

BULLETIN N° 123
ACADÉMIE EUROPEENNE
INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES



Séance du mardi 11 mars 2008 :
Conférence de notre Collègue Alain STAHL
à propos du livre de M. Kirschner et J.Gerhardt :
« The plausibility of life »

Prochaine séance le mardi 8 avril 2008 :
Conférence de notre Collègue Gilbert BELAUBRE :
« Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée »

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

PRESIDENT : Michel GONDRAN

SECRETAIRE GENERAL : Irène HERPE-LITWIN

TRESORIER GENERAL : Bruno BLONDEL

CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :

SCIENCES DE LA MATIERE : Pr. Gilles COHEN-TANNOUJJI.

SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNOLOGIES : Pr. François BEGON

PRESIDENT DE LA SECTION DE NICE : Doyen René DARS

PRESIDENT DE LA SECTION DE NANCY : Pierre NABET

PRESIDENT FONDATEUR

DOCTEUR Lucien LEVY (†).

PRESIDENT D'HONNEUR

Gilbert BELAUBRE

SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR

Pr. P. LIACOPOULOS

mars 2008

N°123

TABLE DES MATIERES

P. 3 Compte-rendu de la séance du mardi 11 mars 2008

P. 6 Annonces

P. 7 Documents

Prochaine séance :

MSH, salle 215-18heures

Mardi 8 avril 2008

Conférence de notre Collège Gilbert BELAUBRE

« Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée »

ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
Maison des Sciences de l'Homme, Paris.

Séance du
Mardi 11 mars 2008

Maison des Sciences de l'Homme, salle 215, à 18 h.

La séance est ouverte à 18 h. 00 sous la Présidence de Michel GONDRAN et en la présence de nos collègues, François BEGON, Gilbert BELAUBRE, Manuel GALAN, Irène HERPE-LITWIN, Jacques LEVY, Alain STAHL

Etaient excusés : Alain CARDON, Françoise DUTHEIL, Jean-Pierre FRANÇOISE, Marie-Louise LABAT, Gérard LEVY, Pierre MARCHAIS, Victor MASTRANGELO, Emmanuel NUNEZ

Conférence de notre Collègue Alain STAHL relative au livre de
M. Kirschner et J. Gerhardt :
« *The Plausibility of Life* »

Notre Collègue Alain STAHL est l'auteur d'un ouvrage d'épistémologie « SCIENCE ET PHILOSOPHIE »¹ qui comporte un important chapitre² dédié à la biologie. Il y interroge notamment les relations entre la biologie et la physico-chimie, l'évolution du concept de gène ce qui est tout à fait en relation avec la problématique de l'émergence de la vie.

Il cherche à caractériser la vie :

« La vie implique la faculté de reproduction ; l'adaptation et l'évolution ; la mort (de l'individu, mais aussi des cellules et des espèces. »

Il met déjà l'accent sur la complexité de la simple cellule et bien sûr celles encore beaucoup plus élevée des organismes multicellulaires. Il insiste également sur l'identité, l'autonomie de l'être vivant qui n'existerait pas dans le monde physico-chimique :

« Les êtres vivants , quoique échangeant en permanence avec le milieu extérieur, ont une autonomie. Ils sont dotés de régulations rigoureuses qui maintiennent la constance de leur métabolisme »

Il y pose les questions clés suivantes :

¹ SCIENCE ET PHILOSOPHIE publié en 2004 dans la collection SCIENCE-HISTOIRE-PHILOSOPHIE/Publication de l'Institut Interdisciplinaire d'Etudes Epistémologiques à la Librairie Jean Vrin 6, place de la Sorbonne 75005 Paris

² Chapitre 9, page 89

« *La biologie est-elle compatible avec la physico-chimie ? Trouve-t-elle des explications dans la chimie moléculaire ? Est-elle **réductible** à la **biochimie** ?* » ...La biochimie étant grandement explicable par la physique, cette dernière attitude serait donc « physicaliste ». Il n'accorde guère de crédit à cette dernière hypothèse. Dans son analyse de l'ontogénèse il insiste sur certaines circularités qui perturberaient le seul déterminisme génétique :

« *Dans toute l'ontogénèse, il y a interaction constante et nécessaire entre le programme génétique et la machinerie cellulaire..* »

Devant la complexité du monde biologique, il remarque que deux attitudes opposées peuvent être retenues :

« *D'un côté, quand voulant dépasser le stade **descriptif** – nous recherchons **des explications** de l'ontogénèse, nous mettons en évidence des cascades de réactions, et nous les relient à l'action de certains gènes, mais dans une complexité toujours croissante qui nous éloigne d'une vraie compréhension.*

*De l'autre côté, nous sommes convaincus qu'il existe à **des niveaux supérieurs** des mécanismes régulateurs de l'ontogénèse, que nous ne connaissons que mal, mais sur lesquels nous devons focaliser nos recherches....Dit différemment, seul un programme génétique « **condensé** » parce que constitué par une **hiérarchie ordonnée**, peut rendre compte de l'extrême complexité du plan de construction de tout être vivant, en face du petit nombre de gènes dont il dispose.* »

C'est dans le contexte de ces interrogations qu'Alain STAHL s'est penché sur le livre de Mark KIRSCHNER du département de biologie des systèmes à la Harvard Medical School et John GERHART biologiste à l'University de Berkeley, « The plausibility of life » paru en octobre 2005, sous l'égide de l'université de Yale. Ce livre vise à réfuter l'idée³ selon laquelle l'apparition de la vie, phénomène éminemment complexe, serait totalement improbable sans un « grand horloger ».

Certes, la théorie darwinienne de l'évolution qui procéderait par de *petits sauts aléatoires* soumis à la sélection naturelle rendrait difficilement compte de la complexité des êtres vivants même si le processus a duré environ 4 milliards d'années. (Selon certains auteurs l'évolution serait caractérisée non par une *amélioration* mais par une *complexification* obéissant au principe anthropique...)

Les petits sauts darwiniens sont remplacés par de nouveaux théoriciens, les « *saltationnistes* », qui réduisent ainsi le nombre d'étapes à franchir et augmentent ainsi la plausibilité de l'apparition du phénomène avec un maintien sur la durée de nombreux points communs.

En effet ils analysent la complexité et les grands changements évolutifs intervenus depuis quatre milliards d'années :

- Êtres unicellulaires
- Êtres pluricellulaires
- Reproduction sexuée
- Développement embryonnaire
- Phyla différents
- Apparition des vertébrés
- Apparition d'organes sensoriels tels que l'œil
- Apparition du cerveau

³ Les tenants du « dessein intelligent » ou « Intelligent Design » pensent en effet qu'il est infiniment peu probable que la vie soit issue du hasard et de la nécessité....

Ils observent en dépit de la distance évolutive , le *maintien de structures complexes communes* qui, une fois sélectionnées par de simples essais permettent d'amplifier la probabilité vers une complexification. Ceci expliquerait la présence *de grands sauts qualitatifs* beaucoup moins improbables qu'avec les simples petits sauts darwiniens. Ces grands sauts seraient des « réducteurs des difficultés ». Ainsi seraient apparus des gènes « homéobox » entraînant un certain déterminisme génétique stable dans toutes les espèces.

Ainsi, malgré un certain rôle joué par le hasard, la variation du phénotype ne serait pas complètement aléatoire. Certaines variations non létales au départ ont été conservées depuis les bactéries jusqu'à la formation du néo cortex humain telles que :

- la séquence ADN→ARN→ protéines dans tous les organismes
- Les fonctions membranaires dans toutes les cellules
- Les cytosquelettes qui confèrent tous une certaine rigidité
- Rôle du gène hox dans le développement de la face et du crâne
- Etc..

L'évolution des protéines s'est faite aux rares moments d'évolution des processus.

Les auteurs penseraient que le développement trouve plutôt sa source dans les processus de base que dans l'environnement, en sorte qu'il existerait chez les êtres vivants une capacité au changement retenue ou non par la sélection naturelle. Cette capacité se manifesterait dans les « exploratory behaviours » propres aux réseaux neuronaux (câblage et destruction des câblages inutiles). Elle se manifesterait également par la « robustesse » de certaines structures qui résisteraient au changement.

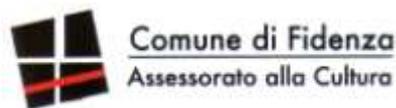
Diverses questions sont posées par nos collègues Jacques LEVY et Gilbert BELAUBRE qui contestent certains aspects.

Après ce riche débat la séance est levée à 20 heures ,

Bien amicalement à vous,

Irène HERPE-LITWIN

Annances



Association Européenne de Psychanalyse

Du 22 au 25 Mai 2008 aura lieu la 4^e édition du Festival de la Psychanalyse de Fidenza (Italie) ayant comme thème le rapport, de nos jours souvent problématique, entre Nature et Culture.

« L'homme, être culturel par excellence, a fait du symbole sa demeure. Les signes des choses se sont progressivement substitués aux choses mêmes. Ainsi, l'homme s'est aliéné tant du monde naturel que de sa propre nature corporelle, pulsionnelle et imaginaire.

Si les formes et les sensations liées à la Nature ont depuis toujours inspiré les poètes, les mystiques, les philosophes et même les scientifiques, si aujourd'hui on recommence à parler des « lieux de l'âme », si les paysages dans les rêves symbolisent souvent les mouvements et les états d'âme du sujet, c'est parce qu'il existe vraisemblablement un lien originaire inconscient entre le monde naturel et la dimension psychique productrice de culture.

Aujourd'hui, ce lieu de rencontre entre Nature et Culture est gravement compromis, écrasé sous le poids de ciment des « plans économiques ». En privilégiant certaines valeurs comme la domination, l'arrogance, la fonctionnalité, la technique etc, la culture moderne a fini par éloigner l'homme de sa principale et traditionnelle source d'inspiration et a compliqué l'art de se rapporter à soi.

Le rapport avec la Nature, avec ses temps et ses lieux, facilite au contraire les retrouvailles avec *Psyché* par l'influence des formes extérieures et la sintonisation des rythmes physiologiques du corps avec la pensée. Pourtant, combien de personnes ont la possibilité de recourir quotidiennement à de telles pratiques? Quel genre de rapport l'âme entretient avec le monde naturel? Existe-t-il aujourd'hui encore pour l'homme la possibilité d'instaurer un rapport plus sain et harmonieux avec le monde naturel sans toutefois renoncer à ce que de bon la technique peut offrir? N'est-ce pas en interrogeant ce rapport que pourra émerger une nouvelle conception de « progrès »?

Voilà quelques unes des questions de fondamentale importance concernant le rapport entre Culture et Nature auxquelles d'éminents intellectuels chercheront tour à tour de répondre à l'occasion de ce Festival ».

Antoine Fratini
Directeur du Festival de la Psychanalyse de Fidenza

Avec la participation de Michel Cazenave (Prof. de Philosophie Sorbonne, Paris), Gabriele Laporta (Directeur de RAI nuit), Silvano Agosti (metteur en scène), Jean Luc Maxence (psychanalyste, écrivain)...

Documents

Pour vous permettre de compléter l'analyse de notre collègue Alain STAHL sur le livre « The plausibility of life » nous vous proposons

P. 8 : « Approfondir le darwinisme » un commentaire du livre de Jean Paul BAQUIAST "Pour *un principe matérialiste fort*" paru aux éditions Bayol , sur le site :
<http://www.editions-bayol.com/PMF/ch2s4.php> inti

Un ensemble d'articles sur les différences et les similitudes d'évolution d'un organe très complexe qui a posé beaucoup de problèmes à Darwin lui-même, l'œil, recueillis sur divers sites :

P. 14 sur <http://fr.wikipedia.org/> : « diversité des yeux »

P. 20 sur le site de Tom ROUD, <http://tomroud.com/2008/01/20/classique-levolution-de-loeil/>
 un article sur l'évolution de l'œil

En vue de sa conférence, notre Collègue Gilbert BELAUBRE nous soumet un résumé de son intervention à venir :

P. 22 « Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée »

Pour préparer la conférence d'Anouk BARBEROUSSE qui aura lieu le mardi 13 mai 2008 nous vous proposons:

P. 23 : « *L'émergence statistique* » un article publié par Anouk BARBEROUSSE dans le Hors-Série n°143 de Science et Avenir dédié à l'émergence

P. 28 Une analyse par Angèle KREMER-MARIETTI du livre d'Anouk BARBEROUSSE « La physique face à la probabilité » publié chez Jean Vrin parue sur le site philosophique DOGMA (<http://dogma.free.fr/>)

P. 32 « Emergence de l'émergence » un autre commentaire du livre de Jean Paul BAQUIAST , « Pour un Principe matérialiste fort »

Approfondir le darwinisme

*Compléments du livre
"Pour un principe matérialiste fort" de Jean Paul BAQUIAST*

Nous devons, au jour où ce livre est écrit, mentionner d'autres approches qui toutes permettent de mieux comprendre les mécanismes de l'évolution, notamment au niveau de la reproduction. Le schéma darwinien s'en trouve ainsi approfondi, ce qui lui permettra de mieux résister aux critiques des spiritualistes.

