

AFSCET

Res-Systemica

Revue Française de Systémique
Fondée par Evelyne Andreewsky

Volume 12, novembre 2014
Modélisation des Systèmes Complexes

Res-Systemica, volume 12, article 12

De la dualité “sujet-objet”
à la relation “observateur-observé”

François Dubois

article reçu le 29 novembre 2014
exposé du 20 octobre 2011



Creative Commons

De la dualité “sujet-objet” à la relation “observateur-observé”

François Dubois ^{a,b}

^a *Association Française de Science des Systèmes Cybernétiques, Cognitifs et Techniques
AFSCET - ENSAM, 151 Bd de l'Hôpital, Paris 13ème, France.*

^b *Professeur de Mathématiques au Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris.
francois.dubois@math.u-psud.fr*

30 décembre 2012 ¹

Résumé

Nous rappelons quelques éléments fondamentaux relatifs aux systèmes dynamiques, au chaos, aux fractales et à la physique quantique. Dans une pensée qui remonte à Démocrite, nous définissons ce que nous nommons “Atome”, puis nous rappelons l’hypothèse fractaquantique qui suppose l’approche quantique applicable à tous les Atomes de la nature, quelle que soit leur taille. En suivant ce paradigme, la dualité sujet-objet doit être repensée comme une relation observateur-observé, décrite simplement par extension de la notion de mesure quantique à des Atomes d’échelles différentes. Nous proposons deux applications : un modèle quantique pour le vote et une interprétation de l’acte d’écrire comme une mesure quantique.

Mots clés : continu, discret, équations différentielles, chaos, fractales, mécanique quantique, règle de Born, hypothèse fractaquantique, Atome, mesure multi-échelle, vote, écriture.

¹ Communication présentée lors de l’atelier “Modélisation des Systèmes Complexes” au sein du huitième congrès de l’Union Européenne de Systémique, Bruxelles, 20 octobre 2011. Edition 22 novembre 2014.

**From “subject-object” duality
to “observer-observed” relation**

Abstract

We recall some fundamental ingredients relative to dynamical systems, chaos, fractals and quantum physics. We define a notion of “Atom” in the sense given by Democritus. Then we introduce the fractaquantum hypothesis that suppose the quantum framework applicable to all Atoms in nature, whatever their scale. Following this paradigm, we re-think subject-object duality as an observer-observed relation, simply described by the extension of the notion of quantum measure to Atoms of various scales. We propose two applications: a quantum model for voting and an interpretation of writing as a quantum measuring.

Key words: continuous, discrete, ordinary differential equations, chaos, fractals, quantum mechanics, Born rule, fractaquantum hypothesis, Atom, multi-scale measuring, voting, writing.

Introduction

Le processus d’écriture de ce texte est-il assimilable à une mesure quantique ? Si cette question est lue et comprise, la relation entre le lecteur et l’auteur est le résultat d’une médiation sociale grâce au langage. Ce *corpus* commun de culture nous permet de communiquer. Nous appartenons à un même groupe social, les francophones pour notre exemple. La lecture et l’écriture de la langue française est une caractéristique essentielle de cette communauté. En retour, si un auteur désire être lu et compris, il doit accepter les règles qui caractérisent le Français, comme la grammaire et l’orthographe. *Cet a priori* des règles communes pour communiquer concerne non seulement l’écriture, mais aussi la prise de parole ou même la composition musicale. Plus généralement, se pose la question des liens entre un individu et un groupe social auquel il appartient. De façon duale, comment une société interagit-elle avec les individus qui la composent ?

Avec cet exemple de la relation sociale, nous sommes en présence de deux “échelles” fondamentalement différentes : la micro-échelle avec l’individu et la macro-échelle avec la structure sociale. Ces relations entre échelles existent aussi dans beaucoup d’autres contextes. La surprise vient de la physique microscopique, la science des échelles spatiales si petites qu’elles ne nous sont pas directement perceptibles. Pour comprendre cette physique, la mécanique quantique est une théorie qui met en exergue l’ignorance de l’observateur à l’aide de puissants outils mathématiques.

Pour approfondir ces questions, nous reprenons dans cette contribution un travail antérieur sur le continu classique et le discret quantique [17]. Nous partons d’un paradoxe de Zénon d’Elée, rappelons (première partie) quelques éléments fondamentaux sur les équations différentielles ordinaires et les systèmes dynamiques. Nous sommes alors confrontés au chaos qui surgit du déterminisme et ce chaos est intimement lié aux structures fractales qu’il développe (seconde partie). Une structure fractale est analogue à elle-même aux diverses échelles. Elle se contient elle-même en réduction. Nous proposons également une introduction rapide à la mécanique quantique (troisième partie).

Nous avons eu l’idée il y a quelques années de partir de la quantique aux petites échelles et de l’étendre au monde macroscopique. Avec l’hypothèse fractaquantique (quatrième partie), nous supposons la nature essentiellement fractale, c’est à dire analogue à elle-même aux différentes échelles spatiales. L’approche quantique peut être utilisée hors du champ de la physique microscopique. Il faut alors repenser les notions de sujet et d’objet (cinquième partie) et nous montrons que le formalisme quantique de la règle de Born s’étend à des mesures multi-échelles (sixième partie). Nous illustrons notre approche avec un fait social comme un processus de vote et montrons qu’une mesure est aussi une violence faite à l’individu observé (septième partie). Enfin (huitième partie), nous émettons l’hypothèse que l’écriture pourrait être un processus de mesure au sens quantique, une “réduction du paquet d’ondes”.

1) Equations différentielles ordinaires

La description du mouvement comme un processus d'évolution temporelle a d'abord donné lieu à une situation paradoxale décrite par Zénon d'Elée au cinquième siècle avant notre ère. Bien qu'Achille aille plus vite que la tortue, il ne la rattrape pas ! En effet, pour parcourir la moitié de la distance qui le sépare de la tortue, Achille met un certain temps. Mais durant ce temps-là, la tortue a avancé ! Il en est de même pour la distance suivante : le temps qu'Achille en parcourt la moitié, la tortue s'est encore déplacée... Donc, pour Zénon, Achille ne peut pas rattraper la tortue.

Cette contradiction est levée par une réflexion approfondie sur le concept d'infini. La somme des intervalles de temps qui est considérée par Zénon peut s'écrire sous la forme : un demi, plus un quart, plus un huitième, *et caetera*. Cette somme comporte une infinité de termes mais il s'agit bien d'une somme finie ! On travaille alors avec une "série convergente", une "limite mathématique" qui est un objet caractéristique du calcul infinitésimal, inventé entre autres par Gottfried Leibniz et Isaac Newton au dix-septième siècle.

Cette constitution de l'analyse mathématique, du calcul sur des grandeurs infiniment petites, ouvre la voie aux équations différentielles, dites "ordinaires" depuis l'ouvrage de Vladimir Arnold [3] dans les années 1960. Ce méta-modèle permet une réelle universalité trans-disciplinaire. Il permet par exemple de décrire un système mécanique simple comme une masse et un ressort, un circuit électrique, ou bien un satellite autour de la Terre. Nous pouvons l'illustrer ici par le système des proies et des prédateurs proposé par Alfred Lotka et Vito Volterra au début du vingtième siècle. La présence de termes non linéaires qui prennent en compte de réelles interactions entre les acteurs du système conduit à un "cycle limite", une oscillation auto-entretenu d'origine parfaitement non banale. Inutile de rappeler l'universalité de l'approche mathématique : une fois le phénomène modélisé avec un jeu d'équations, il peut se transcrire d'une discipline à l'autre. Il permet aussi de proposer des modèles mathématiques de dynamiques économiques et sociales à l'aide de la "dynamique des systèmes" proposée par l'équipe de Jay Forrester [29].

