'unité d'une molécule, compte tenu des hypothèses d'approximation destinées à simplifier les calculs, paraissait moindre que l'unité d'un atome à un électron, et, a fortiori, moindre que l'unité d'un électron ou d'une particule élémentaire en général. En ce sens, le rapprochement entre la conscience et les entités du niveau moléculaire, atomique ou sub-atomique ne résolvait pas vraiment le problème, sauf à accorder déjà une sorte de proto-conscience aux particules élémentaires, ce qui conduit, peu ou prou, au panpsychisme.

5 Du solipsisme au panpsychisme

Face à l'impossibilité d'attribuer à autrui des contenus de conscience semblables à ceux qu'on connaît, une solution radicale aurait pu consister à redonner vie à la

réalité, une résolution analytique de la fonction d'onde de Schrödinger $\hat{H}\Psi = E\Psi$ (où $\hat{H}$ correspond à un opérateur dit «Hamiltonien», E correspond à l'énergie de la particule et Ψ désigne la fonction d'onde) n'est possible que dans le cas des atomes hydrogénoïdes (édifices monoatomiques ne renfermant qu'un seul électron). Pour les atomes polytatomiques, la résolution analytique de l'équation de Schrödinger est impossible à cause de la répulsion entre électrons et on cherche donc une solution approchée dans laquelle la fonction d'onde totale est décrite sous la forme d'un produit de fonctions monoélectroniques (hydrogénoïdes) dépendant chacune des coordonnées d'un seul électron (approximation orbitalaire). Chaque électron est décrit par une orbitale atomique dont l'énergie dépend de deux nombres quantiques : n (le nombre quantique principal associé au niveau d'énergie) et ℓ (le nombre quantique secondaire définissant la sous-couche). La configuration électronique s'obtient alors au moyen des trois règles que sont le principe d'exclusion de Pauli, la règle de Klechkowsky qui, pour que l'énergie totale de l'atome soit minimale, attribue les électrons aux orbitales par énergie croissante, enfin la règle de Hund qui précise que les électrons de la dernière sous-couche doivent être décrits par le plus grand nombre d'orbitales, de façon à avoir le plus grand nombre d'électrons célibataires ayant le même spin. Dans le cas de molécules, qui sont formées de plusieurs noyaux portant chacun ses électrons, celles-ci peuvent se déformer. La fonction d'onde qui décrit la molécule devrait donc, en principe, tenir compte à la fois des coordonnées des noyaux et de celles de tous les électrons. On ne peut s'en sortir qu'en faisant des simplifications : séparer le mouvement des noyaux de celui des électrons ; négliger les électrons de cœur et ne tenir compte que des électrons de valence ; considérer que chaque électron de la molécule provient d'une orbitale atomique de valence d'un des atomes qui la compose ; enfin, ne pas tenir compte non plus de la partie radiale de l'orbitale atomique et ne considérer que la partie angulaire. Les orbitales atomiques (OA) ainsi sélectionnées servent de « base » pour décrire les orbitales moléculaires (OM). Les OM sont alors décrites comme des combinaisons linéaires d'OA (méthode LCAO – pour Linear Combination of Atomic Orbitals). Dans le cas de H2O, on obtient deux combinaisons linéaires, l'une de trois orbitales moléculaires, l'autres de deux orbitales moléculaires, certaines étant liantes, d'autres non. La chimie quantique, grâce aux approximations, parvient ainsi tout de même à décomposer l'apparemment indécomposable (voir [Born 71] ou, plus récent [Hiberty 08] et, pour une approche plus historique, [Gravoglu 11]).

position solipsiste : à un moment donné du temps, raisonne le solipsiste, la seule réalité est celle de ma conscience, c'est-à-dire celle de mon expérience présente. Mais le solipsisme, comme l'a montré Wittgenstein, se heurte aux contraintes du langage qui inclut implicitement des éléments multiples, lesquels remettent généralement en cause l'unicité de l'expérience subjective. La solution symétrique, totalement opposée à celle-là, est alors le panpsychisme : si l'expérience consciente est un trait fondamental du monde, alors on peut imaginer dans le monde, soit une multiplicité de consciences plus ou moins différenciées et de niveaux différents, soit une telle multiplicité, mais intégrée dans une conscience unique supérieure – une sorte de conscience cosmique ou de nouvelle «âme du monde» dont les consciences individuelles seraient en somme des expressions ou des reflets. Ces thèses ont chacune une longue histoire, mais aussi de multiples variantes. Si nous récusons d'emblée le solipsisme comme peu crédible, nous nous trouvons alors en face d'un véritable monde. Il existe, en effet, de nombreuses variétés de panpsychismes.

5.1 Le panpsychisme dans tous ses états

Faute de pouvoir expliquer la conscience à partir de ce qu'elle n'est pas, ou d'être en mesure de la faire émerger d'un ensemble de processus inconscients obéissant à une physique classique, l'idée de la rapprocher des processus quantiques revient en fait à vouloir la faire surgir de ce qu'elle est déjà – une «surface absolue» au sens de Ruyer – et donc à introduire un semblant d'esprit à des niveaux inférieurs de l'évolution de l'univers, quitte à descendre jusqu'au niveau de la particule élémentaire, ou plutôt, du «quanton», cette réalité indissociable onde-particule explorant tout l'espace. Cela débouche évidemment sur l'idée d'un esprit partout répandu dans la matière, fût-ce sous une forme évidemment tout à fait fruste.

On notera que cette idée n'est pas nouvelle. Attribuer une «âme» aux choses était déjà une tendance de la pensée grecque dès Thalès, qui en voyait la preuve dans l'aptitude de la magnétite – la matière des aimants – à attirer le fer. Mais d'autres présocratiques avaient des vues similaires : le pneuma d'Anaximène, le feu principe d'énergie vitale d'Héraclite, le «nous» d'Anaxagore, l'âme comme principe d'animation au centre de tout vivant chez Aristote, ou encore, sa généralisation, la fameuse notion d'«âme du monde» (qui recouvre d'ailleurs des sens divers de Platon aux Stoïciens), en sont des exemples. Mais on notera que c'est avec la théorie épicurienne – et notamment la fameuse déviation (*parenklisis*, en grec, *clinamen*, en latin) solidaire d'une sorte de «liberté» des atomes – que l'esprit est introduit pour la première fois au niveau de ce qu'il y a de plus élémentaires au monde, la particule insécable,

ce qui revient à attribuer à tout «atomos» une sorte de volonté. Le panpsychisme aura, par la suite, de grands défenseurs, tant à la Renaissance (Cardano, Telesio, Patrizi, Bruno ou Campanella) qu'à l'Âge classique (Spinoza, Leibniz), au XVIII^{e} siècle (Diderot) ou même encore au XIX^{e} siècle (où Herder, Schopenhauer, Goethe, Fechner, Lotze, Hartmann, Mach et Haeckel sont tous panpsychistes à quelque degré). On pourrait penser que le XX^{e} siècle se serait débarrassé de ces croyances que le psychologue Jean Piaget considérait comme enfantines [9], mais il n'en est rien. Le mathématicien William Kingdon Clifford, le philosophe William James, Bergson, dans une certaine mesure, et même Russell, dans son «monisme neutre» comme dans sa dernière philosophie, ont perpétué la tradition panpsychiste, inscrite au niveau des processus chez Whitehead ou Hartshorne. Nombreuses sont les personnalités qui ont pu adhérer à cette idée (de Samuel Alexander à Gregory Bateson, en passant par John Dewey, Arthur Eddington, J. B. S. Haldane, J. Huxley, P. Teilhard de Chardin ou C. H. Waddington). Mais il semble que ce soit chez des savants comme Freeman Dyson ou David Bohm qu'elle ait encore trouvé, à la fin du XX^{e} siècle, d'ardents défenseurs en physique, justifiant par anticipation des thèses comme celles de Chalmers, Griffin, De Quincey ou, plus près de nous, au début du XXI^{e} siècle, David Clarke, Freya Matthews, Greg Rosenberg ou encore Galen Strawson, justifiant ainsi la grande étude quasiment exhaustive de David Skrbina (voir [Skrbina 09]).

Ne pouvant naturellement étudier en détail toutes ces formes de panpsychismes, nous nous bornerons à reprendre ici la classification proposée par Skrbina, qui distingue différentes approches :

1. Le point de vue de la philosophie des processus, tel que conçu par Bergson et Whitehead et développé par Hartshorne, Griffin, De Quincey et Clarke ;

2. l'approche de la physique quantique, telle que développée par Bohm, Hameroff et d'autres ;

3. l'approche de la théorie de l'information, issue des travaux de Bateson, Wheeler, Bohm et Chalmers (et anticipée – ajouterions-nous – par la théorie des Ur-Alternativen de von Weizsäcker) ;

4. la hiérarchie «Part-Whole», telle qu'envisagée par Cardano et élaborée par Koestler et Wilber ;

5. l'approche de la dynamique non linéaire, inspirée par Peirce et développée plus

9. En deça d'un certain âge, les enfants ont tendance à accorder une conscience aux objets, de sorte que la poupée souffre si on la pique et même le banc sur lequel on s'asseoit pourrait sentir le poids des personnes qui s'y installent (voir [Piaget 03]).

loin par Skrbina ;

6. Le «réel-physicalisme» de G. Strawson.

En tout cas, on notera que, dans les formes les plus récentes de panpsychisme [10], il s'agit avant tout de tenter de résoudre le «difficile problème de la conscience», tel que Nagel, Chalmers et d'autres l'ont présenté.

Délaissant les métaphysiques les plus échevelées, nous nous restreindrons ici à présenter la théorie de Wheeler, dont le panpsychisme prend la forme plus recevable d'une sorte de théorie de l'information quantique (encore partiellement à naître). Sa formulation, devenue célèbre à cause de sa formule frappante («it from bit»), est en réalité assez proche de la théorie – beaucoup plus précise et féconde à notre avis – du physicien allemand Carl Friedrich von Weizsäcker, que nous avons commentée ailleurs (voir [Parrochia 21]) [11].