La biologie de l'ARN

On considérait jusqu'à ces derniers temps l'ARN comme le serviteur dévoué mais sans initiative de l'ADN, dont il assurait la duplication des sites codants lors de la construction cellulaire. La double hélice de l'ADN ou plus exactement les portions de celle-ci identifiées comme des gènes, c'est-à-dire comme portant les instructions permettant de commander la fabrication des protéines, avaient en effet jusqu'à présent focalisé l'attention. L'ARN – ARN dit messenger – était considéré uniquement comme la recette que la cellule devait lire pour fabriquer la protéine commandée par le gène, c'est-à-dire par la portion d'ADN s'exprimant sous la forme dudit messenger. Mais on a découvert qu'une grande partie du génome ne code pas pour permettre la fabrication de protéines. On a parlé d'ADN-poubelle, parce que l'on considérait qu'il s'agissait de portions du génome ne servant à rien (ou ne servant plus à rien) conservées parce que personne ne se charge de faire le ménage dans ce dernier. Aujourd'hui, on découvre que cet ADN, qu'il vaudrait mieux qualifier d'ADN de deuxième ligne, joue de nombreux rôles importants. Cela permettrait, mieux que la négligence de la femme de ménage cellulaire, d'expliquer pourquoi il a survécu à la sélection naturelle. Il sert notamment ainsi à fabriquer des fragments d'ARN qui circulent dans les cellules.

Le rôle de ceux-ci a été longtemps obscur. On soupçonne aujourd'hui que cet ARN est encore plus important à la vie de la cellule – et donc de l'organisme - que les protéines. Ceci explique la persistance de cet ADN non codant au long de l'évolution. Mais les expérimentations restent difficiles, l'ARN étant instable et peu observable. On lui prête cependant de nombreuses propriétés pouvant être importantes, notamment celle de catalyser les réactions chimiques (1). On conçoit que, dans l'hypothèse de l'auto-évolution, l'existence d'un agent aussi polyvalent s'exprimant tout au long de la vie du génome, à partir de ses éléments non-codants (et parallèlement à l'activité codante du génome) permettrait d'expliquer pourquoi certaines fonctions adaptatives puissent apparaître et se transmettre au sein des organismes, qu'il s'agisse de simples bactéries ou d'organismes pluricellulaires complexes. Il ne s'agirait plus du tout alors de mutations s'étant produites au hasard mais d'une véritable co-évolution de l'organisme et du milieu avec lequel il interagit.

Le transfert d'ADN par franchissement de la barrière germinale

Des observations de plus en plus nombreuses montrent par ailleurs aujourd'hui que la barrière germinale réputée étanche protégeant l'intégrité de la partie codante du génome peut être franchie par divers facteurs extérieurs, résultant de l'activité de l'organisme dans son milieu. Il en résulte que le génome est modifié de la même façon que s'il avait subi une mutation. Mais ces modifications peuvent être de bien plus grande ampleur. Elles sont provoquées en laboratoire par des manipulations diverses relevant du génie génétique. Mais dans la nature, elles se produisent spontanément, pour des causes diverses. Certaines sont accidentelles et pourraient être rangées dans la catégorie des

mutations aléatoires. C'est le cas lorsque des particules fortement énergétiques, par exemple provenant d'émissions de rayons cosmiques, pénètrent dans la cellule et provoquent des mutations génétiques. Mais d'autres sont systémiques, internes au système cellulaire et contribuant à son auto-réparation et à son adaptation. Ainsi, dans les cellules circulent, outre les éléments d'ARN déjà évoqués, des morceaux d'ADN (ADN circulant) qui peuvent s'introduire dans les génomes et modifier de façon plus ou moins importante l'économie du génome tout entier.

Le transfert d'ADN, commun chez certaines cellules comme les globules blancs, peut aussi se faire entre cellules d'espèces différentes (Horizontal gene transfer). C'est lui qui est craint dans le cadre de la contamination par des organismes au génome artificiellement modifié. Mais il semble répondre à des besoins très anciens permettant de répondre spécifiquement à certains changements environnementaux, notamment en ce qui concerne les réactions immunitaires.

Le parasitisme et la symbiose

Une cause encore plus répandue de modifications adaptatives du génome, cela dès les origines de la vie, relève du parasitisme et de la symbiose, qui permettent à des organismes différents de s'associer pour mettre en commun leurs propriétés. Dans les cas de symbiose allant jusqu'à l'apparition d'une nouvelle espèce, un nouveau génome résulte du rapprochement des deux génomes antérieurs. La symbiose est considérée comme le facteur le plus efficace aux origines non seulement de la biodiversité mais de la constitution des organismes complexes, par association d'organismes plus élémentaires assurant des fonctions vitales spécialisées. Gilbert Chauvet, là encore, en a précisé les règles, notamment en proposant le concept d'auto-association stabilisatrice (Voir ci-dessous, section 6). La symbiose fait aujourd'hui l'objet de nombreuses études. Nous ne pouvons les évoquer ici. Remarquons, contrairement à ce qui a été dit parfois, que la symbiose n'est pas à ranger dans la catégorie des événements authentiquement aléatoires. On ne se marie pas avec n'importe qui mais avec un partenaire présentant des traits favorables à une vie partagée (2). Nous sommes donc bien là dans le domaine de l'auto-évolution.

La variation facilitée

D'autres hypothèses aboutissant à préciser le mécanisme darwinien classique sont maintenant régulièrement proposées par les généticiens et biologistes voulant répliquer avec des arguments scientifiques aux défenseurs du Dessein Intelligent. **Sous le titre de *The plausibility of Life, deux biologistes évolutionnaires (3) discutent les origines des organes et organismes biologiques complexes. Ils présentent l'hypothèse de la "variation facilitée" (facilitated variation) qui selon eux permet de répondre à la question de savoir comment des mutations génétiques survenant au hasard ont pu produire des organes complexes, tel que l'oeil.***

Ce livre caractérise la nouvelle attitude des darwiniens, attaqués sur tous les fronts par l'incroyable offensive de l'Intelligent Design (ID). Face à des idéologues qui, soutenus par les milieux politiques et religieux les plus conservateurs, tentent de démontrer que seule la main de Dieu a pu organiser l'évolution, les scientifiques matérialistes ont décidé de réagir, plutôt que traiter ces opposants par le mépris. On comprend mal encore en Europe la virulence des débats, si bien que les biologistes européens n'ont pas encore jugé bon de se mobiliser contre un mouvement qui n'a pas encore vraiment traversé l'Atlantique. Mais peut-être ont-ils tort.

Quoi qu'il en soit, comme toute théorie est perfectible, les critiques faites au darwinisme par les défenseurs de l'ID permettent de perfectionner les hypothèses relatives à l'évolution, ce qui ne peut être inutile. Le livre de Kirschner et Gerhart en donne l'exemple.

Selon les auteurs, le problème de la variation, posé par Darwin dès les origines, avait été occulté par les tenants de la Synthèse Moderne (4) qui insistent sur les mécanismes de l'hérédité. Or

la variabilité des organismes est infiniment plus grande que l'on imagine. **Elle ne résulte pas seulement de mutations génétiques ponctuelles mais du fait que, depuis le niveau génétique jusqu'à celui des organes, les organismes sont constitués de blocs modulaires. Les mutations génétiques ne produisent pas de variations au hasard. Au contraire, tous les organismes ont maintenu intact au cours de deux milliards d'années un ensemble de mécanismes vitaux relatifs au métabolisme, à la reproduction de l'ADN, aux processus de croissance. Ce sont ces éléments, conjointement avec des schémas corporels globalement homogènes, qui ont servi de plate-forme aux variations plus visibles.**

Ils prennent l'exemple de la défense de l'éléphant, des bois du cerf et de l'éperon du narval. On peut les considérer comme des innovations différentes, caractérisant une grande complexité spécifique. Mais il apparaît que c'est le même type de cellule qui guide leur développement dans chacune des espèces considérées. La structure modulaire de la vie signifie que ces appendices peuvent se développer selon des modalités différentes sans affecter le reste de l'organisme. Ils ne sont que les expressions différentes d'un même type d'activité génétique découlant du processus de la sélection naturelle, dans lequel seules survivent les variantes utiles dans un environnement déterminé. Le corollaire de ceci est que des variations génétiques minimales peuvent produire des changements corporels importants, tout au moins dans l'apparence. Ainsi les yeux des insectes, comme ceux des autres espèces, y compris les mammifères, qui semblent présenter des complexités différentes, partagent d'importants processus biochimiques modulaires de construction et de mise en relation des composants.

Cette hypothèse permet de faire l'économie de celle selon laquelle des mutations convergentes se produisant dans des espèces différentes plongées dans des environnements différents donneraient des résultats voisins (comme l'oeil) bien que provenant de sources distinctes. On retrouverait sous une autre forme la théorie selon laquelle la vie, partie d'une origine simple mais commune, obéit à des logiques de base sous-jacentes elles-mêmes communes, que des études de physiologie intégrative pourraient aujourd'hui mettre en évidence. Ces logiques s'inspirent des processus de la mécanosynthèse et de la morphogenèse constructale évoqués dans la section 1 de ce chapitre. **Le darwinisme n'est pas remis en cause, mais situé dans une approche plus globale.**

Sur le plan politique et philosophique, qui nous intéresse aussi ici, les auteurs de **The plausibility of Life militent, non seulement pour une contre-offensive généralisée de tous les scientifiques matérialistes contre l'ID, y compris auprès du grand public et des écoles, mais pour une relance interdisciplinaire de toutes les études portant sur les différents mécanismes de l'évolution, afin d'enrichir une théorie darwinienne qui ne peut être considérée comme définitive.** Maintenir une grande activité interdisciplinaire de recherches et d'échanges dans l'étude des phénomènes évolutionnaires constitue la seule façon efficace de répondre aux insinuations de l'ID et aux dégâts produits par cette doctrine dans l'esprit scientifique, au moins aux Etats-Unis.

Mais il ne faut pas se faire d'illusion. Les promoteurs de l'ID, dans leurs blogs et autres publications, ont déjà présenté The plausibility of life comme une nouvelle preuve de la validité de leurs thèses. Il leur est toujours possible d'expliquer que d'éventuelles convergences dans le sens des mutations font partie du grand dessein divin.

Aux origines des bactéries. Le marché commun des gènes

Nous pourrions rédiger un livre entier présentant les travaux en cours visant à compléter la définition néo-darwinienne de l'évolution, sans remettre en cause les fondements du darwinisme. C'est évidemment impossible. Le lecteur sera sans doute intéressé, cependant, par la thèse récemment présentée par deux chercheurs vétérans, le britannique Freeman Dyson et l'américain Carl Woese (5). Elle concerne les origines des bactéries, qui sont les formes les plus anciennes de vie identifiées indiscutablement à ce jour. Carl Woese, dans un article publié en juin 2004 par les

Microbiology and Molecular Biology Reviews, A New Biology for a New Century], s'est engagé dans une entreprise audacieuse consistant à réécrire en partie la Théorie de l'Évolution. Il s'en est pris au dogme selon lequel toutes les formes de vie aujourd'hui présentes sur Terre descendent d'une forme primordiale de proto-cellules apparue il y a quelque 3 milliards d'années. Ce dogme est souvent présenté comme darwinien, encore que certains des historiens ayant étudié la pensée de Darwin disent que celui-ci n'avait pas des idées aussi arrêtées sur les origines des espèces. C'est en s'appuyant sur les grandes quantités d'informations génétiques aujourd'hui recueillies dans les bases de données génomiques que Woese eut l'idée de rechercher d'où pouvaient provenir les trois grandes familles identifiées aujourd'hui, archées, bactéries et cellules à noyau. Et surtout, pourquoi semblaient-elles être apparues simultanément ?