On retrouve les mathématiques discrètes si on essaie de calculer numériquement la solution approchée d'un système dynamique, c'est à dire la donnée d'une part d'une équation différentielle qui décrit l'évolution au cours du temps et d'autre part d'une condition initiale. Au dix-huitième siècle, Leonhard Euler propose d'introduire un "quantum" de temps, un (petit) intervalle Δt et de chercher une valeur approchée du système pour des multiples entiers de ce quantum Δt . Au début du vingtième siècle, Carl Runge et Wilhelm Kutta ont généralisé cette démarche pour construire des algorithmes utilisés tous les jours par les ingénieurs du vingt et unième.

Ces problèmes de discrétisation sont au cœur des approches modernes qui utilisent les ordinateurs pour effectuer des calculs numériques. Une calculatrice électronique implé-

mente un algorithme, qui est la trace discrète de l'équation différentielle du modèle continu, après l'étape cruciale de discrétisation. Discrétiser permet le passage d'un univers mathématique continu à un cadre abstrait paramétré par les nombres entiers. Il s'agit d'un nouveau modèle, purement numérique et discret. Cette étape contient de réelles difficultés de nature mathématique cachées entre la modélisation, la mise en équations, et la mise en œuvre sur ordinateur, à savoir la stabilité, phénomène découvert et étudié au milieu du vingtième siècle par John Von Neumann (voir par exemple [15]) et Peter Lax [41]. A cause des erreurs d'arrondis dans les calculs numériques, seuls les schémas numériques *stables* peuvent être effectivement utilisés avec un ordinateur. Sur la question des erreurs d'arrondis, nous renvoyons le lecteur à la méthode de “contrôle et estimation stochastique des arrondis de calcul” de Michel La Porte et Jean Vignes [39] et aux développements de Nathalie Revol [59] sur l'arithmétique par intervalles.

2) Chaos et fractales

Le chaos peut surgir des équations différentielles. C'est une grande découverte d'Henri Poincaré [58] à la fin du XIXième siècle, enfin comprise dans les années 1960 par le météorologue Edward Lorenz [45] et mise en forme par les mathématiciens David Ruelle et Floris Takens [61]. Pour des systèmes “bien choisis” d'équations différentielles, une petite perturbation des conditions initiales comme “le mouvement d'une mouette” (selon Edward Lorenz [45]) entraîne après un temps fini un écart sur la solution du système qui est de l'ordre de grandeur de la taille de l'espace de configuration explorable. La prédiction du mouvement est impossible du point de vue pratique et algorithmique. Une discrétisation assez précise du système pour assurer une prédiction correcte coûterait trop cher. De plus, la structure limite suivie par le système aux temps longs est intrinsèquement complexe, on la qualifie parfois d'attracteur étrange et elle est le plus souvent de dimension “non entière”. On a une phénoménologie analogue avec des systèmes purement discrets comme par exemple pour l'attracteur de Michel Hénon [35], très populaire car facile à programmer (voir la figure 1).

D'autres figures fractales c'est à dire analogues à elles-mêmes lors de transformations géométriques qui diminuent les longueurs, reposent sur des relations algébriques très simples et sont associées à des dimensions non entières. Ainsi, l'ensemble \mathcal{M} de Benoît Mandelbrot [46] est défini dans le plan par l'ensemble des points $a \in \mathbb{C}$ du plan complexe tels que la suite définie par

$$(1) \quad z_0 = 0, \quad z_{k+1} = z_k^2 + a, \quad k \text{ entier} = 0, 1, 2, \dots$$

reste bornée si l'entier k tend vers l'infini. Une structure géométrique d'une richesse extraordinaire émerge d'une définition tout à fait élémentaire... Et l'ensemble \mathcal{M} est fractal, il contient sa propre réplique en son sein. Le détour par l'informatique et l'abstraction a permis de “voir” la structure fractale de la nature. En effet, les arbres, nos poumons, les villes, les structures sociales, sont fractales : la partie est la réplique du tout à une autre

échelle. Après un grossissement, un zoom, la différence entre le grand et le petit n'est plus perceptible.

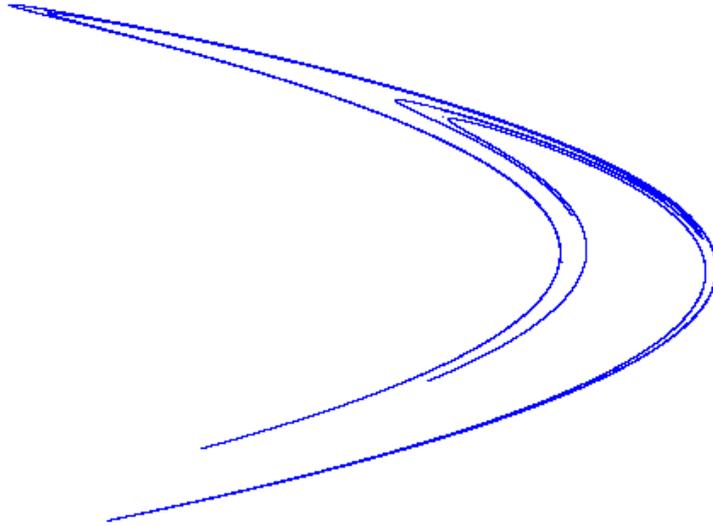


Figure 1. Attracteur de Hénon.

Les itérations de l'application $(x, y) \mapsto (x', y') = (1 + y - ax^2, bx)$ avec $a = 1,4$ et $b = 0,3$, en partant de $(x, y) = (1, 0)$ conduisent à une géométrie qualifiée d'«étrange».

Ce chaos surgi des «systèmes déterministes» les plus classiques n'est pas restreint aux modèles mathématiques. En cherchant des méthodes de prévision du mouvement des planètes du système solaire sur de très longues périodes de temps (le milliard d'années typiquement), Jacques Laskar a découvert en 1996 [40] que ce problème n'a pas de solution ! Si le mouvement des grosses planètes (Jupiter, Saturne) est stable et possible à déterminer dans un futur même très lointain, le mouvement des planètes intérieures (Mercure, Vénus, la Terre et Mars) est chaotique sur des périodes de l'ordre du million d'années, ce qui est très peu comparé à l'âge du système solaire, de l'ordre du milliard d'années. Le «chaos déterministe» entraîne l'impossibilité d'une prédiction quantitative effective.