5.2 La théorie de Wheeler : "It from bit" ou la physique quantique réduite à l'information

L'idée de faire sortir le monde d'une théorie de l'information pure – un ensemble d'alternatives quantiques fondamentales (Ur-alternativen) rebaptisées plus récemment qu-bits – a été formulée pour la première fois par le profond physicien quantique allemand Carl Friedrich von Weizsäcker (voir [Parrochia 21]).

Oubliant les travaux de von Weizsäcker – qui l'ont pourtant sûrement inspiré – Wheeler, dans un article célèbre, a tenté de réduire la réalité physique à de l'information pure, chaque "it" – chaque particule, chaque champ de force, et même le continuum de l'espace-temps lui-même – tirant selon lui entièrement sa fonction, sa signification, son existence même – quoique, dans certains contextes, cela puisse être indirectement – «des réponses apportées par un appareil à des questions en oui ou non, des choix binaires, des "bits"» (voir [Wheeler 89], 310). Et Wheeler continue, en accentuant encore l'aspect idéaliste (sinon panpsychique) de sa thèse : «"It from bit" symbolise l'idée que chaque élément du monde physique a au fond – un fond très profond, dans

10. Pour une autre vision du panpsychisme, malgré tout assez proche de celle-ci, quoique moins historique dans sa présentation, voir [Goff 17].

11. Thomas Görnitz fait d'ailleurs remarquer (voir [Görnitz 18], 21) que Wheeler avait été invité par von Weizsäcker dès 1980 à la quatrième conférence sur l'Ur-théorie et ses conséquences, c'est-à-dire dix ans avant que celui-ci ne formule la thèse «it from bit», reformulation condensée, mais plutôt moins élaborée, de la théorie des alternatives quantiques.

la plupart des cas – une source et une explication immatérielles ; que ce que nous appelons réalité découle en dernière analyse de la pose de questions oui-non et de l'enregistrement des réponses produites par l'appareil ; en bref, que toutes les choses physiques sont d'origine informationnelle et que cet univers est participatif» (voir [Wheeler 89], 311).

Trois exemples sont supposés illustrer cette thèse :

– Soit, d'abord, le cas d'un photon, émis par une source distante, affectée d'un polarisateur. Cette source l'envoie sur un photodétecteur muni d'un analyseur de polarisation. On pose la question : le compteur a-t-il enregistré un "clic" pendant un intervalle de temps spécifié. Si oui, on en conclut que c'est le photon qui l'a produit. Mais le photon n'existait ni avant l'émission, ni après la détection, et l'on doit aussi reconnaître que, dans la période intermédiaire, ce que nous nommons le photon est en fait un décompte, manifesté par le "clic", c'est-à-dire une information.

– Deuxième exemple où des bits sont essentiellement impliqués, le schéma Aharonov-Bohm mesurant un flux magnétique. Des compteurs d'électrons placés à droite d'un écran à double fente donnent des indications du type "oui ou non" concernant l'arrivée d'un électron provenant d'une source située à gauche de l'écran, à la fois avant l'activation du flux et après. Ce flux de lignes de force magnétiques se trouve représenté par les deux faisceaux d'électrons qui sortent des deux fentes. Les faisceaux interfèrent. Le décalage des franges d'interférence entre champ désactivé et champ activé révèle la magnitude du flux. On notera que, non seulement en électrodynamique mais aussi en géométrodynamique et dans toute autre théorie de champ de jauge, comme le soulignent Anandan, Aharonov et d'autres, une différence de phase dans une certaine amplitude de probabilité quantique-mécanique choisie de manière appropriée fournit une mesure du champ. L'intensité du champ ou la courbure de l'espace-temps se révèle en fait par le déplacement de franges d'interférence – des franges qui ne représentent en réalité rien d'autre qu'un modèle statistique d'enregistrements d'alternatives oui/non. Là encore, il s'agit de bits d'information, traités en gros plutôt qu'au détail, comme lorsque on fait passer le courant de référence à travers la bobine du magnétomètre, mais la définition du champ ne s'en trouve pas moins reposer sur les bits d'information élémentaires.

– Troisième et dernier exemple, enfin, où un objet physique, cette fois-ci, est défini par une certaine quantité de bits : le trou noir. On sait, depuis Bekenstein, que la surface de l'horizon d'un trou noir, en rotation ou non, mesure l'entropie du trou noir. Ainsi cette surface, partitionnée en imagination en domaines de taille $4\hbar \mathrm{Log}_e 2$, soit 2,77... fois l'aire de Planck, donne le nombre de Bekenstein, N ; et le nombre

de Bekenstein, ainsi que Thorne et Zurek l'ont expliqué, nous donne en réalité le nombre de chiffres binaires, i.e le nombre de bits, qu'il faudrait pour spécifier en détail la configuration des constituants à partir desquels le trou noir a été assemblé. L'entropie H est donc une mesure de l'informations perdue. La taille du trou noir, le "it" ici en question, est fixée par le nombre N de bits d'information cachés dedans. En ce sens, elle est une constante peut-être plus fondamentale que c, la vitesse de la lumière.

Wheeler tire quatre conséquences négatives de cette thèse selon laquelle la réalité physique fondamentale est purement et simplement de l'information.

1.- Dans l'explication de ce qui est, on remplace une régression indéfinie par une boucle : «La physique donne lieu à la participation d'observateurs ; la participation des observateurs donne lieu à des informations ; et l'information donne naissance à la physique».

2.- Il n'existe pas de lois éternelles. Celles-ci sont nées avec le "big bang" qui est topologiquement un bord, et l'on sait que "le bord du bord est vide". L'univers n'est pas une machine, il est autosynthétisé à partir d'observateurs-participants dont les actes, telles des notes frappées sur un piano, constituent en eux-mêmes et par eux-mêmes le grand monde de l'espace, du temps et des choses.

3.- Tout est discontinu et il n'y a pas de continuum, ni physique, ni mathématique. La physique n'est pas fondée sur un continuum géométrique. Elle est fondée sur de l'information exprimée en bits élémentaires.

4.- Ni l'espace ni le temps n'existent réellement. Seul existe le langage des bits.

Wheeler cite cinq indices en faveur de cette thèse, dont le moins qu'on puisse dire est qu'ils ne sont pas absolument évidents :

Premier indice : le bord d'un bord étant nul (principe animant aussi bien la théorie de Maxwell que celle d'Einstein ou la théorie des champs), on peut espérer qu'on achèvera un jour la mathématisation de la physique et qu'on en viendra alors à tirer tout de rien (et toute loi d'une absence de droit).

Deuxième indice : «si pas de question, alors pas de réponse». Ou, plus précisément, si pas de question au niveau d'un bit, alors pas de bit-réponse à ce niveau-là. À aucun champ ou à aucune particule, nous ne pouvons attribuer une position ou une quantité de mouvement à moins qu'un appareil ne soit en état de mesurer l'un ou l'autre. De plus, tout appareil qui mesure avec précision une quantité exclut inévitablement sur-le-champ le fonctionnement d'un autre équipement susceptible de mesurer une autre

quantité. En bref, le choix de la question posée et le choix du moment où elle est posée jouent un rôle en décidant – au moins en partie – de ce que nous avons le droit de dire.

Troisième indice : le principe super-copernicien. Ce principe rejette maintenant toute centration dans tout récit d'existence, et cela, aussi fermement que Copernic avait renoncé autrefois à l'héliocentrisme. En tout cas la physique répudie toute centration dans l'évaluation des observateurs-participants et de leur nombre. En viendra-t-on un jour à tout connaître ? Sûrement non. Bien que le nombre de bits de l'univers soit fini, il reste des milliards d'années à venir, des milliards et des milliards de sites de participation d'observateurs encore à occuper, et l'on peut subodorer que le «monde comme système auto-synthétisé par la mise en réseau quantique» ne sera pas épuisé par la connaissance qu'on en prend..

Quatrième indice : quid de la «conscience» ? Pendant longtemps, on a évité, en physique, de poser des problèmes liés à la conscience. Mais la ligne de démarcation entre l'inconscient et le conscient commence à s'estomper de nos jours, si bien qu'on peut non seulement commencer à comprendre le rôle de la conscience en physique quantique, mais imaginer aussi des rapprochements entre un homme et un animal, même fruste, comme une fourmi.

Cinquième et dernier indice : «Plus est différent». Pas par finalité, mais par nécessité intérieure. Ainsi, un nombre suffisamment grand de molécules H2O collectées dans une boîte manifestera des phases solide, liquide et gazeuse. Les changements de phase, la superfluidité et la supraconductivité témoignent tous de points épineux soulignés par Anderson : le nombre induit des différences et des nouvelles fonctionnalités. Le système de télécommunications géant d'aujourd'hui se trouve en constante évolution. Cela signifie peut-être que nous comprendrons un jour le temps, l'espace et toutes les autres caractéristiques qui distinguent la physique – et l'existence elle-même – en tant qu'organes produits identiquement par un système d'information auto-synthétisé.

En conclusion, Wheeler plaide pour un renoncement total de la physique au continuum géométrique d'espace-temps. Il plaide aussi en faveur d'une physique de l'information, se présentant sous la forme de bits en très grand nombre caractérisant le cosmos et aussi d'un non moins grand nombre d'actes élémentaires de participation d'observateurs à tout moment de ce monde.

Sept recommandations sont alors formulées :

1.- Aller au-delà de William Wootters [12] et déterminer ce qui, le cas échéant, doit être ajouté à la distinction et à la complémentarité pour obtenir toute la théorie quantique standard.

2.- Traduire les versions quantiques de la théorie des cordes et de la géométrodynamique d'Einstein du langage du continuum en langage des bits.