Pour Woese, on ne peut pas comme le font traditionnellement les arbres de l'évolution, faire descendre les trois ordres d'une branche unique. Elles proviendraient au contraire d'un univers peu organisé de proto-cellules, qui échangeaient constamment du matériel génétique entre elles, au sein d'un environnement commun dont les effets sélectifs s'appliquaient à toutes. Il s'agissait d'une espèce de marché commun des gènes, qualifié par Woese de transfert génétique horizontal (horizontal gene transfer), où les espèces n'existaient pas encore. Ce transfert permettait aux diverses sortes de cellules d'échanger les processus biochimiques et catalytiques inventés par les plus efficaces d'entre elles, de sorte que toute la communauté en profitait. Un tel mécanisme a permis à l'évolution de s'étendre rapidement à la Terre entière. De nouvelles solutions en matière de codage pouvaient être découvertes simultanément par des cellules différentes évoluant en parallèle et être ré-assemblées dans de nouvelles cellules par transfert horizontal de gènes. Cette thèse est d'un grand intérêt et ses applications seront nombreuses (6).

Dans un article du NewScientist daté du 11 février 2006, Freeman Dyson reprend cette hypothèse et souligne qu'ainsi, pendant une durée non négligeable, l'évolution a procédé sur un mode non darwinien. Il ne veut pas dire que le mécanisme fondamental mis en évidence par Darwin, les mutations/sélections, ne se produisait pas. Il ne s'agissait pourtant pas du processus généralement qualifié de sélection darwinienne résultant de la compétition pour la survie entre espèces non interfécondes.

Mais pourquoi ou comment les espèces sont-elles alors apparues ? Freeman Dyson explique avec humour que le phénomène s'est produit un certain jour « catastrophique » où une cellule particulière a muté d'une façon si efficace qu'elle a pris un temps d'avance sur ses concurrentes et n'a donc plus voulu (en fait n'a plus été capable de) partager son invention avec elles. Elle les a donc surclassées. Ce fut la première archéobactérie. Ensuite vinrent les premières bactéries puis les premières cellules eucaryotes, sans doute indépendamment les unes des autres. Il assimile le "marché" des processus protéomiques primitifs au marché des logiciels. Si celui-ci est ouvert, c'est-à-dire si les inventions ne sont pas brevetées, tout le monde en profite. Si les brevets existent, ceux qui inventent perçoivent une prime par rapport à leurs concurrents, autrement dit, ils évoluent dans le sens vertical. Mais ils n'évoluent plus dans le sens horizontal et l'ensemble de la communauté perd en adaptabilité et en efficacité productive. Les défenseurs des logiciels libres apprécieront particulièrement cette métaphore (qui montre d'ailleurs que ce concept de logiciel libre a plus de portée philosophique qu'on ne pense).

En effet, l'évolution darwinienne entre des espèces aux génomes fermés est nécessairement lente et surtout cloisonnée. Elle dépend de la survenue aléatoire de mutations qui sont elles-mêmes sélectionnées au sein de niches environnementales étroites. Certes sur des centaines de millions d'années, le processus aboutit à la variété et à l'adaptation fine que l'on sait et dont l'homme est un des produits. Mais en même temps se créent des fragilités. Les menaces actuelles pesant sur la biodiversité en sont l'illustration. Du fait de l'homme, des extinctions massives se sont produites et continueront à se produire. Malheureusement les espèces survivantes n'auront pas la possibilité de se réapprovisionner sur un marché libre des brevets génétiques auxquels seuls les scientifiques auront

accès. Elles seront livrées à elles-mêmes, c'est-à-dire que pratiquement elles n'auront pas le temps de muter pour produire des descendants mieux adaptés. Elles ne pourront donc pas réagir rapidement aux menaces que nous leur faisons subir. Mais, et c'est encore plus malheureux, les espèces évoluées complexes seront les seules à en souffrir. Il semble bien au contraire que le marché commun des échanges génétiques continuera à fonctionner au profit des bactéries et des virus, héritiers selon Woese des proto-cellules initiales. Ces micro-organismes sont de ce fait et deviendront de plus en plus les pires ennemis des espèces évoluées.

Freeman Dyson ne se borne pas à paraphraser Carl Woese. Il ajoute à la théorie de ce dernier des perspectives du plus grand intérêt. Selon lui, et nous le suivons bien volontiers dans cette approche, on peut distinguer trois époques dans l'évolution : l'époque pré-darwinienne du marché commun des gènes, que nous venons de décrire – l'époque darwinienne, où l'évolution prend une forme spectaculaire avec l'apparition et le développement des espèces – et une époque qui commencerait de nos jours et qu'il qualifie de post-darwinienne. Dans celle-ci, l'homme, jusque là principalement responsable des extinctions massives d'espèces, pourrait se révéler un nouvel et inattendu créateur de biodiversité à grande échelle. Mais comment ?

C'est, on le devine, en pronostiquant, comme beaucoup de futurologues, l'explosion au XXI^e siècle des biotechnologies, analogue à celle des infotechnologies au XX^e siècle, qu'il s'appuie pour décrire cette ère post-darwinienne (Nous développons ces perspectives au chapitre 5). Il estime que, dans un avenir proche, chacun pourra disposer de boîtes de manipulations génétiques en « kits » permettant de réaliser en série l'analyse et la recombinaison de génomes, afin de faire apparaître et d'élever de nouvelles espèces vivantes hybrides ou chimères (Voir par exemple les sites des entreprises Interchim ou Biolynx). Cette activité, que les grandes firmes de biogénétique voudraient se réserver par des brevets, se développera de telle sorte que l'on retrouvera, dans le monde entier, un marché commun des gènes et des génomes analogues à celui qui caractérisait la vie à ses débuts. Très vite, écrit-il, la Terre et pourquoi pas aussi les planètes proches (qui seraient ainsi "terraformées" grâce à l'importation d'organismes adaptés à leurs environnements) se trouveront couvertes de nouveaux systèmes vivants entre lesquels s'exercera une sélection féroce, mais qui produiront en contrepartie de nouveaux écosystèmes qui pourront être favorables à une relance de la vie en général, sous de nouvelles formes. Il s'agit d'une hypothèse optimiste. On verrait ainsi l'homme ressusciter des espèces disparues et parallèlement créer de nouvelles « chimères » ou même des espèces tout à fait nouvelles capables, au sein du règne animal comme dans celui du règne végétal ou bactérien, de s'adapter mieux que les anciennes espèces à un environnement devenu hostile. Dans une hypothèse plus pessimiste, que les esprits chagrins n'ont pas manqué d'opposer aux idées de Dyson, les hommes créeraient, par sottise ou par malignité, un véritable enfer d'espèces nuisibles à l'homme comme aux formes supérieures d'organisation.

Physique quantique et auto-évolution

Nous avons plusieurs fois évoqué les très probables liens entre les mécanismes à l'œuvre dans les systèmes physiques au niveau quantique et ceux à l'œuvre dans les systèmes biochimiques. A priori pourtant il n'y en a pas, notamment parce qu'aucun ensemble de molécules biologiques ne semble capable d'offrir à un micro-état quantique un isolement suffisant pour lui éviter la décohérence (c'est-à-dire pour lui éviter de perdre son état quantique et se matérialiser sous forme d'une entité du monde macroscopique) le temps nécessaire à ce qu'il accomplisse un travail utile dans un organisme biologique. Ainsi les propriétés spécifiques aux particules quantiques, notamment l'état de superposition ou l'intrication, que l'on espère utiliser dans les calculateurs quantiques pour réaliser des opérations impossibles à un ordinateur ordinaire, ne paraissent pas pouvoir se produire dans les cellules vivantes. Pourtant de plus en plus de chercheurs s'efforcent actuellement de démontrer le contraire. Un article de Paul Davies du Centre australien d'Astrobiologie à l'Université Macquarie,

Sydney, en fait le recensement (The Vital Spark, par Paul Davies, NewScientist, 11 décembre 2004, p. 28).

Une intuition simple suggère selon lui qu'il conviendrait d'approfondir ces perspectives. La science se heurte aujourd'hui à deux grands mystères. Le premier est celui de la vie (en ce qui concerne son origine mais aussi en ce qui concerne les mécanismes de l'évolution – pour ne pas parler de ceux propres au fonctionnement des neurones du cerveau). Le second est celui du monde quantique. Il y a tout lieu de penser qu'ils pourraient s'éclairer réciproquement. Nous avons déjà évoqué ces questions au chapitre 1. Inutile d'y revenir. Pour Paul Davies, il serait temps que les hypothèses correspondantes soient reprises très sérieusement par la Big Science, peut-être à l'occasion des travaux concernant l'ordinateur quantique. Il pense notamment qu'explorer le thème d'un ordinateur quantique biologique permettrait de montrer que les idées que nous nous faisons sur la décohérence sont encore bien sommaires. Des systèmes biologiques ont peut-être appris, dès l'origine de la vie, à abriter certains micro-états quantiques des risques de décohérence, au moins le temps nécessaire (quelques nanosecondes ?) pour leur permettre de faire tout ce qui dans les processus vitaux nous paraît encore incompréhensible.

1 : On trouvera dans le NewScientist (Move over DNA, Master and Commander, par Philip Cohen, NewScientist, 27 novembre 2004, p. 36) une liste des fonctions attribuées à l'ARN à l'intérieur de la cellule, par exemple outre l'ARN messager, l'ARN transfert, l'ARN ribosomal, etc.

2 : Les bactéries entretenant des relations symbiotiques avec le système digestif, dont la masse serait équivalente à celle des cellules du corps, sont très variées. Mais gare à l'intrusion d'une salmonelle (*salmonella enterica*) dont le moins que l'on puisse dire est qu'elle n'est pas bienvenue.

3 : The plausibility of life (Yale University Press, octobre 2005), par Marc Kirschner, (fondateur du département de biologie des systèmes à la Harvard Medical School) and John Gerhart (biologiste à l'University of California, Berkeley).

4 : Le terme de Synthèse Moderne, dite aussi Néo-darwinisme, désigne la synthèse entre le darwinisme, les lois de Mendel et celles de la reproduction du génome au niveau moléculaire. Voir note ci-dessus, concernant le néo-darwinisme.

5 : Freeman Dyson, actuellement professeur émérite à Princeton, a servi dans le Bomber Command de la RAF pendant la seconde guerre mondiale. Quant à Carl Woese, il s'était rendu célèbre dans les années 1970 en « inventant » le règne des archéobactéries, là où avant lui on ne voyait pas d'intermédiaires entre les bactéries et les eucaryotes (cellules à noyaux dont nous procédons tous). Rappelons que les « archea » identifiées par Woese ont été retrouvées depuis dans tous les environnements extrêmes, ce qui tend à prouver que la vie a commencé aussi bien dans l'extrême chaud, l'extrême froid, l'extrême acidité, l'extrême sulfurisation, l'extrême pression... et que par conséquent elle pourrait bien exister sous cette forme ailleurs que sur Terre, notamment dans les planètes du système solaire.

6 : Nous avons vu que ce mécanisme d'échange de matériel génétique a été aujourd'hui détecté non seulement chez les bactéries mais entre génomes d'espèces évoluées. Les phénomènes d'acquisition de résistances en résultent.

Diversité des yeux d'après Wikipedia :



Yeux composés de mouche



Yeux de chat



Œil de crocodile

L'œil des [vertébrés](#), dont l'[être humain](#), est constitué d'un [globe oculaire](#) tapissé à l'intérieur par la [rétine](#) qui capte les rayons lumineux entrant par un orifice situé en avant du globe oculaire. Le [cristallin](#) que traversent les rayons lumineux en entrant dans le globe oculaire est une [lentille](#) transparente qui permet d'[accommoder](#) afin d'obtenir une image nette sur la rétine. Contrairement aux [vertébrés](#), les [insectes](#) et plus généralement de nombreux [arthropodes](#) possèdent des paires d'[yeux composés](#) constitués chacun d'un ensemble compact de récepteurs sensoriels appelés [ommatidies](#) qui décomposent l'image en une sorte de [mosaïque](#) dont chaque morceau est analysé par un unique [photorécepteur](#).

Chez les [prédateurs](#) comme les [chats](#) ou les [rapaces](#), les yeux sont placés l'un à côté de l'autre ce qui permet, en [vision binoculaire](#), de mieux [percevoir](#) les distances des [proies](#) situées en face d'eux ; à l'inverse, les yeux d'autres animaux comme les [lapins](#) ou les [souris](#) sont généralement placés de part et d'autre de la tête ce qui permet de couvrir un plus grand [champ visuel](#) et de mieux détecter la présence d'un danger dans l'environnement.