3) Mécanique quantique

Nous changeons complètement de sujet pour décrire de façon aussi succincte que possible une révolution scientifique débutée au XXIème siècle. L'étude de la physique de l'infiniment petit, des atomes, composants *a priori* ultimes de la matière, a débouché sur une théorie selon nous à la fois empirique et mathématique, la mécanique quantique. A petite échelle, disons le milliardième de mètre, dimension caractéristique de l'atome, on ne peut plus parler de mouvement continu. En effet, une telle hypothèse conduirait à des paradoxes comme un rayonnement électromagnétique incompatible avec la constation première que si les atomes existent, ils sont stables. On peut mettre en évidence au contraire

des raies d’émission de “grains de lumière”, selon l’hypothèse du photon formulée par Albert Einstein au début du vingtième siècle [25]. Ce cadre conceptuel pour expliquer l’effet photo-électrique lui valut le prix d’Alfred Nobel une quinzaine d’années plus tard. Suite à ce choc conceptuel de la physique quantique, l’évidence qu’à petite échelle la nature est composée de “grains élémentaires” qui échappent à notre perception, les physiciens sont devenus très modestes dans leur approche de la description du monde. Pour Werner Heisenberg [34], “c’est avant tout le réseau des rapports entre l’homme et la nature qui est la visée centrale de cette science [la Physique]”. En effet, l’observation, la mesure, perturbent fondamentalement le monde microscopique que l’on cherche à observer.

Ainsi, la théorie quantique initiée par Niels Bohr et l’ensemble de l’école de Copenhague propose simplement de déterminer une densité de probabilité de présence d’un “objet élémentaire” pour toute position possible. L’outil mathématique est la “fonction d’onde” proposée initialement par Louis de Broglie (1924). L’évolution au cours du temps de cette fonction d’onde, ou “vecteur d’état”, est à la fois continue et discrète ! Si on n’observe pas le système quantique, il suit l’évolution proposée par Erwin Schrödinger (1928), version quantique de la conservation de l’énergie. Il s’agit d’une équation différentielle posée sur un espace de dimension infinie, une “équation aux dérivées partielles” qui décrit une évolution libre à une échelle donnée, une “ligne droite” en quelque sorte. Si on effectue une mesure physique, il y a “réduction du paquet d’ondes”, évolution discrète “instantanée” décrite par Max Born [11] *via* la “règle de Born”. On peut interpréter cette règle comme une localisation, un passage brutal de l’“onde” à la “particule”. La mesure impose une contrainte très forte pour le système observé *via* une famille d’états particuliers imposés par l’observateur. Du point de vue mathématique, il s’agit d’une *projection* géométrique dans un espace de David Hilbert, sur un “mode propre” de l’appareil de mesure. Avec la règle de Born, l’approche quantique permet l’introduction simple du hasard au sein de la modélisation mathématique. Notons que le calcul quantique des probabilités ne relève *pas* de l’axiomatique proposée en 1933 par Andreï Nikolaïevitch Kolmogorov dans son ouvrage fondateur “Fondements de la théorie des probabilités” [37].

Pour développer des approches statistiques compatibles avec les observations, la physique quantique suppose l’indiscernabilité fondamentale de deux atomes, deux électrons, deux photons, *etc.* Une conséquence importante concerne la dualité entre la “matière” (fermions) et les “relations” (bosons). Les quantons (fermions ou bosons) sont indiscernables au sein d’une même famille. Il est étonnant de constater que ce cadre conceptuel très peu satisfaisant du point de vue esthétique fournit des prédictions numériques remarquables, comme par exemple les treize (!) chiffres significatifs [8] de la “constante de Rydberg” qui permet de prédire les fréquences lumineuses émises par les atomes. De plus, la réduction du paquet d’onde peut avoir des effets non locaux en espace. L’expérience d’Alain Aspect et ses collaborateurs [5] a montré que deux photons de lumière peuvent être “intriqués”. Dans ce cas, ils forment, bien que distants de plusieurs mètres, un seul et même “objet quantique” [ces guillemets car cette expression d’“objet quantique” est

profondément insatisfaisante, comme nous allons le voir plus loin], un seul et même “quanton”, selon l’expression de Jean-Marc Lévy-Leblond et Françoise Balibar [43], un seul et même “élément du monde”, selon l’approche de Thomas Filk et Albrecht von Müller [28]. Pour nous, l’intrication impose de repenser la notion d’espace, comme nous l’avons évoqué par ailleurs [19].

Cette réalité quantique, ou plutôt ce “non connu” fondamental sur ce qu’est la réalité du monde à petite échelle, ce “réel voilé” selon Bernard d’Espagnat [26], doit nous faire remettre en cause des phrases aussi simples que “Achille part d’un point précis d’Athènes et rattrape la tortue à la vitesse exacte de trente kilomètres par heure”. Les relations d’incertitude de Werner Heisenberg (1927) montrent qu’on ne peut mesurer avec une précision arbitraire à la fois la position et l’impulsion d’un atome ou d’une molécule. Une conséquence fondamentale est que l’équilibre statique, l’immobilisme est impossible aux petites échelles de la nature. Le quantum d’action, la constante h proposée par Max Planck dès la fin du dix-neuvième siècle, est toujours présente pour mesurer l’incertitude fondamentale entre la position et la vitesse, entre mesure de durée et mesure d’énergie, même pour les états les plus stables. Il introduit des fluctuations permanentes, des mouvements infinitésimaux nécessaires, qui rendent une évolution toujours potentielle. Retenons que la physique quantique impose que la vitesse d’Achille ne peut pas être connue avec une précision infinie si on sait très exactement d’où il part. C’est une théorie qui ne prédit que le résultat possible d’une mesure grâce à un calcul de probabilités.

4) Hypothèse fractaquantique

Dans la suite de notre premier travail [18], nous appelons Atome (avec un “A” majuscule) tout élément du monde dont les propriétés qualitatives sont modifiées dans au moins une des parties si on le divise en deux. Il s’agit d’une “relecture” de la notion d’atome proposée par Démocrite et nous renvoyons le lecteur aux travaux contemporains de Jean Salem [62] par exemple. Les Atomes sont caractéristiques de la multiplicité des structures stables de la nature à différentes échelles : nucléons, atomes (avec un “a”, minuscule, celui d’Ernest Rutherford, de Niels Bohr et de la “physique atomique”), molécules, macromolécules, cellules, êtres vivants multicellulaires, mammifères, homme, structures sociales, *etc.*

L’hypothèse fractaquantique, proposée au congrès de l’Union Européenne de Systémique de 2002 en Crète, exprime que la nature est à la fois fractale et quantique. Fractale, la nature est analogue à elle-même aux diverses échelles spatiales. Or on sait que la physique quantique est une théorie prédictive bien établie aux petites échelles spatiales. Si la nature est quantique et fractale, comme l’approche quantique est opératoire aux échelles microscopiques, elle doit être valable pour tous les Atomes de la nature, quelle que soit leur taille.

Une difficulté majeure, analysée dans nos premières contributions sur le sujet [18, 19, 20], concerne l’indiscernabilité. Rappelons que l’indiscernabilité fonde les statistiques quantiques d’Enrico Fermi et Paul Dirac d’une part, de Satyendranath Bose et Albert Einstein d’autre part, c’est à dire la dualité matière-relation. Et cette indiscernabilité contredit clairement l’apparence macroscopique ! L’altérité est là pour affirmer que “vous n’êtes pas moi” et “je ne suis pas vous”. D’où une tentation d’abandonner cette recherche, devant une contradiction si évidente. Mais cette contradiction est-elle universelle ? Nous savons, avec René Descartes [16] qu’“il faut savoir suspendre son jugement” et que tout simplement, les sens nous trompent !