3.- Affiner le concept de *bit* lui-même. Déterminer notamment si un phénomène quantique élémentaire mis en évidence par un acte irréversible d'amplification a, au fond : (1) la netteté 0 ou 1 de la définition d'un bit dans une chaîne de chiffres binaires, ou (2) la propriété d'accordéon d'un théorème mathématique, dont la longueur, c'est-à-dire le nombre de lemmes supplémentaires qu'il peut contenir, peut être étirée ou rétrécie à volonté par un analyste selon sa convenance.

4.- Examiner un par un, d'un œil imaginatif, les outils puissants que la mathématique – y compris la logique mathématique – a gagnés au fil du temps et propose désormais de traiter en gros plutôt qu'en détail. Pour chacune de ces techniques, élaborer sa transcription dans le monde des bits. Accorder une attention particulière à l'un et l'autre des systèmes axiomatiques déductifs, celui qui est capable de se référer à lui-même – i.e le système déductif autoréférentiel – et l'autre.

5.- À partir de l'évolution de la programmation informatique, déterrer, systématiser et afficher toutes les caractéristiques qui éclairent la structure – niveau par niveau – de la physique.

6.- Capitaliser sur les découvertes et les perspectives de la théorie de l'information, de l'entropie algorithmique et de l'évolution des organismes, ainsi que de la reconnaissance des formes. Rechercher tous les liens que chacun de ces domaines peut avoir avec la physique au niveau quantique.

Enfin :

7.- «Déplorer ? Non, célébrer l'absence d'une définition claire et nette du terme *bit* comme unité élémentaire dans l'établissement du sens». Nous rejetons – écrit Wheeler – «cette vision de la science qui disait : "Définissez vos termes avant de continuer". La nature véritablement créative de tout pas en avant dans la connaissance humaine (...) est telle que la théorie, le concept, la loi et la méthode de mesure – à jamais inséparables – naissent dans le monde en union». Si nous apprenons à combiner des bits en nombre incroyablement grand pour obtenir ce que nous appelons l'existence, nous saurons mieux ce que nous entendons à la fois par «bit» et par «existence».

12. Un des pionniers de la théorie de l'information quantique, à l'origine de la notion de qu-bit.

Une seule question anime ce rapport, avoue Wheeler pour finir : peut-on espérer comprendre l'existence ? Des indices que nous avons, et que nous travaillons à construire, pour progresser sur cette question, nous pouvons induire qu'un jour, nous saisirons l'idée centrale de tout cela d'une manière si simple, si belle et si convaincante que nous nous dirons tous : "Oh, comment aurait-il pu en être autrement ! Comment avons nous pu être, tous autant que nous sommes, si aveugles depuis si longtemps !"

5.3 Discussion

On peut sans doute saluer le bel enthousiasme de Wheeler vieillissant, qui reprend en fait, comme nous l'avons dit, von Weizsäcker, mais on peut aussi ne pas être entièrement convaincu par son plaidoyer. Chez von Weizsäcker, la perspective restait transcendantale et l'auteur, à ma connaissance, n'a jamais dérivé vers le panpsychisme, bien qu'il fût lui-même croyant. Chez Wheeler, malgré le caractère assez vague de ses formules, il semble bien qu'il s'agisse d'une sorte d'ontologie de l'information, ontologie d'ailleurs assez problématique puisque – au-delà de son statut d'unité d'information élémentaire – on ne sait pas définir la nature exacte d'un bit. Mais outre la difficulté de faire sortir l'espace 3D de considérations purement quantiques (voir [Stoica 21]) – difficulté que rencontre aussi la théorie de von Weizsäcker –, l'idée que tout se résume à des informations, des bits, des réponses à des questions [13], rencontre cette limite exposée jadis par Rolf Landauer et qui peut s'exprimer comme suit : que toute information soit physique ou, en tout cas, incarnée dans des choses ou des processus physiques ne signifie pas que toutes les choses physiques soient réductibles à de l'information. Le concept d'information n'aurait aucun sens en l'absence de quelqu'un à informer – c'est-à-dire un observateur conscient capable de choix ou de libre arbitre – et si tous les humains du monde disparaissaient demain, toutes les informations disparaîtraient également. Faute d'esprit pour en prendre connaissance, les télévisions et les ordinateurs seraient aussi impassibles que des souches d'arbre

13. Il serait intéressant, d'ailleurs, de se demander à quelle figure correspond un enchaînement de questions. Différents travaux ont été menés à ce sujet dans les années 1965-72, qui font apparaître la structure mathématique associée à cet ensemble de bifurcations qu'est un «questionnaire», lequel peut prendre des formes arborescentes ou latticielles, finies ou infinies et possède les propriétés de processus aléatoires particuliers dont les états ont certaines probabilités. Mais alors que Picard (voir [Picard 65] traite du cas où les probabilités conditionnelles sont toutes égales à 0 ou 1, Chenais et Terrenoire (voir [Chenais 71]) ont introduit la notion de «pseudoquestionnaire» pour traiter du cas général, lequel, quand les probabilités correspondent aux carrés de nombres complexes, pourrait parfaitement décrire la situation quantique. Il serait alors pertinent de resituer la théorie des qu-bits de Wheeler-von Weizsäcker dans un tel contexte.

ou des pierres. Par ailleurs, l'idée que l'esprit est aussi fondamental que la matière va à l'encontre de l'expérience quotidienne. La matière peut clairement exister sans l'esprit – en tout cas sans un esprit élaboré –, mais où voyons-nous de l'esprit – en tout cas un esprit élaboré – exister sans matière ? Il faut, encore une fois, accorder une proto-conscience aux particules élémentaires pour pouvoir soutenir les thèses de Wheeler et des panpsychistes. Mais, même Ruyer, pour qui l'information a pour origine le trans-spatial (voir [Ruyer 68]), s'est gardé d'aller beaucoup plus loin, préférant s'en tenir à l'affirmation d'un monde invisible, plutôt que de faire, de façon beaucoup trop anthropomorphique à son goût, de cette multiplicité de quasi-sujets une Personne qui les sauve. Il n'était pas question, pour lui, de céder aux croyances d'une religion révélée. Comme il l'a écrit explicitement, «l'immortalité est inutile, avoir vécu suffit» (voir [Ruyer 79] ; et aussi [Ruyer 13]).

5.4 Une preuve du panpsychisme ?

La pente, cependant, est glissante, car la nécessité où l'on se trouve de vouloir apporter une preuve expérimentale du panpsychisme précipite parfois aux frontières de l'absurde. C'est ainsi que, dans un article stupéfiant, Gregory Matloff (département de physique du New York City College of Technology) a étudié s'il pouvait exister des preuves expérimentales capables de soutenir cette assertion d'Olaf Stapledon selon laquelle l'univers pourrait être, en un certain sens, conscient et si une partie du mouvement stellaire, comme celui-ci l'affirme, pouvait être vu comme «volontaire» (ce qui constituerait une alternative à l'hypothèse de la matière noire). Évidemment, les étoiles ne possèdent ni neurones ni tubules, mais les signatures spectrales de certaines étoiles «froides» comme le Soleil (naine jaune) révèlent la présence en elles de molécules simples. Un champ de proto-conscience universel conforme aux fluctuations du vide pourrait alors interagir avec la matière moléculaire via la contribution de l'effet Casimir aux liaisons moléculaires. Or il existe des preuves d'observation que ces étoiles froides se déplacent un peu plus vite autour du centre galactique que leurs sœurs plus chaudes. Cette différence de vitesse, appelée «discontinuité de Parenago», se produit dans la distribution de température stellaire où les raies spectrales moléculaires deviennent apparentes. Des données en provenance des *Allen's Astrophysical Quantities* ainsi que de l'observatoire spatial européen Hipparcos révèlent que ce qu'on appelle «la discontinuité de Parenago» se trouve dans les étoiles de la séquence principale jusqu'à environ 260 années-lumière du Soleil, et dans les étoiles géantes à des distances supérieures à 1000 années-lumière. Comme l'article l'indique, les explications locales traditionnelles de la discontinuité de Parenago semblent inadé-

quates. Un nouveau satellite, Gaia, successeur d'Hipparcos, actuellement en station pour observer les positions et les mouvements d'environ 1 milliard d'étoiles dans notre galaxie, devrait apporter des informations supplémentaires. Si la discontinuité devait être un phénomène à l'échelle de la galaxie, l'hypothèse d'étoiles volitives pourrait alors être avancée. L'émission d'un jet unidirectionnel pourrait apparaître comme l'une des façons dont une étoile consciente peut modifier sa trajectoire galactique. Or de tels jets ont été observés dans de jeunes étoiles. Matloff espérait donc que les travaux futurs pourraient montrer comment les jets unidirectionnels sont en corrélation avec la température de l'étoile et la distance au centre galactique. Si tel était le cas, il ne serait pas impossible, selon lui, que le panpsychisme puisse trouver une preuve expérimentale et devenir une subdivision de l'astrophysique d'observation (voir [Matloff 17]).

Il ne semble pas que ces spéculations, pour l'instant, aient été reçues favorablement par l'astronomie sérieuse. Jusqu'à preuve du contraire, la discontinuité de Parenago, qui est effectivement une réalité astrophysique, semble trouver des explications plus prosaïques. Le changement brusque de pente des vitesses stellaires des étoiles naines, repéré pour la première fois par l'astrophysicien russe Pavel Petrovich Parenago (1906 -1960), trouve en fait une explication naturelle. Les étoiles de spectre décalé vers le bleu ont forcément des durées de vie plus courtes que l'âge du voisinage solaire τ max, tandis que les étoiles de spectre décalé vers le rouge dépassent τ max, sans qu'il soit besoin de faire appel à des hypothèses supplémentaires. La soi-disant preuve du panpsychisme ne semble donc pas avérée.