Les [yeux composés](#) des [arthropodes](#) (notamment chez les insectes et les crustacés) sont constitués d'un ensemble de [récepteurs](#) (jusqu'à 30 000 chez certains [coléoptères](#)) sensibles à la [lumière](#) qui sont appelés des [ommatidies](#). On appelle plus vulgairement l'œil composé : *œil à facettes*. Pour les [copépodes](#) il y a, dans la plupart des cas, un œil impair, médian, qui correspond à l'œil de la larve Nauplius. Il est alors couramment appelé *œil nauplien*.

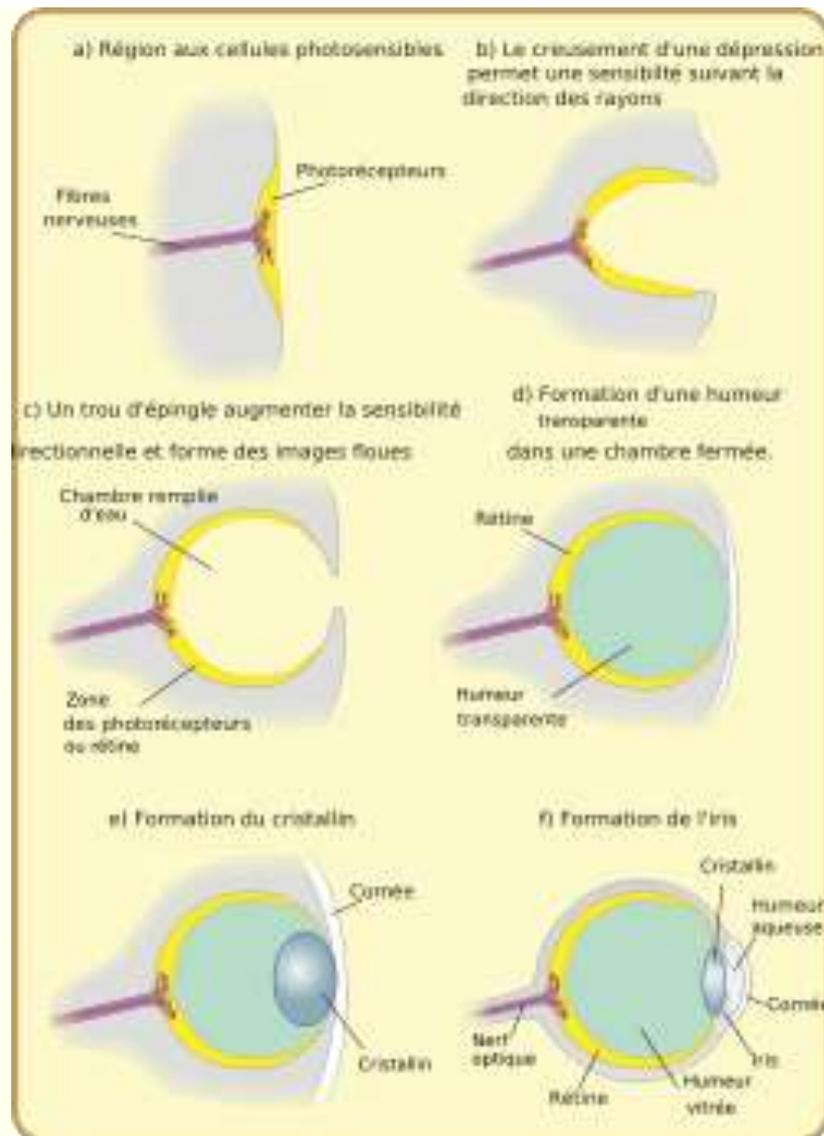
Chez la plupart des [vertébrés](#) et certains [mollusques](#) (les [pieuvres](#) entre autres), l'œil consiste en la projection de l'image sur un tissu photosensible : la [rétine](#). Celle-ci détecte la lumière et l'information est transmise au [cerveau](#) par le [nerf optique](#). L'œil est généralement de forme à peu près sphérique, et rempli d'un [gel](#) transparent appelé [humeur vitrée](#). L'œil dispose souvent d'une lentille convergente et d'un muscle obturateur, l'[iris](#), qui contrôle le niveau de lumière qui pénètre dans l'œil. Bien que les yeux des vertébrés et des [céphalopodes](#) semblent identiques en fonction et en forme une fois la [morphogénèse](#) achevée, l'étude [embryologique](#) montre que si l'organe visuel des vertébrés provient de la [différenciation](#) de cellules du cerveau, celui des mollusques provient de la différenciation de cellules de la [peau](#). On cite ce cas comme exemple d'[évolution convergente](#).

Certains mammifères comme le [chat](#) ou certains [rapaces](#) nocturnes sont [nyctalopes](#). La bande [spectrale](#) visible varie selon les espèces. Ainsi certains [oiseaux](#) ([oiseaux-mouches](#), [hirondelles](#), [pigeons...](#)), [arthropodes](#) ([langoustes](#), [abeilles...](#)), [reptiles](#) ([gecko](#), [tortue...](#)) et [poissons](#) ([truite...](#)) semblent voir les rayons [ultraviolets](#).

Certains [serpents](#) "voient" dans l'[infrarouge](#) mais grâce à leurs [fossettes](#). La vision des couleurs diffère aussi selon les espèces ou les individus.

La [crevette-mante](#) est réputée avoir l'œil le plus complexe du règne animal.

Évolution de l'œil



Modèle d'évolution de l'œil de [vertébrés](#)

Durant longtemps, on a pensé que les différentes formes de yeux s'étaient développées d'une façon indépendante à partir d'espèces d'origines diverses (on parle de développement [Paraphylétique](#)). Cependant la découverte de l'existence d'un gène commun au règne animal contrôlant le développement des yeux, fait plutôt penser à une origine commune (on parle de développement [monophylétique](#)). Il semble donc que la diversité de forme et de structure soit le fruit de séries d'[évolutions](#) dues à la [sélection naturelle](#). Ce mécanisme d'évolution a donc été source de controverse entre les évolutionnistes et les [créationnistes](#).

La diversité des organismes et des types de vision est, comme le soulignait déjà [Charles Darwin](#) dans *L'Origine des espèces*, un défi intellectuel pour les partisans de l'évolution. de vie dans un environnement précis. Pourtant, il existe des points communs dans le fonctionnement des yeux des diverses espèces.

Par exemple, il existe des similitudes dans la façon dont les stimuli visuels sont transmis des récepteurs au système nerveux central. Ces similitudes sont très nombreuses chez les [amniotes](#). L'œil ancestral de ces animaux dériverait d'espèces de l'ordre des [Captorhinida](#) disparus il y a 300 millions d'années¹.

Couleur de l'œil humain

Une [mutation génétique](#) du [gène](#) *OCA2*, porté par le chromosome 15 serait responsable de la couleur bleue des yeux et date d'environ 8000 ans². Elle serait due à un ancêtre commun unique et a perduré car, même si elle ne présente pas d'avantage évolutif, elle n'est pas non plus préjudiciable.

OCA2 code pour la [protéine](#) P qui est impliquée dans la production de [mélanine](#), le [pigment](#) qui colore les cheveux, la peau et les yeux. La mutation n'est pas directement située sur *OCA2* mais sur un gène adjacent qui n'annihile pas totalement son activité mais limite son champ d'action en réduisant la production de mélanine dans l'iris. Lorsque le gène est totalement désactivé, le corps ne secrète plus du tout de mélanine : c'est l'[albinisme](#).

La [complexité irréductible](#)

1) Complexité irréductible , opposition aux théories darwiniennes

La **complexité irréductible** est la thèse selon laquelle certains systèmes [biologiques](#) sont trop complexes pour être le résultat de l'[évolution](#) de précurseurs plus simples ou « moins complets », du fait de mutations au hasard et de la [sélection naturelle](#). Le terme a été inventé et défini en 1996 par le professeur de biochimie [Michael Behe](#), un système de complexité irréductible étant, « *composé de plusieurs parties ajustées et interagissantes, qui contribuent chacune à sa fonction élémentaire, alors que l'absence d'une quelconque de ces parties empêche le fonctionnement du système* »¹. Les exemples cités par Behe, la [coagulation](#) en cascade, le moteur (ou corps basal) des [flagelles](#) cellulaires et le [système immunitaire](#), **ne pourraient donc être le résultat de l'évolution naturelle** : tout système précurseur au système complet ne fonctionnerait pas, et ne constituerait donc pas un avantage sélectif.

De façon plus générale, cet argument est utilisé par les partisans du [créationnisme](#) et du dessein intelligent pour réfuter la [théorie scientifique actuelle de l'évolution](#) et prouver l'implication d'une cause divine ou intelligente dans la création de la vie. Ces thèses sont anciennes et reprennent l'argument [téléologique](#) de l'analogie du [grand horloger](#). En dehors des systèmes biochimiques présentés par Behe, un exemple très couramment avancé de système trop complexe pour être le résultat de l'évolution est l'[œil](#).

Plusieurs opposants à la théorie de l'évolution darwinienne, notamment [Henri Bergson](#) dans *L'évolution créatrice*, arguent que certains organes, comme l'œil humain (ou celui du homard), exigent un agencement très précis et concourant de différents éléments pour fonctionner correctement. Ils ne pourraient donc être le résultat d'une évolution progressive par sélection naturelle : une ébauche d'œil ne fonctionnerait pas et ne donnerait pas un avantage sélectif significatif. [Arthur Koestler](#) estime même, dans *Janus*, que cette mutation inutile aurait de fortes chances de se diluer et de disparaître bien avant que les suivantes n'arrivent pour la compléter.

Bergson s'oppose à Darwin sur un point : la réductibilité du phénomène vivant à une explication mécaniste, surtout pour des raisons épistémologiques liées à la fonction de notre intelligence ; celle-ci, dans une perspective pragmatique, vise l'action et constitue elle-même un outil d'adaptation. Le modèle établi par Darwin, selon lui conséquence de notre faculté de connaître, resterait encore insuffisant et exigerait une explication philosophique et intuitive de l'évolution. *L'existence même d'une évolution n'est jamais remise en cause par Bergson ni par Koestler*, mais tous deux insistent sur le fait que si son rôle d'élimination est indiscutable, son apport explicatif à des successions d'innovations en cascade reste problématique même sur les durées considérées, essentiellement pour des raisons de dilution de mutations qui, isolées, resteraient sans effet.

2) Réfutation de la complexité irréductible

La thèse de la complexité irréductible est rejetée par une très large majorité de la communauté scientifique² ; elle est souvent considérée comme [pseudoscientifique](#)³. Des travaux scientifiques ont montré que les exemples présentés par Behe ne répondaient pas à sa définition, et des précurseurs ont été identifiés pour certains d'entre eux. Les critiques considèrent que la thèse de la complexité irréductible est fondée sur une incompréhension du fonctionnement de ces systèmes biochimiques, et une méconnaissance des mécanismes de l'évolution (en particulier l'[exaptation](#)). Elle est également considérée comme un excellent exemple d'*argumentum ad ignorandam* (argument d'ignorance, [sophisme](#) par lequel on déclare fausse une proposition qui n'a pas été démontrée vraie).

Bien qu'elle ait été rejetée en tant que théorie scientifique lors du [procès de Dover](#)⁴, à l'issue duquel la cour a jugé que « *La thèse du Professeur Behe sur la complexité irréductible a été réfutée par des articles scientifiques publiés dans des revues à comité de lecture, et a été rejetée par la communauté scientifique dans son ensemble* » procès de Dover (p. 64)², le concept de complexité irréductible reste un argument courant pour les partisans du dessein intelligent et d'autres [créationnistes](#).

Cas particulier de l'oeil

En fait, un organe photosensible même élémentaire, capable par exemple de simplement distinguer le [jour](#) de la [nuit](#) ou le passage d'une ombre, prédateur ou proie potentielle, procure un avantage sélectif suffisant pour qu'on puisse envisager qu'il s'impose rapidement. De là à obtenir un organe beaucoup plus complexe tel que l'oeil des [vertébrés](#), le nombre d'étapes est certes considérable et demande une coordination des modifications de plusieurs organes adjacents, mais chaque amélioration accentuera l'avantage sélectif et s'imposera. Des travaux récents montrent que l'apparition d'un oeil "complet" est en fait très rapide, 400 000 générations suffisent⁶.

Dans ces considérations, il faut en fait dissiper l'ambiguïté des notions d'organes "élémentaires", ou "d'ébauches" d'organes. Les yeux, ou les membres (ou d'autres organes) sont plus ou moins *performants* selon leur utilisation dans un organisme donné (vers, poissons, reptiles, oiseaux . . .) mais ils ont toujours été "formés" et diversement sélectionnés suivant la lignée.