De plus, il existe des exemples où l’indiscernabilité des êtres est aussi une bonne approximation ! Le comportement d’une foule par exemple suppose des individus interchangeables, ainsi que Sigmund Freud l’a bien analysé [30]. Un autre exemple troublant suggère l’existence d’éléments naturels interchangeables comme les cellules totipotentes lors du développement embryonnaire, les cellules souches, mises en évidence par Martin Evans, Matthew Kaufman et Gail Martin [27, 48]. Même l’étude détaillée du génome humain milite selon nous pour l’indifférenciation. En effet, on sait depuis le travail de John Craig Venter et ses collaborateurs [69], que deux séquences d’acide désoxyribonucléique de deux êtres humains différents coïncident à 99,99 % ! Cette remarque fonde même l’existence de la médecine, ainsi qu’en témoigne par exemple Emmanuel Nunez [53] : “La part d’indiscernabilité est ce qu’il y a de commun à tous les hommes”. Notons que cette question de l’individuation a été étudiée en détail par Gilbert Simondon [65] ; il développe une position ouverte où “l’être est donné dans chacune de ses phases, celle du préindividuel et celle d’individué”.

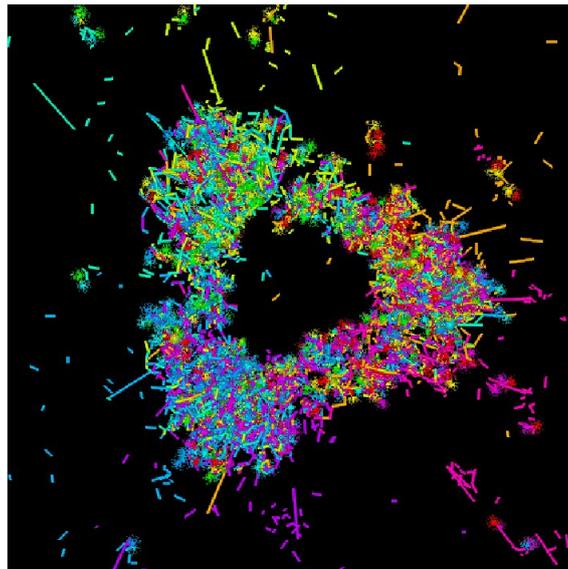


Figure 2. Structure de boucle au sein du nucléon suggérée par cette image créée par Jean-François Colonna [13]. Les trois quarks échangent en permanence des gluons de l’interaction de couleur et l’ensemble constitue une structure topologique stable.

Nous avons depuis 2002 développé l’hypothèse fractaquantique dans diverses directions, avec l’appui de la théorie des graphes qui permet, selon une démarche systématique *in fine* classique, de faire émerger de nouvelles structures [19, 20]. Nous nous sommes intéressé à des structures stables, grâce à l’importance des liens, ou bosons d’interaction. La permanence des “liens de bavardage” est suggérée par exemple par l’image de Jean-François Colonna (Figure 2) pour illustrer la co-présence permanente des quarks et des gluons pour constituer un nucléon. Toutefois, l’analyse de structures plus complexes avec la théorie des graphes, si elle permet de comprendre un premier niveau d’échelle avec des éléments simples de topologie, pose aussi la question des structures plus élaborées. Peut-on imaginer [21] par exemple que s’étant donné un premier niveau d’échelle avec un graphe liant divers éléments d’une structure, un Atome à l’échelle directement supérieure puisse être constitué à partir des boucles du premier graphe ? Ce type d’approche demande la maîtrise de graphes “multi-échelles”... qui ne nous sont pas familiers !

Bien entendu, cette idée de l’utilisation des concepts fondamentaux de la mécanique quantique hors du cadre microscopique traditionnel n’est en aucune façon une idée originale. Nous avons, par un parcours au départ solitaire, suivi les traces de d’Erwin Schrödinger [63], Sylvie Joubert [36], Laurent Nottale [52], Henry Stapp [66], Stuart Hameroff et Roger Penrose [32], Marcel Locquin [44], Johnjoe McFadden [47], Giuseppe Vitiello [70], Evelyne Andreewsky [1], Keith van Rijsbergen [60], Mioara Mugur-Schächter [49]... Nous participons au groupe de recherche “Quantum Interaction”, animé par Peter Bruza [12]. Son programme en quelques mots : “la mécanique quantique qui a émergé avec la physique, diffuse vers des domaines comme le langage humain, la cognition, la recherche d’information documentaire, la biologie, les sciences politiques, l’étude des organisations et l’intelligence artificielle”. Citons également la contribution de Michel Bitbol qui propose [9] “d’appliquer la théorie quantique aux sciences humaines sans réduire l’homme à la physique”. L’approche quantique bouleverse notre façon de penser le monde. Nous abordons cette problématique dans le paragraphe suivant.

5) Du sujet-objet à l’observateur-observé

La dualité sujet-objet est un thème classique en épistémologie. Nous voulons ici nous appuyer sur ce que nous apprend la mécanique quantique. Rappelons d’abord que le *subjectum* en philosophie classique est un “être individuel et réel, supposé à base de toute pensée, face auquel le contenu de sa pensée, le monde extérieur constituent un objet” [38]. Par ailleurs, l’*objectum* est la chose placée devant. Ces définitions de sujet et d’objet furent valables pour les scientifiques durant plusieurs siècles. Galileo Galilei au XVII^{ème} siècle fait rouler des billes sur un plan incliné. Il mesure le temps nécessaire pour qu’elles parcourent une certaine distance dans ce plan. Et il découvre que le mouvement d’une bille idéale non perturbée est le mouvement rectiligne et uniforme. Les billes sont effectivement l’objet de son expérimentation. La science, par ses expériences sur des objets, permet de proposer des lois qui structurent notre compréhension du monde.

La dualité sujet-objet semble incompatible avec une approche quantique. Pour Werner Heisenberg [34] par exemple, “les atomes ne sont pas des choses” : “la science moderne nous montre que nous ne pouvons plus du tout considérer comme une chose “en soi” les moellons de la matière. La science ne peut plus parler simplement d’une nature en soi”. Donc pour Heisenberg (dans le même ouvrage [34]), “le sujet de la recherche n’est donc plus la nature en soi, mais la nature livrée à l’interrogation humaine. Les sciences de la nature présupposent toujours l’homme et, comme l’a dit Bohr, nous devons nous rendre compte que nous ne sommes pas spectateurs mais acteurs dans le théâtre de la vie”.

Nous renvoyons aussi à l’émotion d’Isabelle Stengers [67] quand elle “voit” un atome isolé : “l’atome transforme le laboratoire en un morceau de monde où il existe comme une fleur”. Un Atome, un “objet quantique”, un “atome” dans le vocabulaire de nos contributions antérieures, n’est pas une *causa*, un être inanimé. Et nous avons vu que les relations d’incertitude de Werner Heisenberg nous garantissent que l’immobilité complète ne peut être observée dans la nature... On peut aussi, avec Martin Heidegger [33], parler d’“être au monde”, d’“étant”, de “Dasein”. Si nous ne refusons pas cette notion, nous remarquons qu’elle ne met pas en exergue le point fondamental de l’approche fractaquantique, à savoir la possibilité d’observer, l’opération de mesure.

Dans une observation, il y a un sujet qui observe, un “observeur”. Nous proposons ici de définir l’“observeur” comme l’observateur d’un système qui échappe à sa perception. L’observeur a un accès limité à la réalité du système observé, *via* des mesures dont il ne maîtrise pas l’effet sur le système étudié. Par ailleurs existe un Atome observé, plus simplement un “observé”. Le mot “observé” n’est plus à considérer comme un participe mais comme un substantif. La dualité classique sujet-objet laisse la place à une approche quantique délicate, à savoir la relation observeur-observé. Nous insistons sur le fait qu’observeur et observé sont tous deux sujets du monde, acteurs dans le monde, “étants” dans l’appellation de Heidegger, “êtres au monde”, Atomes.

