



Le quantique et le vivant

Ce que la physique établit et où commence l'extrapolation

En 1944, Erwin Schrödinger, qui venait de passer deux décennies à reconstruire la physique avec l'équation qui porte son nom, publia un petit livre dont le titre tenait en trois mots : *What is Life?* (Schrödinger, 1944). La question n'était pas rhétorique. La théorie quantique avait redéfini ce qu'était un atome, une mesure, une particule. Schrödinger se demandait si ces lois nouvelles disaient quelque chose des lois du vivant, ou si la cellule restait un objet classique indifférent à la révolution qui venait de bouleverser la matière inerte. Quatre-vingts ans plus tard, la question n'est pas close. Elle s'est précisée, elle a reçu des réponses partielles et solides, et elle a aussi engendré une zone grise où l'enthousiasme dépasse régulièrement ce que les données autorisent. Cette série prend cette question au sérieux, ce qui suppose d'en tenir simultanément les trois faces.

La première face est ce que la physique a effectivement établi sur la structure du réel. La deuxième est ce que la biologie parvient aujourd'hui à montrer d'un usage fonctionnel des effets quantiques dans les organismes vivants. La troisième est la frontière, mouvante et délicate, au-delà de laquelle l'extrapolation cesse d'être une hypothèse de travail pour devenir une projection conceptuelle. Ces trois faces ne se résolvent pas l'une dans l'autre. Aucune ne tranche les deux autres. C'est précisément en les

The Quantum and the Living

What physics establishes, and where extrapolation begins

In 1944, Erwin Schrödinger, having spent two decades rebuilding physics around the equation that bears his name, published a slim book whose title fitted into three words: *What is Life?* (Schrödinger, 1944). The question was not rhetorical. Quantum theory had redefined what an atom, a measurement, a particle were. Schrödinger asked whether these new laws had anything to say about the laws of the living, or whether the cell remained a classical object indifferent to the revolution that had just overturned inert matter. Eighty years on, the question is not settled. It has grown sharper, it has received partial and solid answers, and it has also bred a grey zone where enthusiasm regularly outruns what the data permit. This series takes the question seriously, which means holding its three faces together at once.

The first face is what physics has actually established about the structure of the real. The second is what biology can show today of a functional use of quantum effects within living organisms. The third is the frontier, shifting and delicate, beyond which extrapolation ceases to be a working hypothesis and becomes conceptual projection. These three faces do not resolve into one another. None settles the other two. It is precisely by keeping them distinct that one avoids the confusion lying in wait for any

maintenant distinctes qu'on évite la confusion qui guette tout discours sur le quantique et le vivant : prendre l'inspiration pour la démonstration.

La physique a redéfini le réel

Entre l'introduction du quantum d'action par Planck en 1900 et la formalisation de l'indétermination par Heisenberg en 1927 (Heisenberg, 1927), la physique a cessé de décrire un monde fait de petits objets dotés de propriétés définies que la mesure se contenterait de relever. Bohr a posé que certaines propriétés, position et impulsion par exemple, ne coexistent pas comme attributs simultanément définis mais se manifestent selon le dispositif qui les interroge (Bohr, 1928). Schrödinger a donné à l'état quantique sa forme ondulatoire (Schrödinger, 1926). Cet édifice n'affirme pas les limites provisoires de notre savoir, que de meilleurs instruments lèveraient un jour. Il affirme quelque chose sur la structure même de ce qui est. L'indétermination appartient au réel, elle ne mesure pas notre ignorance de lui.

Le point décisif, parce qu'il distingue une théorie sérieuse d'une métaphore commode, est qu'on a su le tester. Einstein, Podolsky et Rosen avaient voulu montrer en 1935 que la description quantique était incomplète, qu'il devait exister des variables cachées restaurant un réel classique sous-jacent (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935). Bell a transformé ce débat philosophique en inégalité mesurable (Bell, 1964) : si des variables cachées locales gouvernaient le monde, certaines corrélations ne pourraient dépasser un seuil. Aspect, Dalibard et Roger ont mesuré ces corrélations et constaté la violation du seuil (Aspect, Dalibard & Roger, 1982). Les

discourse on the quantum and the living: mistaking inspiration for demonstration.