On notera d'ailleurs qu'une plus grande complexité n'est pas assimilable à un avantage ou un meilleur fonctionnement.

Ainsi, la [rétine](#) des vertébrés est montée "*à l'envers*" : la partie sensible des [cônes](#) et [bâtonnets](#) pointe vers le fond de l'oeil, tandis que le filament nerveux qui transmet l'information pointe vers l'avant. Cette constitution présente plusieurs inconvénients, notamment le fait que le [nerf optique](#) doit alors traverser la [rétine](#), créant un point dépourvu de cônes ou bâtonnets, c'est-à-dire un [Point aveugle](#). Ainsi que de celui de réduire la lumière parvenant aux récepteurs ainsi recouverts par une couche translucide de la rétine, avec [artérioles](#) et [veinules](#).

Par comparaison, l'oeil de la [pieuvre](#), et plus généralement des [céphalopodes](#) par exemple est monté à "*l'endroit*" : la partie sensible des cellules [photoréceptrices](#) de leur rétine est dirigée vers l'avant de l'oeil, sur la première couche de la rétine et il n'y a donc pas de point aveugle créé par le nerf optique⁷.

[Richard Dawkins](#) ajoute qu'il ne faut pas négliger la possibilité pour qu'un organe change de fonction ou remplisse plusieurs fonctions simultanément.

Un exemple frappant en est celui de la [vessie natatoire](#) qui est [homologue](#) aux [poumons](#). Chez certains poissons (les [Ginglymodes](#)), elle joue en effet les deux rôles. De même, des plumes peuvent avoir d'abord procuré un avantage en termes d'isolation thermique, puis aidé des sauts, et en fin de compte débouché au terme de millions d'années sur le vol.

CLASSIQUE : L'ÉVOLUTION DE L'OEIL du blog de Tom Roud

L'un des problèmes les plus ardues soulevés par Darwin concerne l'évolution des structures complexes, telles que l'oeil.

Dans l'origine des espèces, Darwin, en scientifique honnête, reconnaît une difficulté ...

« que l'oeil ... ait pu se former par simple sélection naturelle semble, je le confesse librement, absurde au plus haut degré »

... pour mieux proposer un scénario :

“Pourtant, la raison me dit que si l'on peut montrer qu'il existe de nombreuses petites étapes entre un oeil imparfait et simple et un oeil parfait et complexe, chaque étape pouvant être utile à son possesseur; (...) alors la difficulté à croire qu'un oeil parfait et complexe ait pu se former par la sélection naturelle (...) peut être surmontée »

L'idée sous-jacente est une progression très lente dans l'évolution, chaque étape apportant de nouveaux avantages à l'animal, allant successivement dans le même sens. Ce n'est pas idée si évidente : quand un organe est très complexe, il est difficile d'imaginer qu'un organe beaucoup moins complet ait pu effectuer exactement la même fonction en moins efficace (pensez par exemple à ce que pourrait être un coeur en moins efficace ...). En 1994, Nilsson et Pelger ont attaqué ce problème, et ont rendu l'intuition de Darwin plus quantitative en proposant un scénario pour l'évolution de l'oeil.

Comment l'oeil a-t-il pu évoluer ?

En guise d'illustration, on pourra se reporter [à ce petit film](#) illustrant le scénario de Nilsson et Pelger.

Nilsson et Pelger définissent une quantité qui sera améliorée au cours du temps par l'évolution et qui apportera un avantage sélectif aux animaux, ce qu'on appelle classiquement la “fitness”. Dans le cas de l'oeil, il s'agira de l'acuité visuelle de l'oeil, plus exactement la capacité à déterminer la direction des rayons lumineux. C'est une hypothèse assez forte : pendant des millions d'années, ils supposent que l'évolution a agi sur des yeux primitifs pour optimiser cette seule et unique fonction [1].

L'idée est alors de supposer qu'un organisme primitif disposait de cellules photosensibles en surface. La physique nous dit alors que les deux transformations suivantes améliorent l'acuité visuelle :

- soit créer une dépression pour invaginer les cellules photosensibles (en gros, gagner en profondeur de champ)

- soit réduire l'ouverture de l'oeil (pour faire un petit trou laissant passer un minimum de rayons lumineux pour chaque direction, comme le petit trou qu'on perce dans la chambre noire qu'on étudie au collège).

Nilsson et Pelger montrent que partant d'un oeil “plat”, il est bien plus efficace au début de créer une dépression pour mettre les cellules dans une cavité, jusqu'au moment où la “profondeur” de l'oeil est égale à sa largeur; à partir de ce moment, il est plus efficace de réduire la taille de l'ouverture par où passe la lumière.

Le problème est que plus on réduit l'ouverture, moins il y a de la lumière qui passe dans l'oeil et plus l'image est bruitée : il existe donc une ouverture optimum de l'oeil pour laquelle il est impossible de gagner en acuité visuelle en changeant la forme de l'oeil. C'est le moment où une lentille devient nécessaire pour continuer à améliorer l'acuité. Nilsson et Pelger supposent que l'évolution agit pour modifier lentement l'indice de réfraction à la surface de l'oeil. Même une lentille de très mauvaise qualité accroît l'acuité visuelle : une très mauvaise lentille est toujours plus efficace que pas de lentille du tout. Ils montrent également que la lentille doit être au début ellipsoïdale compte-tenu de la forme optimale de l'oeil à ce stade. Une fois qu'une lentille existe, on peut encore améliorer l'acuité visuelle en rendant l'oeil hémisphérique et la lentille sphérique, comme on peut l'observer chez les poissons et les céphalopodes.

Résumé de la séquence :

cellules photosensibles → invagination → réduction de l'ouverture → lentille → lentille ellipsoïdale → lentille et oeil sphérique

Notez que le chemin pour aller vers un oeil "moderne" n'est pas direct : l'oeil converge d'abord vers une forme précise, puis on crée une lentille, et l'oeil et la lentille doivent de nouveau changer de forme ensemble pour maximiser l'acuité visuelle. La forme finale de l'oeil est contrainte par l'évolution de la lentille (et n'est pas la forme intermédiaire sans lentille).

Nilsson et Pelger proposent alors une estimation du temps pour évoluer un oeil. En supposant un incrément de chaque quantité physique de 1% par étape (taille de l'oeil, invagination, etc ...), ils comptent environ 1800 étapes pour passer des cellules photosensibles à un oeil moderne. En prenant en compte différents paramètres de l'évolution, ils estiment qu'en réalité chaque paramètre change de 0.005 % par génération, soit "seulement" 400 000 générations pour évoluer un oeil complet, et autant d'années en supposant un temps typique de génération d'un an pour les animaux aquatiques. Cela explique qu'on puisse observer des yeux, structures complexes s'il en est, chez les animaux primitifs du Cambrien : une fois les cellules photosensibles acquises, la direction est tracée et l'évolution de l'oeil est extraordinairement rapide !

Pour conclure, ce travail est selon moi remarquable sur deux aspects :

- d'abord il fournit un scénario d'évolution de l'oeil basé sur des considérations purement physiques. Ce scénario pourrait potentiellement être vérifié par l'observation de fossiles. De plus, il permet de "quantifier" plus précisément l'intuition de Darwin
- d'un point de vue évolutif, il montre que des structures complexes ne demandent pas forcément beaucoup de temps pour évoluer. L'évolution est assez puissante pour façonner des organes fonctionnels très rapidement, ce qui explique notamment pourquoi certaines transitions évolutives sont si rapides...

Référence :

Nilsson & Pelger, A pessimistic estimate of the time required for an eye to evolve. Proc. Biol. Sci. 1994 Apr 22;256(1345):53-8

[1] Ce n'est pas toujours le cas : on peut penser qu'une nouvelle fonction évolue en détournant l'usage d'une fonction existante. Un bon exemple est l'évolution de l'aile : l'aile des oiseaux ou des chauve-souris est une variation/réorganisation de la patte des animaux, alors que la fonction de l'aile n'a rien à voir avec la fonction de la patte.

Pour comprendre l'émergence : une réduction bien tempérée.

Résumé de l'intervention de notre Collègue Gilbert BELAUBRE

Avant même que le terme n'ait été utilisé, Boltzman et Maxwell s'étaient attaqués avec succès au problème de l'émergence des propriétés macroscopiques dans les milieux fluides à partir des éléments, atomes et molécules, qui étaient de leur temps une hypothèse de travail. Il est certain qu'aux niveaux supérieurs de la complexité, et même sans invoquer l'apparition de la conscience, nous butons sur l'inextricable complexité du réel.

Mais cette complexité, où certains voient l'origine de l'irréversibilité, et donc peut-être du temps, ne met pas en cause la notion de causalité sur laquelle nous fondons inéluctablement nos représentations.

La science, jusqu'au 20^{ème} siècle, a développé des théories linéaires. Aujourd'hui, le non-linéaire s'impose dans tous les domaines complexes. Et nous n'avancerions guère dans ce domaine, où les mathématiques n'ont pas encore fait de percées magistrales, si nous n'avions pas, avec l'avènement des ordinateurs, des moyens de simulation qui nous permettent de tester des hypothèses sur le déroulement des phénomènes complexes.

Mais les ordinateurs ne seront jamais capables de la prise en compte du réel imaginée par Laplace et nous voyons, en étudiant des processus « à stratégies » comme les jeux, que nous devons essayer d'approcher le réel par des représentations progressives, à des niveaux de plus en plus larges par le nombre d'éléments qui les constituent. A chaque stade de cette expansion, il serait illusoire de vouloir embrasser toutes les caractéristiques du milieu étudié. Il faut faire des choix : il faut garder le maximum de variables et de paramètres permettant des représentations (des modèles) et le minimum permettant de considérer que ce qu'on laisse de côté est accessoire. L'essentiel étant que ce minimum soit inférieur au maximum que nous pouvons prendre en compte. Il s'agit là d'un travail de réduction, indispensable à tous les niveaux, pour éviter d'être noyés sous l'amoncellement des détails. Notre garde-fou est toujours l'ordinateur. Ce travail est affaire de flair. Mais si nous craignons d'avoir omis un paramètre, ou de nous en être inutilement encombrés, une simulation nous guidera. De cette manière l'ordinateur nous accompagne dans cet effort heuristique qui a toujours caractérisé les hypothèses des savants, et dont Newton et Maxwell sont les têtes légendaires.

Une revue rapide des modèles mis en œuvre dans les domaines complexes nous montrera que la recherche avance dans cette voie.

L'émergence Statistique

Par Anouk BARBEROUSSE⁴

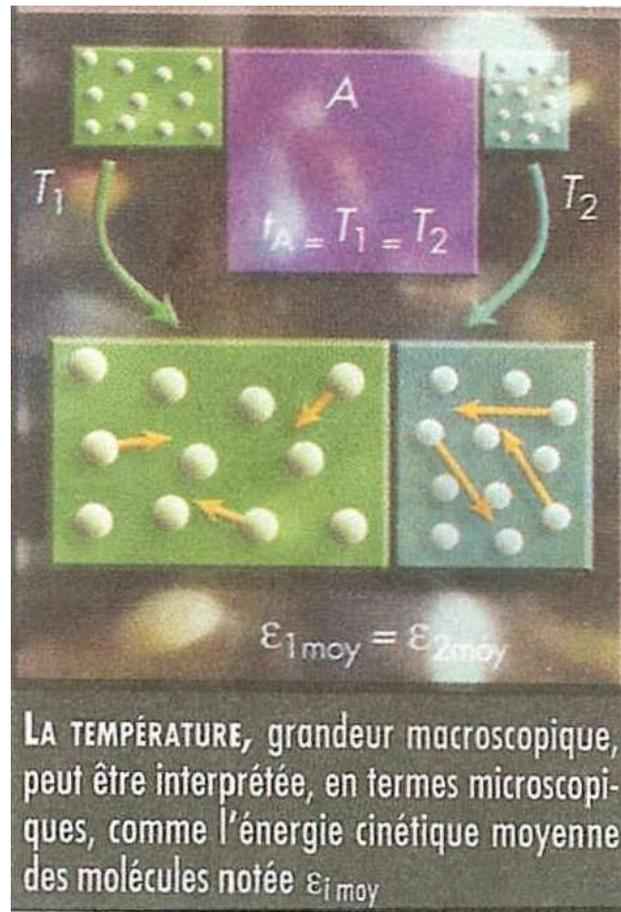
Science et Avenir Hors-Série n°143 p.72

« Si la propriété thermodynamique de température est réductible à une propriété statistique , elle n'en est pas moins une propriété émergente et nouvelle que ne possèdent pas les petits ensembles de molécules. »

Par « propriété émergente », on entend souvent une propriété qui se laisse difficilement expliquer ou prédire dans le cadre des théories scientifiques courantes. La propriété d'être vivant a longtemps semblé un exemple paradigmatique de propriété émergente, puisque les théories physiques et chimiques en vigueur étaient impuissantes à expliquer pourquoi et dans quelles circonstances un morceau de matière peut être qualifié de « vivant ». La notion d'émergence est donc fréquemment liée à celles de nouveauté radicale et de mystère. Point n'est cependant besoin de faire appel à des propriétés comme « être vivant » ou « être conscient » pour explorer la notion d'émergence. Même dans le cadre de l'étude de phénomènes bien connus et bien compris scientifiquement comme les phénomènes thermiques, on éprouve parfois le besoin d'introduire la notion d'émergence. Ainsi qu'on le verra, elle est alors complètement distincte de celle de mystère. C'est en analysant la notion de réduction, couramment comprise comme antagoniste à celle d'émergence, que l'on parviendra à une compréhension plus fine de l'émergence.