6) Mesure multi-échelle

La règle de Born a été introduite pour décrire la mesure entre des observeurs humains et des atomes microscopiques. Nous tentons dans ce paragraphe de la généraliser à des mesures quantiques entre Atomes d’échelles fondamentalement différentes. Pour cela, nous considérons un “petit” (little) Atome ℓ qui est l’observé dans le processus de mesure et un “grand” (Big) Atome B qui est l’observeur de la mesure, qui conçoit et effectue la mesure. Nous pensons bien entendu au cas classique de la physique, où ℓ est microscopique et B est à l’échelle humaine, mais aussi au cas de la sociologie où ℓ est à l’échelle humaine et B à l’échelle d’un corps social. Le “gap” entre les deux échelles, entre le petit Atome ℓ et le grand Atome B est tel que, selon l’expression initiée par Mioara Mugur-Schächter [50], l’Atome ℓ n’est pas directement perceptible pour l’Atome B. Notons que l’Atome

observé ℓ subit le processus de mesure imposé par l'Atome observateur d'échelle supérieure B qui ne le distingue pas de ses semblables.

Rappelons la formulation mathématique de la règle de Max Born. Le “grand” Atome B fixe ce qui va être mesuré. Dans l'approche quantique, toute mesure, toute observable peut s'interpréter comme un opérateur linéaire A sur un espace de Hilbert H . Cet espace est décomposé en sous-espaces orthogonaux :

$$(2) \quad H = \bigoplus_{\lambda} E_{\lambda}.$$

De plus, la décomposition (2) s'écrit pour l'état $|\ell\rangle \in H$:

$$(3) \quad |\ell\rangle = \sum_{\lambda} \langle \varphi_{\lambda} | \ell \rangle |\varphi_{\lambda}\rangle, \quad |\varphi_{\lambda}\rangle \in E_{\lambda}, \quad \forall \lambda, \mu, \langle \varphi_{\lambda} | \varphi_{\mu} \rangle = \delta_{\lambda\mu},$$

avec $\delta_{\lambda\mu} = 0$ sauf si $\lambda = \mu$ et alors $\delta_{\mu\mu} = 1$. Les sous-espaces E_{λ} sont des sous espaces “propres” de l'opérateur A :

$$(4) \quad A \cdot |\xi\rangle = \lambda |\xi\rangle, \quad |\xi\rangle \in E_{\lambda}, \quad |\xi\rangle \neq 0.$$

Le résultat de la mesure est nécessairement l'une des valeurs propres λ de la relation (4). Enfin, si le vecteur unitaire $|\ell\rangle$ dans l'espace H modélise l'Atome ℓ , le résultat de la mesure vaut λ avec une probabilité égale au carré de la norme de la composante de $|\ell\rangle$ sur l'espace propre E_{λ} , soit $|\langle \varphi_{\lambda} | \ell \rangle|^2$. Dans le paragraphe suivant, nous développons un exemple emprunté aux sciences sociales.

7) Un modèle fractaquantique du vote

Nous avons lors du congrès de l'Union Européenne de Systémique à Lisbonne en décembre 2008 proposé un modèle quantique pour le vote [22]. Dans ce cas, l'Atome macroscopique B est une structure sociale cohérente, c'est à dire la société de référence toute entière. Les acteurs sociaux de cette structure B sont les Atomes ℓ du modèle B et on peut écrire $\ell \in B$. Le nombre de ces individus non distinguables est important, du million au milliard typiquement. La vie démocratique au sein de la société B suppose que les responsabilités sociales sont prises par des représentants élus et cette position sociale est supposé être attractive ! Un processus de vote a pour objectif de déterminer un acteur particulier parmi ceux susceptibles d'accepter ces responsabilités.

Nous introduisons l'ensemble Γ des candidats γ parmi les Atomes $\ell \in B$. Une question familière est de déterminer un seul candidat “élu” γ^* au sein de la famille Γ grâce à une synthèse des opinions des différents électeurs ℓ . En d'autres termes, l'objectif social pour la société B est de déterminer un candidat γ^* *via* un processus piloté par l'ensemble de la société. Ce problème est (hélas !) mathématiquement essentiellement mal posé ! Les travaux pionniers fin XVIII ième siècle de Jean-Charles de Borda [10] et Nicolas de Condorcet [14] ont montré que selon le processus choisi, le même vote d'un ensemble témoin d'électeurs peut donner lieu à l'élection finale de deux candidats différents selon le

mode de décompte choisi. De plus, ces contradictions ont été renforcées par le théorème d'impossibilité de Kenneth Arrow [4] en 1951. Si on se donne toute une série de contraintes raisonnables pour exprimer qu'une élection est démocratique, le théorème de Kenneth Arrow établit que la seule possibilité qui satisfait ces hypothèses est la dictature ! La notion de démocratie a bien du mal à être formalisée du point de vue mathématique...

On étudie ici le premier tour “classique” d'un processus électoral. Chaque électeur ℓ transmet le nom d'au plus un candidat γ . Une liste ordonnée des candidats s'obtient par comptage des votes exprimés pour chaque candidat. L'espace de Hilbert H_Γ est généré formellement par la famille finie Γ de tous les candidats : $H_\Gamma = \bigoplus_{\gamma \in \Gamma} \mathbb{C} |\gamma\rangle$. Cette décomposition est supposée orthogonale : $\langle \gamma | \gamma' \rangle = \delta_{\gamma, \gamma'}$ pour γ et γ' dans Γ . L'état politique associé à un électeur ℓ est représenté par un vecteur noté $|\ell\rangle$ dans cet espace H_Γ et la relation (3) prend la forme

$$(5) \quad |\ell\rangle = \sum_{\gamma \in \Gamma} \langle \gamma | \ell \rangle |\gamma\rangle .$$

L'espace H_Γ peut s'interpréter comme le continuum des choix politiques possibles. Le produit scalaire $\langle \gamma | \ell \rangle$ de la relation (5) est la “composante” de l'électeur ℓ relativement à chaque candidat γ . Plus précisément la composante de l'opinion politique $|\ell\rangle \in H_\Gamma$ de l'électeur $\ell \in B$. Elle quantifie la “sympathie politique” de l'électeur ℓ relativement au candidat γ . La norme $\|\ell\| \equiv \sqrt{\sum_{\gamma \in \Gamma} |\langle \gamma | \ell \rangle|^2}$ de l'état $|\ell\rangle$ est supposée inférieure ou égale à l'unité. La règle de Born peut dans ce cas s'énoncer ainsi : la probabilité pour un électeur ℓ de donner son vote au candidat γ est égale à $|\langle \gamma | \ell \rangle|^2$. Notons qu'avec cette approche, la probabilité de donner un vote “blanc ou nul” vaut $1 - \|\ell\|^2$.