Physics has redefined the real

Between Planck's introduction of the quantum of action in 1900 and Heisenberg's formalisation of indeterminacy in 1927 (Heisenberg, 1927), physics ceased to describe a world made of small objects endowed with definite properties that measurement would merely read off. Bohr held that certain properties, position and momentum for instance, do not coexist as simultaneously defined attributes but manifest according to the apparatus that interrogates them (Bohr, 1928). Schrödinger gave the quantum state its wave form (Schrödinger, 1926). This framework does not assert the provisional limits of our knowledge, the kind that better instruments might one day lift. It asserts something about the very structure of what is. Indeterminacy belongs to the real; it does not measure our ignorance of it.

The decisive point, the one that separates a serious theory from a convenient metaphor, is that it proved testable. Einstein, Podolsky and Rosen had sought in 1935 to show that the quantum description was incomplete, that there must exist hidden variables restoring an underlying classical reality (Einstein, Podolsky & Rosen, 1935). Bell turned this philosophical debate into a measurable inequality (Bell, 1964): if local hidden variables governed the world, certain correlations could not exceed a given threshold. Aspect, Dalibard and Roger measured those correlations and found the threshold violated (Aspect, Dalibard & Roger, 1982). The

loophole-free experiments of 2015, separating the detectors by more than a kilometre, closed the last escape routes (Hensen et al., 2015). The conclusion is as firmly established as an experimental result can be: the real is not classically determined beneath the surface. Before it is measured, a particle does not already carry within it the value the instrument would simply read; that value is fixed in the act of measurement. This first face is bedrock. Everything that follows rests on it without needing to return to it.

Does life exploit this structure?

A distinction is needed here, often neglected and yet decisive. In a trivial sense everything is quantum, since chemistry, and therefore biochemistry, and therefore life, rests in the last instance on the quantum mechanics of electronic bonds. This truism teaches nothing. The interesting question, the one that quantum biology opened as a field of research, is more demanding: are there biological processes in which specifically quantum properties, coherence, tunnelling, spin entanglement, play a functional, selected role, without which the process would be less efficient or impossible (Lambert et al., 2013)?

To this strict question, at least three answers now rest on solid ground. Photosynthesis first: ultrafast spectroscopy has revealed, in the Fenna-Matthews-Olson complex, signatures of coherence in excitation energy transfer, suggesting that the system explores several paths at once to reach a near-perfect yield (Engel et al., 2007). Magnetoreception next: the orientation of migratory birds is thought to rest on a radical pair mechanism in the cryptochromes, where the spin state of two electrons, sensitive to the geomagnetic field, steers a chemical reaction (Schulten,

expériences sans faille logique de 2015, séparant les détecteurs sur plus d'un kilomètre, ont fermé les dernières échappatoires (Hensen et al., 2015). La conclusion est aussi établie qu'un résultat expérimental peut l'être : le réel n'est pas classiquement déterminé sous la surface. Autrement dit, avant d'être mesurée, une particule ne porte pas déjà en elle la valeur que l'instrument se contenterait de lire, cette valeur s'établit dans l'acte de mesure. Cette première face est du roc. Tout ce qui suivra s'y appuie sans avoir à y revenir.

Le vivant exploite-t-il cette structure ?

Il faut ici une distinction que l'on néglige souvent et qui décide pourtant de tout. En un sens trivial, tout est quantique, puisque la chimie, donc la biochimie, donc la vie, repose en dernière instance sur la mécanique quantique des liaisons électroniques. Cette banalité n'apprend rien. La question intéressante, celle qu'a ouverte la biologie quantique comme champ de recherche, est plus exigeante : existe-t-il des processus biologiques où des propriétés spécifiquement quantiques, la cohérence, l'effet tunnel, l'intrication de spins, jouent un rôle fonctionnel, sélectionné, sans lequel le processus serait moins efficace ou impossible (Lambert et al., 2013) ?

À cette question stricte, trois réponses au moins ont aujourd'hui une assise robuste. La photosynthèse d'abord : la spectroscopie ultrarapide a révélé dans le complexe de Fenna-Matthews-Olson des signatures de cohérence dans le transfert d'énergie d'excitation, suggérant que le système explore plusieurs chemins simultanément pour atteindre un rendement quasi parfait (Engel et al., 2007). La magnétoréception ensuite : l'orientation des oiseaux migrateurs s'expliquerait par un mécanisme de paires radicalaires dans les cryptochromes, où l'état de spin de deux électrons, sensible au

champ géomagnétique, oriente une réaction chimique (Schulten, Swenberg & Weller, 1978). La catalyse enzymatique enfin, où l'effet tunnel des protons et des électrons rend compte de vitesses de réaction que la physique classique ne prédit pas.