Pour de nombreux philosophes, le rapport entre thermodynamique et mécanique statistique est un exemple paradigmatique de réduction d'une théorie à une autre, peut être le seul véritable exemple de réduction dont on dispose. Ils considèrent en effet que l'on peut traduire le vocabulaire de la thermodynamique dans celui de la mécanique statistique sans perte de sens ; que les lois de la thermodynamique, lesquelles régissent les échanges d'énergie entre les corps, sont intégralement expliquées par celles de la mécanique statistique. Cela revient à dire que, selon cette approche, le rapport entre thermodynamique et mécanique statistique est exactement celui qui définit le rapport d'une théorie réductrice à la théorie qui la réduit. La théorie réductrice est ici la mécanique statistique et la théorie réduite, la thermodynamique. Pour bien comprendre cette position courante parmi les philosophes, explicitons d'abord les deux points énoncés ci-dessus.

⁴ Anouk BARBEROUSSE est chargée de recherche au CNRS.
barberou@heraclite.ens.fr



Emergence et niveaux de phénomènes

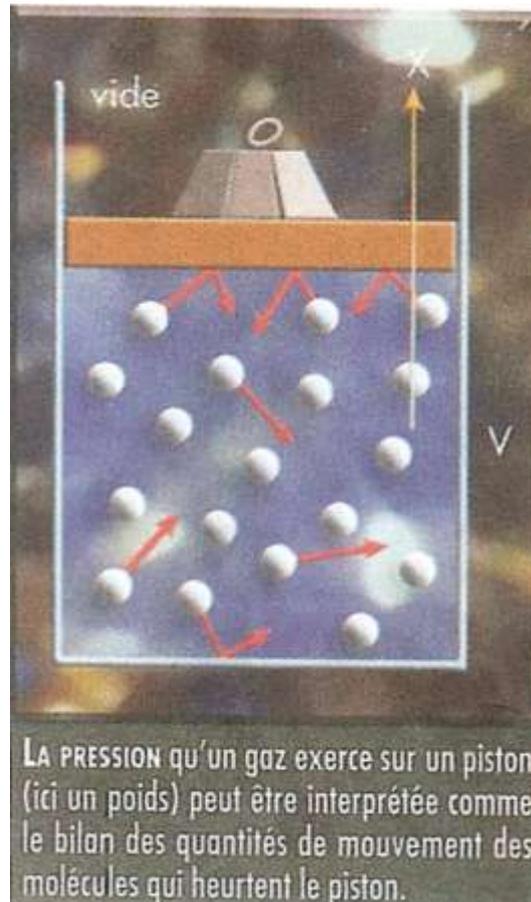
La plupart des exemples supposés d'émergence couramment discutés font intervenir deux niveaux, au moins, de phénomènes. C'est le cas pour les propriétés thermodynamiques, qui sont macroscopiques, et dont on se demande s'il est possible de dire qu'elles émergent à partir de propriétés microscopiques sous-jacentes. C'est également le cas pour les propriétés mentales, dont on se demande s'il est possible de dire qu'elles émergent à partir des propriétés des neurones: les propriétés mentales existent à l'échelle des organismes, dont les neurones sont des composants. Lorsqu'on pense que les propriétés de l'échelle la plus grande ne sont pas de véritables propriétés émergentes, on cherche à les réduire à des propriétés existant à l'échelle plus petite. On parle alors de «microréduction». Cependant, savoir s'il existe des propriétés émergentes est une question plus large que savoir si les propriétés qui apparaissent à une échelle sont réductibles à certaines des propriétés qui apparaissent à l'échelle inférieure. Pour le dire autrement, toutes les tentatives de réduction ne sont pas, en droit, des tentatives de microréduction. La structure conceptuelle d'un problème d'émergence - ou de réduction - est la suivante : un même phénomène peut être décrit par deux ensembles distincts de propriétés, et l'on se demande quels rapports entretiennent ces deux ensembles de propriétés. Ces propriétés sont-elles identiques ? Dans ce cas, un des ensembles doit être éliminé ; Il n'est qu'un artefact linguistique. En ce qui concerne les propriétés thermodynamiques, un des ensembles peut être réduit à l'autre. Dans d'autres cas encore, une réduction de ce type est peut-être impossible. Une telle analyse de la structure conceptuelle d'un problème d'émergence ou de réduction indique que la question de l'échelle des propriétés considérées n'intervient pas nécessairement dans la discussion. On perçoit l'importance que revêtent en revanche les descriptions linguistiques des propriétés en question: si ces descriptions sont inadéquates, le problème d'émergence est mal posé. A. B.

Dans le vocabulaire spécifique à la thermodynamique, on trouve des termes comme «chaleur», «pression», «température », «équilibre thermique». Tous sont dénués de signification dans le contexte théorique de la mécanique statistique, qui est, comme son nom l'indique, une théorie du mouvement. Ainsi, dans une telle théorie, le fait qu'un corps en mouvement ait telle ou telle température n'a aucune pertinence. La première condition de la réduction de la thermodynamique à la mécanique statistique est de trouver des correspondants des termes de la thermodynamique dans le vocabulaire de la mécanique statistique. A « température d'un corps », par exemple, correspondrait «énergie cinétique moyenne des molécules qui composent un corps ». On voit que cette traduction fait appel à une propriété du *mouvement* des molécules: on est bien dans le contexte d'une théorie mécanique. Non seulement cela! C'est à l'énergie cinétique *moyenne* des molécules que l'on fait appel. C'est la raison pour laquelle on parle de mécanique *statistique* : on ne prête pas attention aux seuls mouvements des corps individuels, mais à leurs propriétés collectives. Cela constitue un important élément de la discussion critique de la thèse selon laquelle la thermodynamique est réduite à la mécanique statistique.

Pour en comprendre la portée, examinons le point relatif aux lois. Les lois de la thermodynamique ont entre autres conséquences que la température d'un corps au repos, c'est-à-dire non soumis à des interactions externes, atteint progressivement une valeur stable, dite «valeur d'équilibre ». Comment la mécanique statistique explique-t-elle l'invariance de la température¹ d'équilibre ? Cette question difficile admet plusieurs réponses. L'une d'elles suppose que le système, un gaz par exemple, possède une certaine propriété appelée « ergodicité » : il passe et repasse continûment par tous les états compatibles avec le niveau d'énergie correspondant à la température qu'il a atteinte. La notion d'ergodicité contient plusieurs idéalizations : tout d'abord, elle présume que le système est parfaitement isolé; ensuite, elle n'est définie que « dans la limite du temps infini ». Presque toutes les applications des phénomènes thermodynamiques à l'équilibre comportent de telles idéalizations, qui constituent un nouvel élément important de la discussion.

On comprend mieux maintenant la thèse selon laquelle la thermodynamique est réduite à la mécanique statistique: elle l'est, selon la définition classique de la réduction, si l'on admet à la fois des propriétés statistiques dans la théorie réductrice et l'innocuité des idéalizations impliquées. Il est concevable d'accepter sans autre forme de procès ces deux éléments indispensables: d'une part, les propriétés statistiques n'ont rien de mystérieux; d'autre part, il est courant, en physique, d'employer toutes sortes d'idéalizations. Dans ce cas, il suffira de préciser que la thermodynamique est bien réductible à la mécanique statistique dans la limite de l'acceptabilité de certaines idéalizations et de la notion de propriété collective.

Le coeur de la discussion porte à présent sur ces deux restrictions. Est-ce que les idéalizations utilisées dans la mécanique statistique d'équilibre sont acceptables ? Peut-on admettre l'existence de propriétés collectives? L'acceptabilité des idéalizations de la mécanique statistique d'équilibre est une question difficile car la plupart de ces idéalizations sont malaisément contrôlables.



Emergence et limitations cognitives

Si l'on admet que les propriétés thermodynamiques sont réductibles à des propriétés statistiques d'ensembles de molécules, alors, pourquoi en parle-t-on encore? A partir du moment où il peut être intégralement traduit dans celui de la mécanique statistique, le vocabulaire de la thermodynamique ne devient-il pas redondant? La réponse pragmatique à cette question est que, en écrivant des formules thermodynamiques plutôt que leurs correspondants en mécanique statistique, on effectue une économie considérable.

La question peut se poser de manière plus aigüe : selon une conception de la mécanique statistique, c'est parce que nos capacités cognitives ne nous permettent pas de suivre les trajectoires des molécules qui composent les corps macroscopiques que nous sommes obligés d'utiliser des outils statistiques. Si nous étions capables d'appréhender chaque molécule individuellement, nous n'aurions plus besoin de faire de la mécanique statistique - ni de la thermodynamique. La mécanique nous suffirait, qu'elle soit classique ou quantique, puisque ici la différence importe peu. L'approche de la mécanique statistique qui insiste sur le fait que l'usage des termes thermodynamiques est légitime ou non selon le nombre des molécules considérées permet de montrer que l'appel à la nature de nos capacités cognitives obscurcit la discussion plus qu'il ne l'éclaire. Selon cette approche, en effet, les propriétés thermodynamiques émergent - ou n'émergent pas - selon un paramètre qui est indépendant de nos capacités cognitives. Ainsi l'émergence des propriétés thermodynamiques est-elle un phénomène objectif.

Ces deux conceptions de la raison pour laquelle nous devons faire usage des statistiques pour étudier les propriétés microscopiques des corps macroscopiques sont-elles incompatibles? Cette question reste ouverte aujourd'hui. Ainsi même la plus simple de toutes les questions d'émergence, celle de l'émergence des propriétés thermiques, est-elle assez délicate et met-elle en jeu des questions fondamentales. A. B.

Considérer l'évolution d'un système à la limite du temps infini peut être comparé avec une autre idéalisation bien connue, celle du point matériel. Lorsque, en mécanique, on fait comme si les corps étaient des points sans extension mais pourvus de masse, on sait exactement dans quelle mesure on se trompe en adoptant une telle idéalisation. Il est possible de calculer l'erreur qu'elle introduit dans la représentation du système que l'on étudie. Pour ce qui est de la limite du temps infini, on est dans l'incapacité de déterminer l'erreur introduite. Cette idéalisation est nécessaire pour que les calculs, et les explications qui en découlent, soient possibles en mécanique statistique, mais on ne connaît pas ses effets sur la qualité de la représentation des systèmes. Avec de telles idéalisations, on travaille en partie à l'aveuglette, et seule l'exactitude des résultats observables des calculs est garantie de leur efficacité. Ainsi ces idéalisations ne sont-elles justifiées que par leurs effets.

La justification par les effets est loin d'être sans valeur; mais puisque, selon la conception classique, la réduction est une affaire d'explication intégrale, la persistance dans la représentation physico-mathématique d'éléments dont l'efficacité est mal comprise peut poser problème. La présence d'idéalisations mal contrôlées constitue donc une première réserve possible contre la thèse de la réductibilité de la thermodynamique à la mécanique statistique. Il n'est cependant pas possible d'en tirer argument pour affirmer que quoi que ce soit émergerait dans les phénomènes thermiques. En effet, la discussion porte ici sur les outils de la représentation physico-mathématique, et non directement sur les phénomènes eux-mêmes.