6 Sur quelques modélisations récentes de la conscience

Revenons donc à la question de la conscience individuelle. Environ 40 ans après Ruyer, quand le physicien britannique Roger Penrose s'attaqua au problème de la modélisation de l'esprit en suggérant que la mécanique quantique pouvait être impliquée dans la question de la conscience, il ne semble pas qu'il ait eu connaissance des travaux du philosophe français. D'ailleurs, Penrose suggérait seulement qu' il y avait des structures moléculaires dans notre cerveau capables de modifier leur état en réponse à un seul événement quantique, ce qui signifiait qu'elles pouvaient éventuellement se trouver dans une superposition d'états, ces superpositions quantiques pouvant alors apparaître dans la manière dont les neurones étaient déclenchés pour communiquer entre eux via des signaux électriques. Penrose se demandait même un peu naïvement si notre capacité à maintenir des états mentaux apparemment in-

compatibles ne résultait pas d'un véritable effet quantique. En tout cas, le cerveau humain, selon lui, semblait capable de gérer des processus cognitifs qui dépassaient de loin les capacités des ordinateurs numériques, de sorte qu'on pouvait l'imaginer être à même d'effectuer des tâches de calcul impossibles sur ces ordinateurs classiques.

C'est d'abord dans son livre de 1989, *The Emperor's New Mind* (voir [Penrose 89]) que Penrose a proposé que ces effets quantiques figurent dans la cognition humaine au niveau atomique ou sub-atomique, les superpositions d'états devenant ensuite impossibles pour des objets beaucoup plus grands, contrecarrés qu'ils sont alors par les effets de la gravitation. Dans son livre de 1994, *Shadows of the Mind* (voir [Penrose 94]), il a suggéré que les structures impliquées dans cette cognition quantique pourraient être des brins de protéines appelés microtubules. En accord avec l'anesthésiste américain Stuart Hameroff, il a soutenu que les vibrations des microtubules – qui se trouvent dans la plupart de nos cellules, y compris les neurones de notre cerveau – pourraient adopter une superposition quantique. Et quoique Max Tegmark ait calculé que le temps de survie des superpositions quantiques des molécules impliquées dans la signalisation neuronales – moins d'un milliard de milliardième de seconde, alors qu'il faut au moins dix mille milliards de fois plus de temps à un neurone pour émettre un signal – rendait l'hypothèse très douteuse, Penrose a maintenu son point de vue contre vents et marées (voir [Penrose 97]). Nous avons déjà eu l'occasion de discuter les thèses de Penrose et leur fragilité, d'ailleurs critiquée par des biologistes autorisés comme Edelman (voir [Parrochia 97], 391-403) et n'y reviendrons pas ici.

À l'appui de la théorie de Penrose, le physicien Matthew Fisher, de l'Université de Californie à Santa Barbara, a cependant fait valoir, quant à lui, dans une étude publiée en 2015 (voir [Fisher 15]), que le cerveau pourrait contenir des molécules capables de supporter des superpositions quantiques plus robustes. Plus précisément, les atomes de phosphore, partout présents dans les cellules vivantes, pourraient avoir cette capacité. Prenant souvent la forme d'ions phosphate, dans lesquels un atome de phosphore se joint à quatre atomes d'oxygène. ils sont l'unité de base d'énergie dans les cellules. Une grande partie de l'énergie de la cellule est stockée dans des molécules nommées ATP, qui contiennent une chaîne de trois groupes phosphate liés à une molécule organique. Lorsque l'un des phosphates est éliminé, de l'énergie est libérée pour que la cellule l'utilise. Les cellules ayant un mécanisme moléculaire pour assembler les ions phosphate en groupes et les cliver à nouveau, Fisher a suggéré un schéma dans lequel deux ions phosphate pourraient être placés dans un type spécial de superposition appelé "état intriqué". Les spins de phosphore dépendant les uns des autres dans un état intriqué, ils pourraient alors résister à la décohérence pendant en-

viron un jour, même dans des cellules vivantes. Et même si les vibrations quantiques, comme Tegmark le suggérait, devaient être fortement affectées par leur environnement, les spins nucléaires n'interagissant pas très fortement avec cet environnement, leur comportement pourrait être "protégé" quelque temps de la décohérence.

Cela arriverait d'autant mieux, selon Fisher, si les atomes de phosphore étaient incorporés dans des objets plus grands appelés «molécules de Posner». Celles-ci, en effet, sont des grappes de six ions phosphate, combinés avec neuf ions calcium qui pourraient exister dans les cellules vivantes. À supposer qu'il en existe dans les neurones, elles pourraient déclencher le départ d'un signal vers un autre neurone, en s'effondrant et en libérant leurs ions calcium. En raison de l'intrication dans les molécules de Posner, deux de ces signaux pourraient donc à leur tour s'entremêler, la superposition quantique accompagnant ainsi la naissance d'une «pensée».

C'est en réfléchissant sur le mécanisme d'action des médicaments au lithium, largement utilisés pour traiter le trouble bipolaire, que Fischer a pensé à un tel mécanisme. Il ne cherchait pas du tout, au départ, une explication quantique, mais découvrit un jour un article rapportant que les médicaments au lithium avaient des effets différents sur le comportement des rats, selon la forme – ou «isotope» – du lithium utilisé. À première vue, c'était extrêmement déroutant car, du point de vue chimique, les isotopes d'un corps se comportant presque de la même manière, si le lithium fonctionnait comme un médicament conventionnel, les isotopes auraient dû tous avoir le même effet. Mais Fisher s'aperçut que les noyaux des atomes de différents isotopes de lithium pouvaient avoir des spins différents. Il supposa donc que cette propriété quantique pouvait affecter la manière dont les médicaments au lithium agissaient. Par exemple, si le lithium remplace le calcium dans les molécules de Posner, les spins de lithium pourraient «sentir» et influencer ceux des atomes de phosphore, et ainsi interférer avec leur enchevêtrement. Pour l'instant ces travaux sont en voie de vérification et sont encore loin de permettre de relier la conscience au niveau quantique.

Quoique les liens entre la conscience et le niveau quantique soient restés jusqu'ici hypothétiques, la question n'a cessé d'être agitée ces dernières années. Et bien que, ni l'idée d'une influence de la conscience sur les phénomènes quantiques, ni l'idée réciproque que la théorie quantique pourrait être la «bonne» théorie pour formuler une théorie de la conscience n'aient été démontrées, les deux ont acquis un droit de cité dans la littérature scientifique, au point qu'en 2016, Adrian Kent de l'Université de Cambridge au Royaume-Uni, a repris une nouvelle fois l'hypothèse que la conscience pourrait modifier le comportement des systèmes quantiques de manière subtile mais détectable (voir [Adlam 16]).

Réciproquement, tout en reconnaissant qu'il n'y a pas de raison vraiment convaincante que la physique quantique puisse constituer la base d'une théorie de la conscience, les chercheurs éprouvent visiblement de plus en plus de difficultés à voir comment une description de la conscience fondée uniquement sur la physique pré-quantique pourrait rendre compte de toutes les caractéristiques que la conscience semble posséder : l'irréductibilité de la subjectivité pointée par Nagel (voir [Nagel 74] ou la question des "qualia" soulignée par Chalmers (voir [Chalmers 95]), en sont des manifestations.

Tout récemment, un pas de plus a été franchi avec Philipp Goff. Alors que la philosophie des années 1970 célébrait comme une victoire de la rationalité ce qu'on appelait alors la «coupure galiléenne» [14], l'auteur y voit désormais une «erreur» (voir [Goff 19]). Le moment galiléen, qui a consacré les mathématiques comme langage de la nature, aurait fondé la physique comme science des quantités, éliminant par là toute possibilité de traiter des qualia, et a placé par là-même la conscience en dehors de la science.

Tout cela, à notre avis, est cependant partiellement faux, car les mathématiques sont moins, en fait, la science des quantités que la science des structures, et la qualité a trouvé droit de cité en mathématiques avec la topologie – et même en physique, avec ce qu'on pourrait appeler, après Bachelard, une «physique topologique», lorsqu'il s'agit de coordonner différentes théories. Mais c'est, en tout cas, dans un tel contexte que se sont développées récemment différents types de modélisations mathématiques de la conscience – qui continuent de renvoyer, peu ou prou, à une sorte de panpsychisme [15] – dont nous voudrions, pour finir, dire quelques mots.

7 Vers un méta-modèle mathématique conscience-univers ?

De Spinoza à Whitehead – en deça et au-delà aussi, sans doute – la tradition panthéiste n'a jamais vraiment abdiqué et on ne s'est jamais absolument résolu, malgré

14. L'idée de «rupture épistémologique» avait été utilisé au moins une fois par Bachelard dans *La philosophie du non*. Le mot «coupure» appartenait plutôt au vocabulaire d'Althusser dans sa lecture de Marx. Alexandre Koyré parlait plutôt, quant à lui, de «révolution» à propos de la percée de Galilée. Michel Fichant et Michel Pêcheux firent en quelque sorte la synthèse de tout cela en usant du mot «coupure épistémologique» dans leur ouvrage consacré à l'histoire des sciences (voir [Fichant 74]).

15. Goff, entre autres, s'en réclame.

les protestations nietzschéennes, à renoncer à faire de la nature un sujet, le Sujet par excellence, puisqu'il s'agissait – en tout cas pour Spinoza et Whitehead – d'y voir une sorte de figure de Dieu. Les tendances panpsychistes de certaines interprétations de la mécanique quantique, alimentées par les réflexions des philosophes de l'esprit sur les spécificités de la conscience, ont donc suscité toute une réflexion visant à intégrer, dans la mathématique même des modèles proposés, ces particularités qui semblaient avoir échappé au réductionnisme de la physique classique.