Il importe de ne pas surinterpréter cette face non plus. Le caractère fonctionnel de la cohérence à température ambiante reste discuté, et la littérature des dernières années oppose des arguments pour et contre selon les systèmes (Marais et al., 2018). Le champ est actif, contesté, fertile, ce qui est la marque d'une science vivante. Cette deuxième face dit donc une chose mesurée : oui, le vivant exploite parfois la structure quantique du réel de manière fonctionnelle, et nous commençons à savoir où et comment, dans un petit nombre de cas bien circonscrits.

Où commence l'extrapolation

Du fait avéré que certains processus biologiques exploitent des effets quantiques, une pente conduit à une conclusion beaucoup plus large. Si le vivant est quantique en ses points névralgiques, alors il le serait de part en part, et la mécanique quantique livrerait la clé de l'ensemble de ses fonctions. C'est l'instant où l'inspiration se déguise en démonstration, et c'est précisément ce que la littérature ne valide pas.

La distinction posée plus haut retrouve ici toute sa portée. Qu'un petit nombre de processus mette en jeu la cohérence, l'effet tunnel ou des spins corrélés de manière fonctionnelle, voilà qui se mesure, se discute, se conteste, bref se travaille selon les règles ordinaires de la preuve. Que la vie dans son entier soit un phénomène quantique appartient à un autre ordre d'affirmation, qui emprunte le prestige des premiers cas sans en acquitter le

Swenberg & Weller, 1978). Enzyme catalysis last, where the tunnelling of protons and electrons accounts for reaction rates that classical physics does not predict.

This face too must not be over-read. The functional character of coherence at ambient temperature remains debated, and the literature of recent years sets arguments for and against one another depending on the system (Marais et al., 2018). The field is active, contested, fertile, the mark of a living science. This second face therefore states something measured: yes, the living sometimes exploits the quantum structure of the real in a functional way, and we are beginning to know where and how, in a small number of well-circumscribed cases.

Where extrapolation begins

From the established fact that certain biological processes exploit quantum effects, a slope leads to a far broader conclusion. If the living is quantum at its critical points, then it would be quantum through and through, and quantum mechanics would supply the key to all its functions. This is the moment where inspiration disguises itself as demonstration, and it is precisely what the literature does not bear out.

The distinction drawn above recovers its full force here. That a small number of processes bring coherence, tunnelling or functionally correlated spins into play is something that can be measured, discussed, contested, in short worked on according to the ordinary rules of evidence. That life in its entirety is a quantum phenomenon belongs to another order of claim, one that borrows the prestige of the first cases without meeting their

coût expérimental. Entre le transfert cohérent d'énergie dans un complexe photosynthétique, mesuré et reproduit, et l'image d'un organisme dont chaque fonction relèverait de la cohérence quantique, aucune continuité n'est établie. Il y a là une frontière, et le travail sérieux consiste précisément à la tenir.

Situer cette frontière ne referme pas la question, cela lui donne son lieu. La série ne cherche pas à décréter jusqu'où le quantique gouverne le vivant, ce qui relèverait de l'expérience et non d'une réflexion conceptuelle. Son objet est de cartographier où s'arrête la physique validée, jusqu'où atteint aujourd'hui la biologie quantique fonctionnelle, et à partir de quel seuil l'extension se change en projection. Ce travail de délimitation est en soi la contribution.

Ce qui se dégage

Lorsque ces trois faces sont tenues ensemble sans qu'on en sacrifie aucune, une question plus fine remonte, que la physique et la biologie ne formulent pas à elles seules. Elle ne porte pas sur le verdict, vrai ou faux, à propos de telle ou telle extension. Elle porte sur les conditions : que faudrait-il, en termes de preuves, pour étendre d'un cran le récit quantique du vivant, et quelle discipline intellectuelle cette extension exige-t-elle de qui la tente ?

Là se tient peut-être ce que la juxtaposition des trois faces laisse affleurer et qu'aucune ne contient seule. La rigueur cesse d'être une simple prudence défensive, une manière de se garder des conclusions hâtives. Elle devient un instrument de connaissance à part entière, la seule discipline qui permette de voir précisément où passe la ligne entre ce qui est su, ce qui est plausible et ce qui est espéré. Tracer cette ligne avec soin en dit souvent davantage sur

experimental cost. Between the coherent energy transfer within a photosynthetic complex, measured and reproduced, and the image of an organism whose every function would fall under quantum coherence, no continuity has been established. There is a frontier here, and serious work consists precisely in holding it.