Tournons-nous maintenant vers les problèmes posés par les propriétés statistiques. Comme cela a déjà été suggéré, elles n'ont rien de mystérieux : l'énergie cinétique moyenne d'un ensemble de molécules n'est ainsi que la somme des énergies cinétiques de toutes les molécules divisée par leur nombre. Cependant, dire « La température est une propriété émergente d'un ensemble de molécules » n'est pas absurde. En effet, même si l'on conçoit traditionnellement que « énergie cinétique moyenne d'un ensemble de molécules » est une traduction de « température du corps composé de ces molécules », les expressions « énergie cinétique moyenne » et « température » n'ont pas exactement la même extension. Alors que l'on peut parler d'énergie cinétique moyenne quel que soit le nombre de molécules, on ne parlera pas de température d'un ensemble de quatre molécules par exemple. Plus exactement parler de température pour quatre molécules renverrait à un sens du mot « température » qui n'est pas le sens habituel, tel qu'il est défini en thermodynamique au moyen de la transitivité de la relation « être en équilibre thermique avec ». Ainsi, employer le terme « température », c'est pointer vers d'autres significations que celles qui sont associées à l'expression « énergie cinétique moyenne » (*lire, ci-dessous, «Émergence et limitations cognitives»*).

Approfondissons encore la discussion sur ce que « énergie cinétique moyenne d'un ensemble de molécules » et « température d'un corps » veulent dire. Tout soupçon d'émergence ne serait-il pas définitivement écarté si l'on supposait que, par définition, ces deux expressions signifient la même chose? Un tel postulat serait parfaitement compatible avec l'entreprise de réduction de la thermodynamique à la mécanique statistique. Ainsi Maxwell et Boltzmann - les fondateurs de la mécanique statistique - cherchaient-ils à exhiber les «*fondements mécaniques*» de la thermodynamique. N'est-ce pas l'essence même de l'entreprise de réduction?

Une nouvelle distinction s'impose ici, entre la réduction comme démarche ou but et la réduction comme caractéristique d'une relation qui existe de toute éternité entre deux théories. On peut d'une part chercher à reconstruire les relations entre thermodynamique et mécanique statistique en partant du postulat selon lequel la température d'un corps est *par définition*.



Angèle Kremer Marietti

Anouk Barberousse, *La physique face à la probabilité*

Paris, Librairie Philosophique J. Vrin, 2000, collection « Mathesis », 210 p.

À l'argumentation que l'on peut reconnaître comme menée de main de maître et d'une texture tissée dense, ce livre est, pour la majeure partie, consacré à l'épistémologie de la physique ; il ouvre, en effet, des perspectives fondées sur les méthodes employées dans le domaine des sciences physiques et, en particulier, dans celui de la mécanique statistique, domaine dans lequel l'auteur s'est assuré les meilleurs témoignages de notre époque.

La notion de probabilité est également abordée par Anouk Barberousse dans son sens courant ; car c'est une notion qui se présente aisément à la réflexion commune en tant que concept familier puisqu'elle est d'un usage habituel dans la pensée de la vie quotidienne. À partir de là, c'est également en tant que concept philosophique plus complexe que cette notion peut être analysée. C'est donc ce concept philosophique, plus connu que le concept mathématique, que l'auteur commence par inventorier de manière approfondie dans la première partie de cette étude très fouillée.

Du point de vue d'une analyse formelle, on peut prendre la probabilité d'un point de vue subjectif (comme la disposition à parier) ou d'un point de vue objectif (comme la mesure d'une propriété observable), selon la conception de Poincaré qui montre que la première approche est en étroite liaison avec la seconde. Carnap distingue également un double point de vue : celui de la probabilité conçue comme degré d'affirmation et celui de la probabilité associée à une fréquence relative d'événements. Mais un événement singulier peut relever également du concept de probabilité dans le cas où il s'agit d'une propriété dispositionnelle (opposée à une propriété catégorielle) et qui est liée à une situation contrefactuelle : d'où la théorie poppérienne des propensions. La théorie des degrés de croyance de Ramsey est une autre façon de comprendre la probabilité et de donner une signification aux énoncés probabilistes. Considérés d'un point de vue accessible à tous, ces « degrés de croyance » peuvent devenir des « degrés de certitude ou d'ignorance ». Des lumières nouvelles peuvent actualiser les degrés de croyance ou de connaissance, comme le permet le théorème de Bayes avec « une représentation formelle du processus d'acquisition de connaissances ou de modification des croyances » (p.32). Reste alors le problème de la détermination des probabilités antérieures, auquel E. T. Jaynes, un spécialiste de mécanique statistique, veut donner une solution : il pense que le principe d'indifférence permet de déterminer objectivement des probabilités antérieures *a priori*. Anouk Barberousse conclut la première partie de son étude en constatant que l'analyse conceptuelle « produit plus de problèmes qu'elle n'en résout » (p.37).

Un premier problème physique consiste dans l'application d'une théorie mathématique aux phénomènes naturels qui n'obéissent jamais strictement aux mêmes lois que les structures mathématiques. D'où, pour appliquer une théorie mathématique à des phénomènes naturels, la nécessité de déterminer précisément les conditions dans lesquelles elle est valable. C'est là un aspect majeur du fameux problème de Reichenbach appelé l'*Anwendungsproblem* ou problème de l'application, qui est ensuite analysé.

Le terrain d'épreuve pour tester les questions soulevées par les énoncés probabilistes est la mécanique statistique, qui fut la première théorie atomiste de la matière, et que l'auteur tente de définir selon les phénomènes de masse dont elle est la science, puis selon les points de vue de l'ergodicité et de l'irréversibilité : trois approches nullement incompatibles. Une définition peut ensuite s'exprimer : « La mécanique statistique est la théorie des mouvements des composants, des atomes, des systèmes macroscopiques » (p.72) ; c'est dire que les objets d'étude de cette science demeurent inaccessibles à l'observation. La grandeur thermodynamique qui s'impose est l'entropie : celle-ci implique d'introduire le second principe de la thermodynamique qui n'est autre que le principe d'augmentation de l'entropie (le premier étant le principe de conservation de l'énergie des systèmes isolés). La comparaison entre mécanique statistique et mécanique newtonienne montre les rapports étroits qu'elles entretiennent entre elles. La mécanique statistique a eu besoin de la thermodynamique et de l'hydrodynamique pour se constituer en tant que théorie physique ; et la mécanique newtonienne est la théorie du mouvement sous-jacente à la mécanique statistique.

Anouk Barberousse discute le réductionnisme interthéorique qui a présenté la relation de la thermodynamique à la mécanique statistique ; elle avance sa thèse selon laquelle la mécanique statistique « n'est une véritable théorie physique que *dans ses rapports* avec la thermodynamique d'une part, et la mécanique newtonienne – ou la mécanique quantique – de l'autre » (p.94). Ce qui l'entraîne à exposer les débuts de la mécanique statistique dans les représentations de Maxwell et Boltzmann, l'acte de naissance de cette science étant l'article de 1860 de Maxwell - « Illustrations of the Dynamical Theory of Gases » - suivi de deux autres articles du même auteur en 1867 et 1879. Plusieurs méthodes sont à l'œuvre : soit que les différences de procédures de calcul reposent sur des différences entre les modes de représentation, soit que les hypothèses utilisées dépendent de la considération des mouvements individuels des particules. L'usage des probabilités en mécanique statistique soulève des questions liées à deux ensembles de problèmes : 1° soit concernant la justification de l'introduction du formalisme probabiliste au sein de la mécanique newtonienne ; 2° soit concernant la signification des énoncés statistiques et probabilistes qui s'ensuivent. Les questions contemporaines sur les fondements de la mécanique statistique forment la troisième partie de l'ouvrage.

Est traitée, en première approche, la théorie mathématique de l'ergodicité, qui donne aux notions de moyenne et de probabilité la précision nécessaire du point de vue de l'ensemble de l'évolution du système. L'approche ergodique de la mécanique statistique permet d'envisager cette théorie comme un prolongement naturel de la mécanique newtonienne. La théorie mathématique des systèmes dynamiques n'utilise aucun modèle particulier pour représenter les molécules et leurs interactions : d'où une extrême généralité qui figure parmi les avantages de cette approche qui comporte néanmoins des critiques : l'incertitude, l'idéalisation non contrôlée.

La seconde approche de la mécanique statistique concerne le destin individuel des molécules et introduit le *Stoßzahlansatz* ou l'hypothèse « sur le nombre des collisions » conçue par Boltzmann en 1872. La formule de l'hypothèse est la suivante : « les fréquences relatives des vitesses de deux molécules qui sont sur le point d'entrer en collision sont *indépendantes* l'une de l'autre, ce qui fait que l'on peut facilement calculer le nombre moyen de collisions par unité de temps dans un élément de l'espace des phases » (p.159-160). De nature intrinsèquement statistique, cette hypothèse concerne les molécules d'un ensemble très nombreux ; elle appartient au cadre de la mécanique statistique « hors d'équilibre » dont la difficulté est plus grande que la mécanique d'équilibre. Un tel système hors d'équilibre est représenté par une distribution des micro-états telle qu'elle évolue de façon *irréversible* alors que les micro-états évoluent de façon *réversible* selon les lois de la mécanique newtonienne. L'équation de Boltzmann (1872) décrivant les collisions dans un système hors d'équilibre et l'hypothèse « sur le nombre des collisions » permettent de déterminer la distribution initiale des micro-états d'un système hors d'équilibre selon une stratégie consistant dans le choix d'une distribution minimisant les corrélations entre les vitesses des particules. Notons qu'actuellement on a trouvé des hypothèses moins fortes que celle « sur le nombre des collisions ».

Une troisième approche, qui est un choix méta-théorique partant d'idées de Boltzmann et Maxwell, est ensuite développée par Anouk Barberousse : celle des « ensembles de Gibbs », qui sont des constructions théoriques permettant « une nouvelle façon de faire des statistiques sur des grands ensembles de particules » (p.166). Alors, des possibilités multiples sont considérées et l'unicité du modèle n'est plus exigée.

Cet exposé des approches confirme la diversité de la mécanique statistique. Reste le problème essentiel quant à l'utilisation des probabilités en mécanique statistique. En effet, les probabilités s'appliquent-elles à des systèmes ou à des molécules ? La théorie des probabilités affecte-t-elle la notion newtonienne de trajectoire dans l'espace des phases ? En la matière, le point de vue boltzmannien est défendu par J. Bricmont développant des idées de J. Lebowitz. La question à résoudre est la suivante : devant un certain nombre de contraintes macroscopiques d'un système isolé - et qui correspondent à une infinité de micro-états possibles – sur quoi nos prédictions portent-elles ? En fait, les prédictions portent sur le comportement futur des variables macroscopiques correspondant à l'évolution de l'immense majorité des micro-états compatibles avec les contraintes initiales. Il s'agit du point de vue « classique » auquel s'oppose le point de vue de Prigogine qui veut éliminer la notion de trajectoire de la description probabiliste de la mécanique statistique. Pour Lebowitz et Bricmont, ce qu'il faut expliquer c'est qu'un système satisfaisant à certaines conditions macroscopiques initiales – elles-mêmes correspondant à une infinité de micro-états initiaux différents – obéisse toujours à des lois macroscopiques. Or, c'est en étudiant le macro-état réalisé avec une probabilité égale à 1 que nous pouvons établir des énoncés indépendants du micro-état particulier dans lequel se trouve le système (en pratique, on se contente de probabilités proches de 1). Une discussion s'impose alors à propos de la notion d'entropie, qui ne reste pas toujours la même chez Boltzmann, Clausius et Gibbs ; toutefois, dans les systèmes à l'équilibre avec des densités de particules, d'énergie et de quantité de mouvement variant lentement à l'échelle microscopique, l'entropie de Boltzmann est égale à l'entropie de Clausius et elle prend alors la même valeur que l'entropie de Gibbs. Hors d'équilibre, quelle est la notion d'entropie figurant dans le Deuxième Principe de la thermodynamique ? Lebowitz et Bricmont soulignent que « l'entropie de Gibbs *reste constante au cours du temps* » (p.175). Et on peut évaluer l'entropie de Boltzmann dans le cas particulier de gaz très dilués. Tout cela confirme qu'il faut appliquer la théorie des probabilités en mécanique statistique « à partir de la considération du volume de l'espace des phases occupé par le système étudié » selon la thèse de Lebowitz et Bricmont. À l'appui de ces positions, Anouk Barberousse invoque ensuite des investigations concrètes.