7.1 Bref inventaire de quelques théories récentes

C'est ainsi que dans un article récent, le mathématicien Johannes Kleiner (voir [Kleiner 20]) s'est attaqué au problème d'une formalisation de la conscience en s'efforçant de dégager un cadre suffisamment large pour servir à différents types de modélisations. Dès le début de son article, Kleiner s'efforce donc de dresser un «état des lieux» en notant que depuis quelques décennies, des développements révolutionnaires en neuroscience, en psychologie cognitive et en philosophie analytique ont conduit à l'émergence d'une véritable «science de la conscience«, dont le but est de faire une sorte de compte rendu scientifique de l'expérience consciente et de sa relation avec le domaine physique (par exemple, les processus cérébraux). Il définit, en référence à Seth (voir [Seth 07]) un modèle de conscience comme une théorie hypothétique sur la relation entre l'expérience consciente et le domaine physique. Les exemples incluent les théories globales de l'espace de travail (voir [Dehaene 98], [Baars 05]), la théorie de projets multiples (voir [Dennett 93]), les théories de pensée d'ordre supérieur (voir [Carruthers 16]) ou encore la théorie de l'information intégrée (voir [Oizumi 14]) entre autres. Ces «modèles de conscience» complètent, selon lui,« les théories métaphysiques de la conscience, telles que les diverses formes de fonctionnalisme, les théories identitaires, les dualismes interactifs ou les monismes neutres». Ils s'intéressent principalement aux questions ontologiques et abordent le type général de relation susceptible d'exister entre la conscience et le domaine physique. Les principaux exemples en neurosciences en seraient les versions récentes de la théorie de l'information intégrée (outre la référence précédente ([Seth 07]), on peut encore citer [Mayner 18], [Haun 19], qui visent à déterminer la qualité et la quantité de l'expérience consciente d'un système à l'aide d'un algorithme mathématique complexe (voir [Kleiner 20], [Tull 20])) ou cette variante de la théorie du traitement prédictif (voir [Metzinger 17]), qui peut être interprétée comme spécifiant le contenu de l'expérience consciente d'un système en utilisant un principe de minimisation avancé (voir [Dolgeka 20]). Cependant, des modèles prometteurs ont également été proposés

par d'autres disciplines, notamment la philosophie (voir [Chalmers 21]), la physique (voir [Kent 18], [Kent 19]), les mathématiques (voir [Penrose 94], [Kremnizer 15], [Mason 16]) ou la psychologie (voir [Hoffman 14]), tous fondés sur diverses idées métaphysiques sur la conscience. Ces différentes tentatives indiquant surtout l'intérêt croissant des chercheurs pour des outils et méthodes mathématiques susceptibles d'être utilisés dans une étude scientifique de la conscience, Kleiner a décidé de réfléchir sur la possibilité de cette mathématisation, qui ne peut avoir de sens que si elle intègre les travaux théoriques, empiriques et conceptuels antérieurs sur la conscience, afin de dessiner un cadre général pertinent à cet effet. Il ne s'agit donc pas, dans son travail, de proposer un nouveau modèle à proprement parler, mais plutôt de dégager les conditions générale d'une mathématisation de la conscience – ce que nous appellerons donc ici un «méta-modèle».

7.2 Le méta-modèle de Kleiner

Kleiner s'interroge d'abord sur les raisons qui font de la conscience un problème, et un problème difficile à résoudre pour certains, raisons qu'il attribue, dans le sillage de Nagel et de Chalmers, au fait qu'elle semble lié à une expérience subjective particulière, incluant des propriétés qui paraissent, à vrai dire, «ineffables, privées ou indisponibles au traitement ou à la communication cognitifs ou linguistiques» – en clair, tout ce qui tourne autour de la question des qualia. «On prétend aussi – écrit-il – que la conscience phénoménale est directement ou immédiatement appréhendable, qu'elle est transparente en ce sens qu'elle apparaît comme si nous étions en contact direct avec le contenu de notre expérience consciente ou qu'elle serait homogène. Diverses connotations différentes de toutes ces notions existent, et différents philosophes approuvent diverses combinaisons de celles-ci». Face à la conscience, on est donc confronté à une sorte de contradiction épistémique quant à la méthode d'investigation : l'objectivité habituelle réclamée par la science entre en opposition avec l'aspect indéniablement purement subjectif du phénomène à étudier. Le besoin d'une base mathématique spécifique se fait donc sentir, requisit que les modèles existant n'ont pas forcément pris en compte. Kleiner se propose au contraire d'analyser au préalable quelles implications les diverses caractéristiques de l'expérience consciente ont sur la structure mathématique des modèles susceptibles d'être retenus, étude qui fournirait un compte rendu précis de la façon dont les concepts développés en philosophie de l'esprit se rapportent à la structure mathématique envisagée. Il s'agit donc de produire une machinerie qui prendrait correctement en compte le fait que l'expérience consciente a des aspects ineffables, privés ou inaccessibles ainsi que l'asymétrie

épistémique évoquée plus haut. Il envisage un cadre qui, pour viser une certaine opérationnalité, devra s'avérer essentiellement restrictif. Une axiomatique doit alors le présenter de manière systématique et rigoureuse. Grosso modo, on ne fera donc pas de «forcing» mais on se contentera de laisser tomber ce qui ne semble pas pouvoir être représentable (par exemple, l'aspect ineffable) ou pouvoir relever des méthodes objectives habituelles. L'inspiration principale est, clairement, au départ, celle de Chalmers, même si une alternative à sa théorie sera finalement présentée.

Pour préciser d'emblée le champ d'application du modèle, il convient d'abord de définir une classe $\mathcal{C}$ d'organismes conscients ou de sujets susceptibles d'avoir une *expérience consciente*, cette notion désignant la totalité des impressions, des sentiments, des pensées, des perceptions, etc., qu'un sujet possédant cette expérience vit à un instant particulier de temps.

Cette expérience ayant différents aspects, propriétés ou éléments, on isole immédiatement une sous-classe de ceux-ci supposés être «non-collationnables» (autrement dit, impossibles à prendre en compte) s'il n'y a pas de méthode raisonnable pour savoir si deux ou plusieurs sujets ayant une expérience consciente expérimentent, au cours de cette expérience, ces aspects particuliers – en d'autres termes, si l'identité de ces aspects, pour plusieurs sujets d'expérience différents appartenant à $\mathcal{C}$, ne peut être déterminée. Cette distinction qui est traditionnellement celle existant entre des concepts phénoménologiques et psychologiques de l'esprit est définie ici de manière axiomatique en termes de notions phénoménologiques ou opérationnelles. Tombent évidemment dans cette sous-classe, l'ineffable, l'expérience privée et, bien sûr, les qualia. On introduit alors un concept d'espace susceptible de représenter les aspects collationnables comme non-collationnables de l'expérience consciente, quitte à laisser tomber certains caractères de ces derniers, par exemple leur contenu, et les réduire ainsi à de pures formes. Ces aspects sont alors étiquetés et on travaillera ensuite sur les étiquettes plutôt que sur les aspects eux-mêmes, pour éviter d'avoir à discuter de ce qu'ils sont vraiment, y compris pour des sujets différents.

On associe alors à l'espace E de tous les aspects un groupe d'automorphie $\mathrm{Aut}(E)$ qui est le groupe de toutes les transformations de E changeant les étiquettes de telle sorte que la structure mathématique de E lui-même reste invariante. Ce groupe permet de définir des classes d'équivalence décrivant ce qui est accessible «intersubjectivement». En fonction de la structure mathématique de E, cela peut éventuellement inclure certains des aspects non collationnables de l'expérience et peut permettre de repousser un peu la frontière de l'ineffabilité et de toutes les autres caractéristiques qui impliquent la non-collationnabilité. Dans cette démarche, il y a évidemment des questions qui échappent à la portée de la méthodologie scientifique standard : ainsi,

pourquoi tel ou tel sujet, à tel ou tel moment, a-t-il eu l'une des expériences correspondantes plutôt que l'autre ? Même si cela ne peut pas être exprimé par des moyens intersubjectifs, il y a là un fait qui peut faire l'objet d'une question ouverte. Le but de la partie restante de l'article est alors de développer des outils qui pourraient permettre d'aborder cette question.

Pour aller au-delà et développer ces outils, il faut alors introduire des hypothèses formelles sur la relation entre l'expérience consciente et le domaine physique, et présenter une structure formelle minimale suffisante pour répondre aux critères de toute théorie scientifique. En particulier, il s'agit de spécifier des variables dynamiques d qui décriront ce que la théorie entend aborder, avec une structure d'arrière-plan qui doit posséder un paramètre tel que le temps, pour faciliter la description des variations des variables dynamiques, et aussi contenir certaines lois qui isolent plus précisément certaines variations de d parmi toutes les variations possibles.

Afin de fixer davantage les variables dynamiques d, on utilise l'asymétrie épistémique de l'expérience consciente (l'opposition entre une descritpion (subjective) de cette expérience en première personne (les *aspects* sus-mentionnés) et une description (objective) en troisième personne (états neuronaux, états cérébraux ou assimilés), l'ensemble des variables dynamiques d se décomposant alors en $d = E \times P$, où E désigne la représentation mathématique de l'expérience consciente introduite plus haut, et où P désigne l'espace d'états d'une certaine théorie physique T. Comme en physique, les modèles de conscience incluant une non-collationnabilité doivent safisfaire à certaines conditions de symétrie, portée par le groupe $\mathrm{Aut}(E)$. Mais cette symétrie ne sera pas fixée de manière unique, elle dépendra des lois du modèle de conscience choisi. On aboutit alors à la définition générale de ce que devrait être un modèle de conscience. La fin de l'article étudiera dans quelle mesure les différents modèles existant satisfont ou non les exigences ici définies.