Nous remarquons pour terminer cette partie la *violence* du processus de projection pour effectuer une mesure quantique. Dans le cas présent du “premier tour” d'un processus électoral, le jour de l'élection où ce processus se déroule, l'électeur ℓ doit choisir au plus un candidat γ_0 . D'un point de vue social, sa sensibilité politique est ensuite réduite à ce candidat particulier : $|\ell\rangle = |\gamma_0\rangle$. Et le mot “réduite” doit être entendu au sens de la “réduction du paquet d'ondes”. En effet, dans la “vraie vie”, aucun électeur n'a une opinion politique parfaitement identique à celle d'un candidat précis. Ce processus de mesure est une véritable projection mathématique et les règles du vote imposent ce choix social. L'interprétation quantique du vote par désignation d'un unique candidat montre donc une forme de violence propre à ce mode de décision sociale. Les inconvénients et les dangers de ce système de vote ont été démontrés en France lors de l'élection de 2002... Nous avons ensuite étendu ce modèle de vote quantique [23] afin de prendre en compte les travaux récents de Michel Balinski et Rida Laraki [6], qui déploient un paradigme qui permet d'aller au-delà du théorème d'impossibilité de Arrow.

8) Ecriture....

Nous voulons enfin illustrer le processus de mesure multi-échelles en essayant d'interpréter le jaillissement créateur de la parole ou de l'écriture comme une mesure fractaquantique, véritable réduction du paquet d'ondes. Avant l'écriture, il y a la rêverie, la mélancolie, la folie de la pensée libre, le délire, le possible, le potentiel. En tout cas quelque chose de l'ordre de l'intime qui emplit l'univers de l'auteur. Une évolution libre, sans aucune contrainte de nature sociale, avec un possible "continu" qui a, disons, la taille de l'imaginaire. La question est de savoir s'il est possible de décrire ce qui se passe au fond de l'être de l'écrivain au cours de l'acte d'écrire. Laissons leur la parole.

Le résultat de l'écriture ne semble pas connu avant le fait d'écrire. Ainsi en témoigne Marguerite Duras par exemple. Dans *Ecrire* [24], elle nous livre son expérience : "L'écriture c'est l'inconnu. Avant d'écrire, on ne sait rien de ce qu'on va écrire. Et en toute lucidité. C'est l'inconnu de soi, de sa tête, de son corps. Ce n'est même pas une réflexion, écrire, c'est une sorte de faculté qu'on a à côté de sa personne, parallèlement à elle-même, d'une autre personne qui apparaît et qui avance, invisible, douée de pensée, de colère, et qui quelquefois, de son propre fait, est en danger d'en perdre la vie". Ou dans le même ouvrage, "Si on savait quelque chose de ce qu'on va écrire, avant de le faire, avant d'écrire, on n'écrirait jamais. Ce ne serait pas la peine". Nous pouvons aussi citer Louis Aragon [2] : "Je crois qu'on pense à partir de ce qu'on écrit et pas le contraire". Ou bien Julien Gracq [31] : "Pour moi, être écrivain, c'est découvrir patiemment, au fil des années, la seconde personne qui vit en nous, et un monde qui secrète notre seconde vie". Pierre Bourdieu, cité par Sylvie Müller et Thierry Opillard [51] : "Quand je ne sais pas ce que je pense, j'écris". Nous retiendrons aussi l'optimisme de Roland Barthes [7] : "L'enjeu du travail littéraire (de la littérature comme travail), c'est de faire du lecteur, non plus un consommateur, mais un producteur de textes".

L'observateur d'un écrit est simplement le lecteur, l'observateur d'un morceau de musique l'auditeur, *etc.* Dans d'autres contextes, comme "lecteur-auteur", "auditeur- musicien", "musicien-compositeur", "voyant - vu", "analyste-analysant", "récepteur-émetteur", *etc.* la relation observateur-observé s'explique sans difficulté. L'important ici, dans l'approche multi-échelle, est que l'observateur peut être un individu tout à fait arbitraire (interchangeable !) au sein de la société de référence prise dans son ensemble. L'acte d'écrire suppose l'acceptation des règles de la lecture, ou l'interprétation musicale pour rester dans un champ ouvert. Un texte recevable d'un point de vue social est un ensemble discret de signes et de symboles soumis à des contraintes précises. Nous pensons ici typiquement aux règles de grammaire et d'orthographe pour un texte littéraire, aux règles et conventions de l'écriture musicale pour un morceau de musique, à une phrase audible et compréhensible par le psychanalyste pour une parole exprimée sur le divan du thérapeute, *etc.*

Nous proposons ici de considérer un texte lisible par tous comme une "valeur propre" d'un opérateur de projection. L'opérateur de projection est une caractéristique de

l’observeur. Dans le cas présent l’observeur est l’ensemble de la société de référence, caractérisée par c’est à dire un *corpus* de connaissances partagé par les acteurs sociaux, à savoir les règles de l’orthographe, la grammaire, la versification, *etc.*

Signalons ici une exception fort intéressante, limite extrême constituée par le *Codex Seraphinianus* de Luigi Serafini [64]. Il s’agit d’une véritable encyclopédie de plus de quatre cents pages écrite avec un alphabet inconnu qui n’a pas pu être déchiffré. La structure est telle qu’il ne reste que l’énigme de la langue inconnue, le vide social devant un texte incompréhensible pour quelqu’un qui dispose d’une bonne culture générale. A cet exemple extrême d’un texte sans référent social, nous pouvons opposer l’idée de renforcer les règles de la langue existante. Grâce à la versification ou même de nouvelles contraintes formelles. On peut citer l’OUvroid de Littérature POtentielle, plus connu sous le nom de “Oulipo”. Groupe de travail fondé par François Le Lionnais et Raymond Queneau en 1960, son but est d’inventer de nouvelles contraintes pour l’écriture, ainsi que Raymond Queneau le définit dans l’ouvrage [42] : “Nous appelons littérature potentielle la recherche de formes et de structures nouvelles qui pourront être utilisées par les écrivains de la façon qui leur plaira”. En un sens, les règles supplémentaires oulipiennes, comme par exemple le non emploi par Georges Perec de la lettre “e” dans *La disparition* [55], renforcent les contraintes et imposent plus de créativité. Avec une écriture oulipienne, les règles sociales de la grammaire, l’orthographe ou la versification sont mises en exergue.

Le cas de la confrontation observeur - observé est particulièrement subtile pour l’émergence de la parole, de l’écriture ou de la musique. En effet, l’observé est l’auteur disons juste avant l’acte de dire, d’écrire ou de composer, alors que le premier observeur est ce même auteur en train de s’écouter, de se lire ou d’interpréter ce qui vient d’être mis en mémoire. La réduction du paquet d’ondes, la mesure quantique, fige la parole dans l’oreille du psychanalyste, le texte sur la feuille de papier, la musique dans la mémoire humaine dans le cas des musiques traditionnelles, *etc.* On peut maintenant tenter de définir le “projecteur quantique” associé à la règle de Born. Dans ce cas, l’Atome “macroscopique”, l’observeur B , la société définit l’opérateur de mesure A , la langue pour notre exemple. Le résultat de la mesure est un élément du spectre de A , en général discret. L’Atome microscopique observé ℓ est modélisé par un vecteur $|\ell\rangle$ qui se décompose sur les vecteurs propres de A selon la relation (3). Le résultat de l’écriture est un vecteur propre φ_λ de A , une phrase cohérente de la langue. La pensée $|\ell\rangle$ de l’auteur ℓ se projette sur le langage au moment de l’écriture. Notons au passage que nous en tirons une interprétation “concrète” de l’espace de Hilbert H où a lieu la décomposition (3), comme le “continuum des pensées”. La règle de Born exprime que la probabilité d’écrire la phrase φ_λ pour une pensée $|\ell\rangle$ est égale au carré du produit scalaire $|\langle \varphi_\lambda | \ell \rangle|^2$. Grâce à la règle de Born, l’approche quantique permet de relier la pensée continue et le langage discret. Bien entendu, ce travail reste tout à fait préliminaire et le modèle mathématique est ouvert !