To locate this frontier does not close the question, it gives it its place. The series does not seek to decree how far the quantum governs the living, which would be a matter for experiment and not for conceptual reflection. Its object is to map where established physics stops, how far functional quantum biology reaches today, and from what threshold extension turns into projection. This work of delimitation is itself the contribution.

What emerges

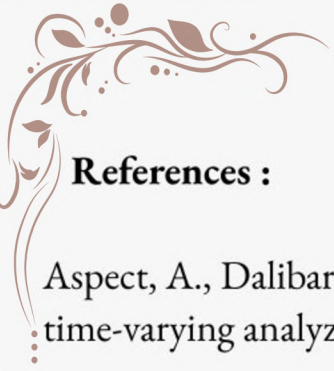
When these three faces are held together without sacrificing any one of them, a finer question rises to the surface, one that physics and biology do not frame on their own. It is not a question of the verdict, true or false, on this or that extension. The question is one of conditions: what would it take, in terms of evidence, to extend the quantum account of the living by a further notch, and what intellectual discipline does such an extension demand of whoever attempts it?

Here perhaps lies what the juxtaposition of the three faces allows to surface, and what none of them holds alone. Rigour ceases to be mere defensive caution, a way of guarding against hasty conclusions. It becomes an instrument of knowledge in its own right, the one discipline that makes it possible to see exactly where the line runs between what is known, what

un objet que de se précipiter à conclure sur sa nature. Le vivant et le quantique se rencontrent réellement, en quelques points désormais bien établis, et cette rencontre reste assez neuve pour que l'essentiel du travail consiste encore à tenir ouvert, sans le refermer trop vite, l'espace entre ce que nous savons et ce que nous voudrions savoir.

is plausible and what is hoped for. To trace that line with care often says more about a subject than any rush to pronounce on its nature. The living and the quantum do meet, at a few now well-established points, and that meeting remains new enough that the essential work still consists in holding open, without closing it too soon, the space between what we know and what we would wish to know.





References :

Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804-1807.

Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics*, 1(3), 195-200.

Bohr, N. (1928). The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, 121, 580-590.

Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47(10), 777-780.

Engel, G. S., Calhoun, T. R., Read, E. L., Ahn, T. K., Mančal, T., Cheng, Y. C., Blankenship, R. E., & Fleming, G. R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446(7137), 782-786.

Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-198.

Hensen, B., et al. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*, 526(7575), 682-686.

Lambert, N., Chen, Y. N., Cheng, Y. C., Li, C. M., Chen, G. Y., & Nori, F. (2013). Quantum biology. *Nature Physics*, 9(1), 10-18.

Marais, A., Adams, B., Ringsmuth, A. K., Ferretti, M., Gruber, J. M., Hendrikx, R., Schuld, M., Smith, S. L., Sinayskiy, I., Krüger, T. P. J., Petruccione, F., & van Grondelle, R. (2018). The future of quantum biology. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(148), 20180640.

Schrödinger, E. (1926). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 28(6), 1049-1070.

Schrödinger, E. (1944). *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press.

References :

Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, 49(25), 1804-1807.

Bell, J. S. (1964). On the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics*, 1(3), 195-200.

Bohr, N. (1928). The quantum postulate and the recent development of atomic theory. *Nature*, 121, 580-590.

Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47(10), 777-780.

Engel, G. S., Calhoun, T. R., Read, E. L., Ahn, T. K., Mančal, T., Cheng, Y. C., Blankenship, R. E., & Fleming, G. R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446(7137), 782-786.

Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172-198.

Hensen, B., et al. (2015). Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometres. *Nature*, 526(7575), 682-686.

Lambert, N., Chen, Y. N., Cheng, Y. C., Li, C. M., Chen, G. Y., & Nori, F. (2013). Quantum biology. *Nature Physics*, 9(1), 10-18.

Marais, A., Adams, B., Ringsmuth, A. K., Ferretti, M., Gruber, J. M., Hendrikx, R., Schuld, M., Smith, S. L., Sinayskiy, I., Krüger, T. P. J., Petruccione, F., & van Grondelle, R. (2018). The future of quantum biology. *Journal of the Royal Society Interface*, 15(148), 20180640.

Schrödinger, E. (1926). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 28(6), 1049-1070.

Schrödinger, E. (1944). *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press.