Concrètement, le méta-modèle présenté par Kleiner est un peu plus qu'un cadre de travail et présente déjà l'esquisse d'une modélisation à part entière. Selon les aspects (collationnables ou non) de l'expérience consciente pris en compte – ou selon les exemples qui peuvent l'illustrer – , l'espace E pourra prendre différentes structures qui sont celles de ce qu'on appelle habituellement «espace» en mathématiques et qui contient : les espaces métriques, les espaces topologiques, les espaces vectoriels, les variétés différentiables, les faisceaux principaux, les espaces mesurables et les espaces de Hilbert. Selon qu'on considérera alors que la physique est un domaine fermé ou non, on aura (ou pas) des relations entre la conscience et l'aspect physique du monde. Pour que de telles interactions existent, il faudra nécessairement considérer la physique comme un domaine ouvert.

Nous n'entrerons pas dans le détail mathématique de cette méta-formalisation. La remarque générale qu'elle nous suggère est qu'iI est assez étrange de voir que Kleiner, au lieu d'aborder de front le problème de la conscience, s'installe derrière, tenant pour acquis, par exemple, qu'il y a de l'ineffable dans l'expérience consciente. D'où l'idée qu'il faut que le modèle intègre nécessairement en lui cet ineffable, ce «privé», ce «non disponible» pour un traitement cognitif ou linguistique approprié de l'expérience consciente. C'est dire que le méta-modèle doit donc absolument inclure en lui des aspects représentant une ignorance, ou, disons même, une impossibilité. C'est ce que Kleiner appelle «non-collationnabilité» ("non collatability" en anglais) d'un terme qui fait penser aux relations non-collectivisantes dans la théorie des ensembles, quand on considère précisément des collections qui ne forment pas des ensembles mais ce que Cantor appelait des "multiplicités inconsistantes". À partir de là, Kleiner pose deux axiomes : le premier suppose que des aspects de l'expérience (communicable ou non communicable) peuvent être reconnus ; le deuxième qu'il existe des relations (communicables) entre tous ces aspects de sorte que «les caractéristiques structurelles de la perception pourraient être plus accessibles à une description objective, même si quelque chose était omis». Cette licence, qui semble aller à l'encontre du premier ostracisme en en limitant la portée, amène une question : si des aspects particuliers de la conscience échappent à la représentabilité, il n'est pas possible, en principe, d'en faire une modélisation. Si l'on dit, maintenant, qu'en laissant tomber une description complète, on les rend, malgré tout, représentables, comment peut-on savoir que ce qu'on a omis n'est pas, précisément, ce qui fait la specificité de la conscience ? En réalité, Kleiner semble céder, dans un premier temps, aux défenseurs d'un qualitatif irréductible pour, *in fine*, supposer qu'il est possible de contourner, dans une certaine mesure, cet interdit. Pour échapper à ce qui pourrait passer pour une incohérence, mieux aurait valu, par une démarche moins ambitieuse, choisir une perspective particulière et, en l'occurrence, s'opposer à ce courant de pensée, en réalité, profondément anti-scientifique.

Comme on le sait, la démarche de Kleiner – qui a suscité un certain engouement médiatique – a, la plupart du temps, été mal interprétée, peut-être à cause du titre de son article, qui parle de «modèle» plutôt que de «méta-modèle». Mais l'auteur a sans doute lui-même prêté le flanc à cette mauvaise interprétation du fait que, construisant une théorie susceptible de satisfaire les critères épistémologiques de toute théorie scientifique bien formée, sa construction, qui peut englober, dans le meilleur des cas, des modèles de la conscience, peut aussi convenir à toute espèce de domaine de connaissance, toute espèce d'expérience, en réalité, pour peu qu'elle comprenne des aspects proprement qualitatifs ou impossibles à préciser. L'auteur lui-même en convenant, il en est résulté que l'ensemble de la démarche pouvait en quelque sorte

contaminer la méthode scientifique traditionnelle, au point que – comme il l'a reconnu dans un certain interview – il n'était pas impossible, de son point de vue, que l'univers lui-même puisse être considéré comme conscient : conséquence, d'ailleurs, nécessaire pour peu qu'on considère que le domaine de la science physique n'est pas fermé. L'une des théorie qui l'a particulièrement inspiré, la théorie de l'information intégrée, semble d'ailleurs aller dans ce sens puisque, d'après cette théorie, plus le traitement de l'information d'un système est intégré, plus il a de conscience. Aussi bien, quoique Kleiner affirme une position de principe plutôt épiphénoménaliste, il n'exclut pas qu'on puisse trouver une preuve que l'a conscience joue un véritable rôle causal dans l'univers, ce qui reléguerait la démarche ordinaire de la physique (débouchant aujourd'hui sur la théorie des cordes ou la gravitation quantique) aux oubliettes, induisant une nouvelle révolution scientifique (anti-galiléenne, celle-là). Au-delà des (méta)-résultats qu'il obtient, la bonne question posée est celle de savoir comment nous pouvons nous rendre intelligible l'existence de la conscience et pourquoi celle-ci est attachée au domaine physique exactement de la façon qui est la sienne. Kleiner dévoile alors son idée fondamentale et ce qui constitue probablement la motivation de son travail : si l'expérience consciente possédaient certaines propriétés qui la rendent incompatible avec le type d'explication utilisé jusqu'ici dans les sciences de la nature – mais c'est ce que, suivant Nagel et Chalmers, il a précisément présupposé –, il y aurait là un «écart» réclamant une explication, et une théorie scientifique munie d'une structure mathématique adaptée à des modes d'explication plus avancés devrait se substituer aux démarches habituelles de la science «normale». Il s'agirait donc ici, ni plus ni moins, d'un changement de paradigme, rejoignant les analyses de Matloff et consonnant, qu'on le veuille ou non, avec les thèses panpsychistes rappelées plus haut. On peut évidemment douter que la science normale abandonne ses méthodes victorieuses séculaires, surtout en face d'un interdit momentané qui peut très bien céder devant des découvertes à venir : la science est dans l'histoire, y compris la science du cerveau.

En définitive, nous ne pensons pas qu'il faille aller si loin dans la remise en cause de la science. En revanche, il est vrai que ce que la physique nous apprend de la matière la fait apparaître d'une manière très différente de ce que la physique classique en disait. Est-ce une raison suffisante pour la rapprocher de l'esprit ou de la conscience ? Nous ne pensons pas que, dans l'état actuel des connaissances, ce pas puisse être franchi. Mais il est clair que les oppositions philosophiques se sont construites sur une idée de l'expérience que la physique quantique a remis en cause. Le dualisme cartésien, comme l'épiphénoménisme en général, a donc certainement du plomb dans l'aile. Il reste que, même un philosophe comme Raymond Ruyer restait prudemment à l'écart de toute assimilation intempestive. À supposer que ce dernier ait raison et que tout

point de l'espace soit un «domaine absolu», propos qui reste, pour l'instant, de l'ordre d'une métaphore, il ne s'ensuivrait pas, pour autant, que nous puissions exactement appliquer à la matière les catégories qui sont celles que nous utilisons habituellement pour décrire l'expérience associée à des structures nerveuses complexes issues d'une longue évolution. La matière elle-même, malgré des siècles de physique de plus en plus complexe, demeure, en partie, un domaine encore assez mystérieux. Il reste donc beaucoup à découvrir, y compris par des méthodes d'investigation dont on sait qu'elles ont porté leurs fruits, et qu'il serait, par conséquent, bien imprudent de vouloir totalement abandonner.

8 Appendice mathématique : les espaces non métrisables en mathématiques et en physique

Introduisons d'abord quelques définitions :

Définition 8.1 (Espaces métriques)**.** Soit E un ensemble. Une distance sur E est une application $d : E \times E \to [0, +\infty[$ telle que, pour tous x, y, z dans E,

(1) $d(x, x) = 0$ (annulation sur la diagonale) ;

(2) Si $d(x, y) = 0$, alors $x = y$ (séparation) ;

(3) $d(x, y) = d(y, x)$ (symétrie) ;

(4) $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ (inégalité triangulaire).

(5) Si d est une distance sur E, alors :

$$d(x, y) \geq |d(x, z) - d(z, y)|$$

pour tous x, y, z dans E. (Cette inégalité s'appelle l'inégalité triangulaire inverse).

Un *espace métrique* est un ensemble E muni d'une distance d. On le note souvent (E, d) [16].

16. Les espaces munis d'une distance, appelés encore «espace distanciés», ont été introduits par le mathématicien français René Maurice Fréchet (1878-1973) dans sa thèse (voir [Fréchet 28], 61-62.).

Définition 8.2 (Ultramétrique, boules, topologie induite par une distance)**.** Soit d une distance sur un ensemble E. Elle est dite *ultramétrique* si son inégalité triangulaire est remplacée par la condition (plus forte) :

$$d(x, y) \leq \text{Max}\{d(x, z), d(z, y)\},$$

appelée inégalité triangulaire ultramétrique.

Si d est ultramétrique, on a les propriétés suivantes :

(1) Pour tous x, y, z dans E, si $d(x, z) = d(z, y)$, alors $d(x, y) = \text{Max}\{d(x, z), d(z, y)\}$.

(2) Tout point d'une boule pour d en est un centre.

(3) Tout point d'une boule ouverte pour d est un centre de la sphère correspondante.

(4) Étant donné deux boules ouvertes, ou bien l'une des deux est contenue dans l'autre, ou bien elles sont disjointes.

L'ensemble O des parties U de E telles que :

$$\forall x \in U, \exists \rho > 0, B(x, \rho) \subset U,$$

est une topologie sur E, appelée topologie induite par la distance d.

Définition 8.3. Un espace topologique (E, O) est dit *métrisable* s'il existe une distance sur l'ensemble E dont la topologie induite est O.

Ce qu'il est important de comprendre est qu'il existe précisément des espaces *non métrisables*. Avant d'en donner quelques exemples, introduisons d'abord quelques propriétés des espaces topologiques.

Théorème 8.1. *Un espace topologique est séparable s'il admet une partie dénombrable dense.*

La propriété « être séparable » est invariante par homéomorphismes. Par exemple $\mathbb{R}$, et tout espace vectoriel (réel ou complexe) normé de dimension finie, est séparable (car Q^n est dense dans $\mathbb{R}^n$).