Conclusion

Dans cette contribution, nous avons d’abord rappelé les éléments qui sous-tendent notre démarche. Nous nous sommes intéressé aux équations différentielles dans le cadre d’un paradigme du continu. Il peut conduire à ce que les physiciens et les mathématiciens appellent le “chaos déterministe”, qui engendre des structures fractales, analogues à elles-mêmes sur toute une famille d’échelles. Par ailleurs, la physique quantique est une théorie opérationnelle pour prédire les caractéristiques du monde microscopique tout en respectant le fait fondamental de l’ignorance de l’observateur entre deux mesures et la contrainte forte imposée au système lors d’une mesure. Dans le premier cas, on a une évolution libre continue et le système se comporte comme une onde. Dans le second, on a localisation d’une particule et discontinuité de l’évolution lors de la mesure. Notre contribution concerne l’hypothèse fractaquantique, qui suppose que la nature est à la fois fractale et quantique. Notre hypothèse propose que l’approche quantique reste valable pour tous les Atomes, tous les éléments “insécables” de la nature, quelle que soit leur taille. L’hypothèse fractaquantique donne un cadre très général, avec un fort potentiel de conception de modèles.

Ensuite nous avons exploré comment le formalisme quantique du processus de mesure *via* la règle de Born se généralisé à des interactions entre échelles différentes. Ce travail demande de développer un paradigme quantique d’“observateur-observé” pour dépasser la dialectique classique “sujet-objet” qui devient illusoire dans le cadre quantique. Il est alors possible de décrire un processus de vote dans l’approche fractaquantique et nous avons constaté qu’une mesure est acte de violence pour l’Atome observé. Nous avons enfin proposé d’utiliser l’approche fractaquantique pour décrire le jaillissement de la parole ou de l’écriture, en nous appuyant sur quelques phrases d’écrivains de renom. La règle de Born propose dans ce cas un cadre mathématique pour relier pensée continue et langage discret. Il s’agit bien entendu d’une première approche car l’émergence de la pensée et de la conscience reste un thème très vaste de recherche, abordé entre autres par Roger Penrose [54], Francesco Varela [68] et Claire Petitmengin [56, 57]. Il importe de confronter et d’étendre ce travail sur ce lien entre écriture et mesure quantique, magnifiquement illustré par Marguerite Duras : “Avant d’écrire, on ne sait rien de ce qu’on va écrire”.

Remerciements

Merci à Pierre Berloquin pour nous avoir fait découvrir le *Codex Seraphinianus* [64] et à Jean-François Colonna de nous avoir d’une part transmis la figure 2 également utilisée dans [21] et d’autre part proposé une lecture approfondie de cette contribution.

Références

- [1] E. Andreewsky. “Complexity of the "basic unit" of language: some parallels in physics and biology”, in *Quantum Mechanics, Mathematics, Cognition and Action: Proposals for a Formalized Epistemology*, Mioara Mugur-Schächter and Alwyn van der Merwe Editors, p 474-480, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [2] L. Aragon. *Je n'ai jamais appris à écrire ou Les incipit*, Champs, Flammarion, 1969.
- [3] V. Arnold. *Equations différentielles ordinaires*, traduit du Russe par Vladimir Kotliar, Editions Mir, Moscou, 1974.
- [4] K.J. Arrow. *Social Choice and Individual Values*, J. Wiley and Sons, New York, 1951.
- [5] A. Aspect, P. Grangier, G. Roger. “Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities”, *Physical Review Letters*, Vol. 49, n°2, p. 91-94, 1982.
- [6] M. Balinski, R. Laraki. “A theory of measuring, electing and ranking”, Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA, 22 May 2007, volume 104, number 21, p. 8720-8725, doi:10.1073/pnas.0702634104, 2007.
- [7] R. Barthes. *Le plaisir du texte*, Editions du Seuil, Paris, 1973.
- [8] B. de Beauvoir, C. Schwob, O. Acef, L. Jozefowski, L. Hilico, F. Nez, L. Julien, A. Clairon, F. Biraben. “Metrology of the hydrogen and deuterium atoms: determination of the Rydberg constant and Lamb shifts”, *European Physical Journal D*, vol. 12, p. 61-93, 2000.
- [9] M. Bitbol (Ed). *Théorie quantique et sciences humaines*, CNRS Editions, Paris, 2009.
- [10] J.C. de Borda. “Mémoire sur les lections au scrutin”, *Histoire de l’Académie Royale des Sciences*, Paris, 1781.
- [11] M. Born. “Über Quantenmechanik”, *Z. Phys.*, vol. 26, p. 379-395, 1924. Voir aussi M. Born. *The Mechanics of the Atom*, G. Bell and Sons Limited, London, 1927.
- [12] P. Bruza, D. Sofge, W. Lawless, K. van Rijbergen, M. Klusch (Eds). *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5494, Springer, 2009.
- [13] J.F. Colonna. “Gallery : Quantum Mechanics”, images illustrant la mécanique quantique, <http://www.lactamme.polytechnique.fr>, 1992.
- [14] N. de Condorcet. *Essai sur l’application de l’analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*, Imprimerie Royale, Paris, 1785.

- [15] J. Crank, P. Nicolson. “A Practical Method for Numerical Evaluation of Solutions of Partial Differential Equations of Heat Conduction Type”, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, vol. 43, p. 50-67, 1947.
- [16] R. Descartes. *Méditations métaphysiques*, 1641, Garnier-Flammarion, Paris, 1979.
- [17] F. Dubois. “Modélisation mathématique de l’évolution : du continu classique au discret quantique”, *Communication Afscet*, Moulin d’Andé, 8-9 juin 2002, voir le site internet <http://www.afscet.asso.fr>.
- [18] F. Dubois. “Hypothèse fractaquantique”, *Res-Systemica*, vol. 2, 5th European Congress of System Science, Heraklion, october 2002.
- [19] F. Dubois. “Pistes fractaquantiques”, *Res-Systemica*, vol. 4, numéro 2, décembre 2004.
- [20] F. Dubois. “On fractaquantum hypothesis”, *Res-Systemica*, vol. 5, 6th European Congress of System Science, Paris, september 2005.
- [21] F. Dubois. “L’intelligence est dans les boucles !”, communication Afscet aux journées annuelles au Moulin d’Andé, disponible sur le site [//www.afscet.asso.fr](http://www.afscet.asso.fr), juin 2007.
- [22] F. Dubois. “On the measure process between different scales”, *Res-Systemica*, vol. 7, 7th European Congress of System Science, Lisboa, december 2008.
- [23] F. Dubois. “On Voting process and Quantum Mechanics”, *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5494 (P. Bruza *et al* Editors), p. 200-210, Springer, 2009.
- [24] M. Duras. *Ecrire*, Gallimard, Paris, 1993.
- [25] A. Einstein. “Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”, *Annalen der Physik*, vol. 17, p. 132-148, 1905.
- [26] B. d’Espagnat. *Le réel voilé - Analyse des concepts quantiques*, Fayard, Paris, 1994.
- [27] M. Evans, M. Kaufman. “Establishment in culture of pluripotential cells from mouse embryos”, *nature*, vol. 292, p. 154-156, 1981.
- [28] T. Filk, A. von Müller. “Quantum physics and consciousness: The quest for a common conceptual foundation”, *Mind and Matter*, vol. 7, p. 59-79, 2009.
- [29] J. Forrester. *Industrial Dynamics*, Waltham, Pegasus Communications, 1961.
- [30] S. Freud. “Psychologie des foules et analyse du moi”, 1921, in *Essais de psychanalyse*, Payot, Paris, p. 83-176, 1963.
- [31] J. Gracq. *En lisant en écrivant*, José Corti, Paris, 1980.