Théorème 8.2. *Un espace topologique à base dénombrable d'ouverts est séparable.*

Démonstration. Si $(U_i)i \in \mathbb{N}$ est une base d'ouverts (que l'on peut supposer non vides), si x_i est un point de U_i, alors la partie $\{x_i : i \in \mathbb{N}\}$ est dense, car elle rencontre tout ouvert non vide. □

Dans le même ordre d'idées, on peut montrer qu'un espace métrique admet un système fondamental dénombrable de voisinages.

Théorème 8.3. *Tout espace topologique métrisable est séparé.*

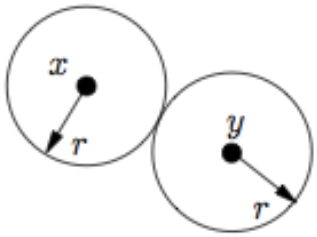


FIGURE 2 – La notion d'espace séparé

Démonstration. Montrons la converse, c'est-à-dire que si l'ensemble n'est pas séparé, il n'est pas métrisable. Soient d une distance sur un ensemble E, et x, y deux points de E. Si $x = y$, alors $r = \frac{1}{2}d(x, y) > 0$. Si l'ensemble n'est pas séparé, c'est-à-dire $B(x, r) \cap B(y, r)$ est non vide, soit z un de ses points. Alors $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y) < 2r = d(x, y)$, ce qui est impossible (rappelons que les boules sont ouvertes : voir Fig. 2). □

Voyons maintenant quelques exemples d'espaces topologiques non métrisables.

1. Rappelons que si E est un ensemble, alors $O = \{\emptyset, E\}$ est une topologie sur E, dite *topologie grossière*. La topologie grossière sur un ensemble ayant au moins deux éléments n'est pas séparée. (E, O), en ce cas, n'est donc pas métrisable.

2. L'espace topologique $(\mathbb{R}, \Theta)$, où Θ est l'ensemble des unions d'intersections finies d'éléments de toute partie P de $\mathbb{R}$, n'admet pas de base dénombrable d'ouverts. Il n'est donc pas séparable, et donc, non métrisable.

3. Tout point d'un espace métrique admettant un système fondamental dénombrable de voisinages, pour montrer qu'un espace topologique est non métrisable, il suffit souvent d'y exhiber un point qui n'admet pas un tel système. C'est le cas notamment pour certaines topologies particulières comme les topologies de Schwartz et de Whitney sur l'espace des fonctions lisses à support compact, qui ne sont pas des espaces métrisables.

4. Si l'espace $\{0,1\}$ est muni de la topologie discrète, alors $\{0,1\}^{\mathbb{N}}$ est compact, métrisable et séparable. En revanche, $\{0,1\}^{\mathbb{R}}$ est compact, séparable, mais non métrisable. Et $\{0,1\}^{\{0,1\}^{\mathbb{R}}}$ est compact, mais ni séparable (il n'est pas à base dénombrable d'ouverts), ni, par conséquent, métrisable.

La physique quantique utilise, quant à elle, des espaces vectoriels normés de dimension infinie dans lesquels on a peu de chances de trouver beaucoup de parties compactes (pour la topologie définie par la norme $|.|$, appelée parfois «topologie forte»). Or, bien des théorèmes de l'Analyse demandent de la compacité dans leurs hypothèses. Pour continuer d'appliquer ces théorèmes, il faut alors envisager des topologies non définies via des normes (ou même des distances), des topologies dites «faibles», pour lesquelles il y a moins d'ouverts (en ce sens elles sont, en quelques sorte, plus économiques), mais possédant, en revanche, plus de compacts. La question de ces topologies faibles se pose déjà dans les espaces de Hilbert, qui sont les exemples les plus simples d'espaces vectoriels normés de dimension non nécessairement finie.

Un exemple significatif d'espaces de cette sorte sont les espace L^p, dont la physique quantique fait usage, puisque l'espace des suites l^2 dont se servait Heisenberg, autrement dit l'ensemble de toutes les suites de nombres complexes dont le carré des valeurs absolues amène une somme finie, équivaut à l'espace $L^2(-\infty;+\infty)$ de Schrödinger, à savoir, l'ensemble de toutes les fonctions mesurables d'une variable complexe à carré sommable (fonctions de Lebesgue). Et l'on sait que trouver la «valeur propre» d'un opérateur dans L^2 revient à diagonaliser la matrice correspondante dans l^2, opération d'algèbre linéaire parfaitement banale qui permet la «mesure». Les systèmes quantiques sont donc liés à ce type d'espaces non métrisables et à topologies faibles.

On notera aussi que le formalisme quantique implique une logique particulière caractéristique de la non-séparabilité de certains phénomènes expérimentaux. Lorsque ceux-ci sont décrits par des propositions bien formées, ils constituent un ordre partiel aux propriétés très différentes de celui qui caractérise les phénomènes de la physique classique et les énoncés qui les traduisent. En termes plus mathématiques, le treillis quantique des sous-espaces fermés d'un espace de Hilbert possède certaines propriétés comme la non-distributivité qui contredisent les représentations (booléennes) associées à la physique classique.

C'est l'ensemble de ces formalismes qui se trouve «derrière» la métaphore ruyerienne de la «surface absolue» ou du «domaine absolu» pour caractériser la matière ou l'espace, et qu'il s'agirait d'approfondir dans la perspective d'une théorie qui chercherait

à expliquer comment l'univers a pu se rendre capable, localement, d'une sorte d'auto-aperception, ce que nous nommons, quand nous considérons les êtres organisés les plus performants, du nom d'«esprit» ou de «conscience». Dans le cas de l'exemple de l'unité de liaison de H2O, considéré par Ruyer dans *Néofinalisme* (voir [Ruyer 52], 114), il est clair qu'on a affaire à un espace non séparé, donc non métrisable (voir Fig. 3).

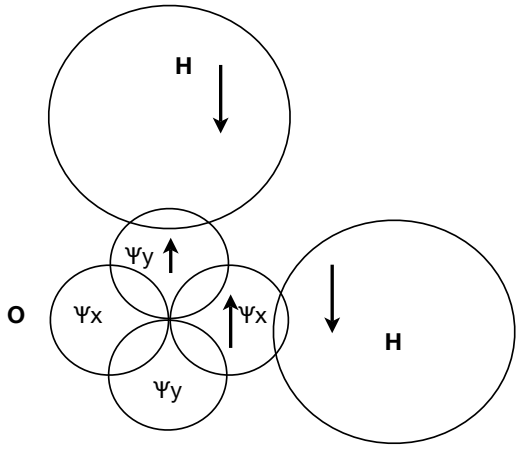


FIGURE 3 – L'unité de la molécule d'H2O selon Ruyer

Références

[Adlam 16] Adlam, E., Kent, A., «Quantum paradox of choice : More freedom makes summoning a quantum state harder», *arXiv* : 1509.04226 [quant-ph] (ou *arXiv* : 1509.04226v1 [quant-ph], *Phys. Rev.* A 93, 062327, 21 June 2016.

[Arcy (d') 72] Arcy (d'), Ph., *La Réflexion*, Paris, P.U.F., 1972.

[Baars 05] Baars, B.J., "Global workspace theory of consciousness : Toward a cognitive neuroscience of human experience", *Prog. Brain Res.*, 150, 45-53, 2005.

[Bitbol 05] Bitbol, M., *Physique et philosophie de l'esprit*, Paris, Flammarion, 2005.

[Born 71] Born, M., *Structure atomique de la matière*, Armand Colin, Paris, 1971.

[Bouchet 49] Bouchet, H., *Introduction à la philosophie de l'individu* Flammarion. Paris, 1949,

[Broglie (de) 47] Broglie (de), L., *Physique et Microphysique*, Albin Michel, Paris, 1947.

[Carruthers 16] Carruthers, P., "Higher-Order Theories of Consciousness", in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Zalta, E.N., Ed., Metaphysics Research Lab, Stanford University, Stanford, CA, USA, 2016.

[Chalmers 95] Chalmers, D. J., "Facing up to the problem of consciousness", *Journal of Consciousness Studies*, 2 (3), 200-19, 1995.

[Chalmers 96] Chalmers, D. J. The conscious mind. New York : Oxford University Press, 1996.

[Chalmers 21] Chalmers, D., McQueen, K., "Consciousness and the collapse of the wave function", In *Quantum Mechanics and Consciousness*, Oxford University Press, New York, NY, USA, (à paraître).

[Chenais 71] Chenais, D., Terrenoire, M., *Pseudoquestionnaires*, *Revue française d'informatique et de recherche opérationnelle*, Série rouge, tome 5, no R2, 43-54, 1971.

[Debaise 12] Debaise, D., « Qu'est-ce qu'une subjectivité non-humaine ? L'héritage néo-monadologique de B. Latour », *Archives de Philosophie* 75, 587-596, 2012.

[Debaise 17] Debaise, D., « Les puissances subjectives de la nature selon Gabriel Tarde », *Cahiers de philosophie de l'université de Caen* [En ligne], 54 | 2017, mis en ligne le 01 février 2019, consulté le 26 novembre 2020.

[Dehaene 98] Dehaene, S. ; Kerszberg, M. ; Changeux, J.P., "A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks", *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95, 14529-14534, USA 1998.

[Dennett 93] Dennett, D.C., *Consciousness Explained ;*,Penguin, London, UK, 1993.

[Depraz 01] Depraz, N., *La Conscience. Approches croisées, des classiques aux sciences cognitives*, Armand Colin, Paris, 2001.

[Dolgeka 20] Dolkega, K., Dewhurst, J.E., "Fame in the predictive brain : A deflationary approach to explaining consciousness in the prediction error minimization framework", *Synthese*, 2020.

[Eccles 94] Eccles J. C., *How the Self Controls Its Brain*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1994, tr. fr. *Comment la conscience contrôle le cerveau*, Fayard, Paris, 1997.

[Ey 54] Ey, H., «Structure et déstructuration de la conscience», *Études psychiatriques*, tome 3, Étude n° 27, 1954.

[Ey 63] Ey, H., *La Conscience*, P. U.F., Paris, 1963.

[Fichant 74] Fichant, M., Pêcheux, M., *Sur l'histoire des sciences*, Maspero, Paris, 1974.

[Fisher 15] Fisher, M., «Neurons and Cognition (q-bio.NC), Biological Physics (physics.bio-ph) ; Quantum Physics (quant-ph), *arXiv* :1508.05929 [q-bio.NC] (or *arXiv* :1508.05929v2 [q-bio.NC], *Annals of Physics*, 362, 593-602, 2015.

[Fréchet 28] *Les espaces abstraits et leur théorie considérée comme introduction à l'Analyse générale*, Gauthier-Villars, Paris, 1928.

[Goff 17] Goff. Ph., (en coll. avec Seager W. et Allen-Hermanson, S.), "Panpsychism", *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, https ://plato.stanford.edu/entries/panpsychism/, 2017.

[Goff 19] Goff, Ph., *Galileo's Error : Foundations for a New Science of Consciousness*, Rider Books, Penguin Random House, London, 2019.

[Görnitz 18] Görnitz, Th. (avec Görnitz B.), *Protyposis – an introduction, Consciousness and Matter from Quantum Information*, English edition Verlag : DAS NEUE DENKEN, München, 2018.

[Gravoglu 11] Gavroglu, K., Simões, A., *Neither Physics nor Chemistry : A History of Quantum Chemistry*, MIT Press, Cambridge, MA, 2011.

[Haun 19] Haun, A., Tononi, G., "Why does space feel the way it does ? Towards a principled account of spatial experience", *Entropy*, 21, 1160, 2019.

[Heisenberg 62] Heisenberg, W., *La nature dans la physique contemporaine*, tr. fr. Gallimard, Paris, 1962.

[Hiberty 08] Hiberty, Ph., Trong Anh N., *Introduction à la chimie quantique*, Presses de l'Ecole Polytechnique, Paris, 2008.

[Hoffman 14] Hoffman, D.D., Prakash, C., "Objects of consciousness", *Front. Psychol.*, 5, 577, 2014.

[Husserl 13] Husserl, E., *Ideen zur einer reinen Phaenomenologie und phaenomenologischen Philosophie*, Halle, 1913.

[Jordan 41] Jordan, P., *Die Physik und das Geheimnis des organischen Lebens*, 1941, 6e édition, 1948 ; tr. fr. *La physique et le secret de la vie organique*, Albin Michel, Paris, 1959.

[Kent 18] Kent, A., "Quanta and qualia", *Found. Phys.*, 48, 1021-1037, 2018.

[Kent 19] Kent, A., "Toy Models of Top Down Causation", arXiv :1909.12739, 2019.

[Kleiner 20] Kleiner, J., "Mathematical Models of Consciousness", *Entropy*, May 2020.

[Kragh 95] Kragh, H., «Arthur March, Werner Heisenberg, and the search for a smallest length/Arthur March, Werner Heisenberg, et la notion de longueur minimale», *Revue d'histoire des sciences*, 48-4, 401-434, 1995.

[Kremnizer 15] Kremnizer, K., Ranchin, A., "Integrated Information-induced quantum collapse", *Found. Phys.*, 45, 889-899, 2015.

[Levinas 63] Levinas, E., *Théorie de l'intuition dans la phénoménologie de Husserl*, Vrin, Paris, 1963.

[Lewis 56] Lewis, C. I., *Mind and the World Order : Outline of a Theory of Knowledge*, Highlightin edition, Dover, 1956.

[Locke 99] Locke, J., *An Essay concerning human understanding* (1690), The Pennsylvania State University, Electronic Classics Series, Jim Manis, Faculty Editor, Hazleton, PA, 1999.

[Malebranche 42] Malebranche, N., *De la Recherche de la Vérité* (1674-75), texte établi par Jules Simon, Charpentier, Paris, 1842.

[March 65] March, A., *La physique nouvelle et ses théories*, tr. fr. Gallimard, Paris, 1965.

[Mason 16] Mason, J.W.D., "Quasi-conscious multivariate systems", *Complexity*, 21, 125-147, 2016.

[Matloff 17] Matloff, G. L., «Can Panpsychism Become an Observational Science ?», *Journal of Consciousness Exploration & Research*, vol. 7, Issue 7, 524-543, August 2016.

[Mayner 18] Mayner, W.G.P., Marshall, W., Albantakis, L., Findlay, G., Marchman, R., Tononi, G., "PyPhi : A toolbox for integrated information theory", *PLoS Comput. Biol.*, 14, e1006343, 2018.

[Metzinger 17] Metzinger, T., Wiese, W., "Philosophy and Predictive Processing", *Number*, 978-3-95857-138-9 ; MIND Group : Frankfurt am Main, Germany, 2017.

[Nakagomi 92] Nakagomi, T., «Quantum monadology : A world model to interpret quantum mechanics and relativity», *Open Systems & Information Dynamics*, volume 1, 355-378, 1992).

[Nakagomi 03] Nakagomi, T., «Quantum monadology : A consistent world model for consciousness and physics», *Biosystems* 69 (1), 7-38, Mai 2003.

[Nagel 74] Nagel, Th., "What is it like to be a bat ?", *Philosophical Review* 4, 435-450, 1974.

[Oizumi 14] Oizumi, M., Albantakis, L., Tononi, G., "From the phenomenology to the mechanisms of consciousness, Integrated information theory 3.0.", *PLoS Comput. Biol.*, 10, e1003588, 2014.

[Parrochia 93] Parrochia, D., "L'intentionnalité selon John Searle", in L.Sfez (dir.),*Dictionnaire de la Communication*, 883-888 ,Paris, P.U.F., 1993.

[Parrochia 97] Parrochia, D., *Les grandes révolutions scientifiques du XX^{e} siècle*, P.U.F., Paris, 1997.

[Parrochia 19] Parrochia, D., "On some (so called) paradoxs of quantum physics", arXiv :1906.10172 [pdf, other] quant-ph physics.hist-ph, 13 juin 2019.

[Parrochia 21] Parrochia, D., "On von Weizsäcker's philosophy of Quantum Mechanics", *arXiv* :2103.07311v1 [physics.hist-ph] 9 Mar 2021.

[Paty 07] Paty, M., «L'espace physique vu du monde quantique : une approche épistémologique», in M. Lachièze-Rey, *L'espace physique, entre mathématiques et philosophie*, 41-79, EDP-Sciences, Paris, 2006, HAL, 1-39, 2007.

[Penrose 89] Penrose, R. *The Emperor's New Mind : Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (1989), rééd. Oxford Universitary Press, Oxford, 1999.

[Penrose 94] Penrose, R. *Shadows of the Mind*, Oxford University Press, vol. 4, Oxford, UK, 1994.

[Penrose 97] Penrose, R., Shimony, A., Cartwright, N. et Hawking, S., T*he Large, the Small, and the Human Mind*, Cambridge University Press, 1997.

[Piaget 03] Piaget, J., *La représentation du monde chez l'enfant*, Quadrige, PUF, Paris, 2003.

[Picard 65] Picard, C. F., *Théorie des questionnaires*, Gauthier-Villars, Paris, 1965.

[Rockwell 14] Rockwell, T., "The hard problem is dead : Long live the hard problem", *Coreopsis*, 2014.

[Ruyer 20] Ruyer, R., *La Conscience et le corps* (1937), rééd. Paris, Vrin , 2020.

[Ruyer 52] Ruyer, R., *Néofinalisme*, P.U.F., Paris, 1952.

[Ruyer 66] Ruyer, R., *Paradoxes de la conscience et limites de l'automatisme*, Paris, Albin Michel, 1966.

[Ruyer 68] Ruyer, R.,*La cybernétique et l'origine de l'information*, Flammarion, Paris, 1968.

[Ruyer 79] Ruyer, R., «L'immortalité est inutile : avoir vécu suffit », *Questions de*, 32, 27-31, septembre-octobre 1979.

[Ruyer 13] Ruyer, R., *L'embryogénèse du monde et le Dieu silencieux*, Klincksieck, Paris, 2013.

[Sartre 47] Sartre, J.-P., "Une idée fondamentale de la philosophie de Husserl : l'intentionnalité", *Situations I*, Paris, Gallimard, 1947.

[Seth 07] Seth, A., "Models of consciousness", *Scholarpedia*, 2, 1328, 2007.

[Skrbina 09] Skrbina, D., "Panpsychism", *Internet Encyclopaedia of Philosophy*, A Peer-Reviewed Academic Resource, https ://iep.utm.edu/panpsych/, 2009.

[Stoica 21] Stoica, O. C., "3D-Space and the preferred basis cannot uniquely emerge from the quantum structure", *arXiv* : 2102.08620v5 [quant-ph] 5 Apr 2021.

[Tull 20] Tull, S., Kleiner, J., "Integrated information in process theories", arXiv :2002.07654, 2020.

[Uexküll (von) 65] von Uexküll, J., *Mondes animaux et mondes humains*, tr. fr. Paris, Gonthier-Médiations, 1965.

[Wheeler 89] Wheeler, J. A., "Information, Physics, Quantum : the search for links", *Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics*, 354-368, Tokyo, 1989.

[Wigner 79] Wigner, E, "Remarks on the mind-body question", *Symmetries and Reflections*, 171-184, Ow Bow Press, Woodbridge (USA), 1979.

[Yasue 99] Yasue, K., «Quantum monadology», In Stuart R. Hameroff, Alfred W. Kaszniak & David J. Chalmers (eds.), *Toward a Science of Consciousness Iii*, MIT Press, Cambridge MA, 1999.

Site internet : https ://philpapers.org/rec/ROCTHP.