- [32] S. Hameroff, R. Penrose. “Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules: A model for consciousness”, in: *Toward a Science of Consciousness ; The First Tucson Discussions and Debates*, (S.R. Hameroff, A.W. Kaszniak and A.C. Scott Editors), MIT Press, Cambridge MA, p. 507-540, 1996.
- [33] M. Heidegger. *Sein und Zeit*, Max Niemeyer, Tübingen, 1927. *Etre et temps*, traduction Rudolf Boehm et Alphonse de Waelhens, Gallimard, Paris, 1964.
- [34] W. Heisenberg. *La nature dans la physique contemporaine*, traduction Gallimard, Paris, 1962.
- [35] M. Hénon. “A Two-Dimensional Mapping with a Strange Attractor”, *Communications in Mathematical Physics*, vol. 50, p. 69-77, 1976.
- [36] S. Joubert. *La raison polythéiste ; essai de sociologie quantique*, l’Harmattan, Paris, 1991.
- [37] A.N. Kolmogorov. *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*, Springer, Berlin, 1933.
- [38] *Le petit Larousse illustré*, Larousse, Paris, 2006.
- [39] M. La Porte, J. Vignes. “Etude statistique des erreurs dans l’arithmétique des ordinateurs ; application au contrôle des résultats d’algorithmes. *Numerische Mathematik*, vol. 23, p. 63-72, 1974.
- [40] J. Laskar. “Large Scale Chaos and Marginal Stability in the Solar System”, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, vol. 64, p. 115-162, 1996.
- [41] P.D. Lax, R.D. Richtmyer. “Survey of the stability of linear finite difference equations”, *Comm. Pure Appl. Math.*, vol. 9, p. 267-293, 1956.
- [42] F. Le Lionnais, R. Queneau, I. Calvino, G. Perec, J. Roubaud, J. Bens. *La littérature potentielle*, Idées Gallimard, 1973.
- [43] J.M. Lévy-Leblond, F. Balibar. *Quantique : rudiments*, InterEditions-Editions du CNRS, 1984.
- [44] M. Locquin. *Langage archétypal*, Arppam- Edition Muséum de Lyon, 2000.
- [45] E. Lorenz. “Deterministic Nonperiodic Flow”, *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 20, p. 130-141, 1963.
- [46] B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Co., New York, 1982.
- [47] J. McFadden. *Quantum Evolution: the new science of Life*, HarperCollins, 2001.

- [48] G.R. Martin, “Isolation of a pluripotent cell line from early mouse embryos cultured in medium conditioned by teratocarcinoma stem cells”, *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, vol. 78, p. 7634-7638, 1981.
- [49] M. Mugur-Schächter. *Sur le tissage des connaissances*, Hermes Lavoisier, 2006.
- [50] M. Mugur-Schächter. *Infra-mécanique quantique*, Dianioia-Puf, Paris, 2009. Voir aussi arXiv:0801.1893, Quantum Physics, January 2008.
- [51] S. Müller, T. Opillard. “Genèse du journal”, *les Actes de Lecture*, vol. 101, p. 23-27, 2008.
- [52] L. Nottale. *Fractal Space-Time and Microphysics : Towards a Theory of Scale Relativity*, World Scientific, 1993.
- [53] E. Nunez. Remarque faite suite à un exposé de l’auteur, journée “Afsctet” au Moulin d’Andé, mai 2003.
- [54] R. Penrose. *The Emperor’s New Mind: Concerning Computers, Minds and The Laws of Physics*, Oxford University Press, 1989. Traduction française *L’Esprit l’ordinateur et les lois de la physique*, avec une préface de Martin Gardner, traduit par Françoise Balibar et Claudine Tiercelin, InterEditions, Paris, 1992.
- [55] G. Perec. *La disparition*, L’Imaginaire, Gallimard, 1969.
- [56] C. Petitmengin. “L’énaction comme expérience vécue”, *Intellectica*, vol. 43, p. 85-92, 2006.
- [57] C. Petitmengin. “Describing the experience of describing? The blind spot of introspection”, *Journal of Consciousness Studies*, vol. 18, p. 44-62, 2011.
- [58] H. Poincaré. *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*, Editions Gauthiers-Villars, Paris, 1892.
- [59] N. Revol. “Interval Newton iteration in multiple precision for the univariate case”, *Numerical Algorithms*, vol. 34, p. 417-426, 2003.
- [60] K. van Rijsbergen. *The Geometry of Information Retrieval*, Cambridge University Press, 2004.
- [61] D. Ruelle, F. Takens. “On the nature of turbulence”, *Communication in Mathematical Physics*, vol. 20, p. 167-192, 1971.
- [62] J. Salem. *L’Atomisme antique ; Démocrite, Epicure, Lucrèce*, Librairie générale française, Paris, 1997.

- [63] E. Schrödinger. *What is Life?*, McMillan 1944. Edition Française Collection Points-Sciences, Le Seuil, 1993.
- [64] L. Serafini. *Codex Seraphinianus*, Les Signes de l’homme, Franco Maria Ricci, Milan, 1981.
- [65] G. Simondon. *L’Individu et sa genèse physico-biologique*, Presses Universitaires de France, Paris, 1964.
- [66] H. Stapp. *Mind, matter and quantum mechanics*, The Frontiers Collection, Springer Verlag, 1993.
- [67] I. Stengers. *Cosmopolitiques*, tome 4, *Mécanique quantique : la fin du rêve*, Editions La Découverte, Paris, 1997.
- [68] F. Varela. *Invitation aux sciences cognitives*, Point sciences, Seuil, Paris, 1988.
- [69] J.C. Venter *et al.* “The Sequence of the Human Genome”, *Science*, vol. 291, number 5507, p. 1304-1351, 16 February 2001.
- [70] G. Vitiello. *My Double Unveiled: the dissipative quantum model of brain*, Advances in Consciousness Research, vol. 32, John Benjamins Publishing Company, 2001.

François Dubois est titulaire d’un diplôme d’études approfondies (master) en physique atomique et moléculaire (1980) et d’un doctorat en mathématiques appliquées (1988) obtenus à l’université Paris 6. Il a passé plusieurs années dans l’industrie aérospatiale comme expert en mécanique des fluides numérique. Il est titulaire de l’habilitation à diriger des recherches (1992) et est depuis 1994 professeur de mathématiques appliquées au Conservatoire National des Arts et Métiers à Paris. Il est membre de l’Association Française de Science des systèmes cybernétiques, Cognitifs Et Techniques depuis 2001 et co-pilote l’organisation du colloque “Quantum Interaction” à Paris en juin 2012.