La question de l'irréversibilité clôt cet ensemble de problèmes : « À quelle échelle et par quels moyens introduire l'irréversibilité ? » (p.183). Le dilemme qui solutionne le paradoxe est explicité par Bricmont (cf. "Science of Chaos or Chaos in Science ?", 1995). Soit, pour traiter les phénomènes thermiques et hydrodynamiques, on distingue explicitement les domaines microscopiques et macroscopiques en attribuant un rôle déterminant aux conditions initiales des systèmes quand on veut rendre compte de l'irréversibilité, soit on ignore ces deux clauses. Accepter les deux clauses a pour effet de ne faire jouer aucun rôle dans l'apparition de l'irréversibilité, d'une part, aux caractéristiques de la dynamique microscopique et, d'autre part, à ses propriétés d'ergodicité et de mélange. Refuser les clauses – position de Prigogine et Stengers – implique une explication de l'apparition de l'irréversibilité qui soit valable absolument pour toutes les conditions initiales et pour toutes les fonctions possibles quelle que soit l'échelle considérée ! Or, la séparation entre les échelles est essentielle et son rôle est déterminant pour expliquer des aspects qualitatifs du comportement macroscopique irréversible, ajouté à l'hypothèse que les conditions initiales des systèmes traités soient en un état de faible entropie : entropie pouvant augmenter de façon irrésistible en accord avec le Deuxième Principe de la thermodynamique. La loi des grands nombres et l'idéalisation qui prend la limite de certaines quantités sur un intervalle de temps infini ne sont à considérer comme des raisonnements rigoureux que si, comme le souligne Bricmont, on les complète par des arguments n'entrant en contradiction ni avec l'expérience ni avec la théorie. Il est difficile d'émettre un jugement général sur la mécanique statistique qui ne soit soumis à quelque objection, la règle à suivre étant une appréciation nuancée, qu'elle soit directement théorique ou qu'elle relève des calculs mathématiques complexes.

Emergence de l'émergence. Un pont entre la physique quantique et la science macroscopique

Compléments du livre

"Pour un principe matérialiste fort" de Jean Paul BAQUIAST

Le scientifique moderne, même s'il ne pratique pas la philosophie de la connaissance, ne peut pas éviter de s'interroger sur la pertinence des modèles du monde qu'il utilise, au regard de ce que pourrait être la réalité ultime. Cette question inspire aussi l'intérêt du public pour la science et pour les nouvelles hypothèses scientifiques découlant de l'utilisation d'instruments de plus en plus perfectionnés. Pour beaucoup de gens, en dehors de ses apports utilitaires, la science telle qu'elle est traditionnellement comprise doit permettre de mieux connaître la nature profonde de l'univers, en permettant d'échapper à des descriptions métaphysiques qui ne se sont pas renouvelées depuis des siècles (mais il s'agit sans doute nous allons le voir d'une illusion qui relève d'une nouvelle sorte de métaphysique)

C'est la physique qui apporte le plus d'ouvertures sur ce que pourrait être l'univers. Mais malheureusement, pour ceux qui voudraient obtenir de la science une description aussi simple et homogène que possible de la réalité, la physique semble proposer des solutions différentes, sinon contradictoires. Nous l'avons rappelé, depuis le début du XXe siècle, elle s'est divisée en trois branches également fécondes, la cosmologie qui traite de l'univers dans son entier, la physique des particules élémentaires ou microphysique qui étudie les constituants ultimes de la matière et la physique de la matière macroscopique, aux multiples applications technologiques et industrielles. Toutes aujourd'hui, y compris la physique macroscopique, doivent tenir compte des observations de la physique quantique. Mais comment la physique macroscopique et plus généralement les sciences macroscopiques, qui travaillent sur des modèles à l'échelle de nos sens ordinaires, peuvent-elles établir un pont épistémologique avec la physique quantique ?

Ce pont nous paraît aujourd'hui devoir être fourni par le concept d'émergence. Celui-ci était jusqu'ici réservé aux sciences cognitives et aux sciences de la vie, dites aussi sciences de la complexité, qu'elles soient biologiques ou artificielles. Il n'intéressait que peu de chercheurs. On peut considérer, nous semble-t-il, que le physicien Robert Laughlin (Robert Laughlin. *A Different Universe* 2005) , précité, représente bien la génération de ceux que l'on pourrait appeler les militants de l'émergence, grâce à qui le concept est devenu indispensable.

De quoi s'agit-il ? Pour un nombre croissant de physiciens, la physique théorique, à elle seule, n'est pas capable d'expliquer la génération de complexité correspondant à l'apparition de la vie ou des grands systèmes cognitifs collectifs propres aux sociétés humaines modernes. Il faut trouver un autre paradigme explicatif. Depuis les travaux fondateurs de Stuart Kauffman (Stuart Kauffman. *At Home in the Universe, the Search for Laws of Complexity and Organisation*, 1996), on sait aujourd'hui que ce paradigme existe, c'est celui de l'émergence. Il peut être formulé d'une façon qui d'ailleurs n'est simple qu'en apparence :le Tout ne peut être déduit des parties. En forçant le trait, on dira que la théorie de l'émergence prend acte de l'échec de la pensée scientifique traditionnelle, analytique et mathématique, pour représenter le complexe. L'émergence n'explique pas tout, loin de là. Elle ne permet pas en général de comprendre pourquoi tel phénomène complexe apparaît. A fortiori elle ne permet pas de prévoir comment évoluera ce phénomène. Elle permet seulement d'affirmer que cette apparition n'est pas due à un miracle mais qu'elle relève d'un processus physique. Elle est un peu comparable en cela à la théorie de la sélection darwinienne en biologie (Voir chapitre 2.). La diversification des espèces s'explique en général par la sélection darwinienne, mais le détail de celle-ci comme la façon dont l'évolution se poursuivra à l'avenir ne peuvent être explicités par ce principe général. Ils ne peuvent qu'être constatés a posteriori.

Au plan d'une vision générale sur l'Univers, la théorie de l'émergence ne permet pas de comprendre immédiatement pourquoi le monde est ce qu'il est et moins encore ce qu'il deviendra. Elle permet juste de comprendre qu'aucune théorie réductionniste, fut-elle très détaillée, ne permettra jamais d'analyser et reproduire la complexité du monde. Mais en vérité elle fait beaucoup plus. Elle oblige à ouvrir les yeux sur des problèmes non résolus, voire insolubles en l'état, ce qui aura le grand avantage d'éviter que leur soient données de fausses solutions. Parmi ces problèmes non résolus se trouvent les mécanismes eux-mêmes qui permettent l'émergence. Rien ne dit qu'ils seront un jour explicités par la science. Sont-ils généraux ou propres à tel ou tel domaine de la matière et de la vie ? On ne peut le dire encore. Mais il n'est pas interdit qu'à force de travail et en évitant les fausses bonnes solutions, on puisse en faire progressivement apparaître quelques-uns.

La théorie de l'émergence relève en effet du domaine scientifique. Elle ne se borne pas à constater l'hétérogénéité ou la non-prédictabilité des phénomènes, ce qui n'aurait aucun intérêt pratique – ou laisserait le champ libre au surnaturel. Lorsque le scientifique constate l'apparition d'un phénomène émergent, il a tout à fait le droit de l'étudier, en faire la typologie, l'incorporer au corpus des connaissances du moment. Il ne dira pas que le phénomène émergent révèle la réalité en soi du monde, il dira seulement qu'il s'intègre à l'ensemble des relations établies ici et maintenant entre un réel inconnaissable en essence, des instruments permettant de générer des phénomènes nouveaux et des esprits humains générateurs de systèmes de représentation symbolique. Dans cette perspective, le scientifique se doit d'être d'abord un expérimentateur instrumentaliste, aux yeux ouverts. C'est en effet en observant les phénomènes inattendus générés par le fonctionnement des appareils traditionnels ou nouveaux qu'il peut identifier des émergences pouvant expliquer ces phénomènes. Il ne prétend pas en faisant cela accéder à une quelconque réalité en soi, à un quelconque univers fondamental. Il se borne à dire qu'il construit une réalité relative à lui et à ses observations, s'inscrivant momentanément et parfois localement dans le devenir de la société scientifique humaine, qui constitue elle-même une émergence plus globale.

Le physicien Robert Laughlin s'est principalement intéressé, au cours de sa carrière, à ce que l'on pourrait appeler les états ou propriétés émergentes de la matière, lorsque celle-ci est soumise en laboratoire à des conditions extrêmes. L'exemple classique en est la superconductivité, déjà citée, grâce à laquelle des métaux conducteurs de l'électricité n'opposent plus de résistance au courant lorsqu'ils sont convenablement refroidis. Ce qui a frappé Robert Laughlin est qu'il est généralement impossible de prévoir les résultats d'une expérience lorsque les conditions de celle-ci s'écartent un tant soit peu des normes jusque-là pratiquées. L'effet Hall quantique ([voir ci-dessous](#)) dont il a assuré la formulation théorique, ce qui lui a valu le prix Nobel, partagé avec ses deux collègues, a ainsi été découvert par hasard. Selon lui, aucune recherche a priori n'aurait pu aboutir à ce résultat, car nul esprit humain n'aurait été capable de l'imaginer. Pourtant, l'effet Hall quantique est aujourd'hui à la source de très nombreuses applications scientifiques et industrielles. L'observation initiale a été rendue possible par la conjonction, à un certain moment et en un certain lieu, d'un instrument produisant des résultats inattendus et d'esprits humains suffisamment alertes pour s'étonner de ces résultats et chercher à les comprendre. Il en est de même, selon lui, de toutes les découvertes importantes de la physique moderne. On voit que pour lui, l'émergence se produit à partir des composants primaires de la nature, inconnus de nous, et elle intéresse toutes les structures associant la matière et l'énergie. Elle ne concerne donc pas seulement les phénomènes biologiques ou leurs modèles informatique tels les automates cellulaires (Voir chapitre 5. Un monde artificiel bientôt plus vrai que nature.), comme on le croit souvent. Cependant, pour le grand public, c'est évidemment en biologie et en anthropologie que le phénomène de l'émergence est le plus visible et le moins discuté.

Robert Laughlin n'ignore évidemment rien de la mécanique quantique, dont il a eu en permanence à appliquer les principes ou les résultats dans ses propres travaux. Il a lui-même été surnommé le Robert Feynman de sa génération. Mais pour lui comme pour la plupart des physiciens, la mécanique quantique ne permet pas de comprendre l'univers en profondeur, et moins encore d'agir sur lui. Elle permet juste d'interpréter un certain nombre des phénomènes nouveaux que révèle le développement des instruments et des expériences, par exemple au sein des accélérateurs de particules. Le monde quantique, dans ses profondeurs, est et restera pour lui inconnaissable. C'est ainsi que parler de vide quantique représente

simplement une façon de désigner quelque chose d'inconnaissable, sous-jacent à la réalité matérielle, dont on constate seulement telle ou telle manifestation dans telle ou telle expérience. De même les particules qui émergent du vide quantique ne sont ni des ondes, ni des particules ni les deux à la fois. Elles sont définitivement autre chose. Ceci ne nous empêche pas de les utiliser, dans certaines conditions.

Robert Laughlin n'ignore pas plus la cosmologie que la physique quantique. Mais là il se sépare profondément des travaux des cosmologistes théoriciens. Pour lui, toutes les hypothèses visant à décrire de façon réaliste les états passés, présents et futurs de l'univers relèvent non seulement de la science fiction mais d'une méconnaissance profonde de ce qu'est selon lui l'univers, c'est-à-dire le produit d'une émergence. Il s'en prend particulièrement à la Théorie du Tout, qui prétendrait trouver une équation unique à partir de laquelle on pourrait déduire toutes les autres formes de connaissances. Cette ambition, triomphe du réductionnisme, selon laquelle les lois des mécanismes élémentaires permettent de déduire la loi du système complexe, ignore dramatiquement, selon lui, la théorie de l'émergence.⁽¹⁾

Pour comprendre les grands systèmes auxquels nous avons affaire dans la nature, il n'est pas nécessaire de connaître les lois qui régulent leurs composants microscopiques, mais seulement les principes d'organisation collective qui permettent leur apparition. Plus généralement, ce ne sont pas les lois des parties qui expliquent l'émergence de l'organisation, mais plutôt cette dernière qui donne un sens et des lois aux parties. Cela signifie notamment qu'il est illusoire de prétendre que la connaissance des lois élémentaires, intéressant par exemple les particules quantiques et les processus chimiques à l'œuvre dans la nature, suffiront à décrire et prédire exhaustivement l'ensemble du monde auquel nous avons affaire. On reprend là le combat jamais clos contre les prétentions du réductionnisme du démon de Laplace ⁽²⁾ à pouvoir nous dire de quoi est fait le monde et vers quoi il va. Certes, comme tous les scientifiques, Robert Laughlin reconnaît ne pas pouvoir éviter d'être réductionniste, c'est-à-dire rechercher d'abord d'éventuelles causes élémentaires ou premières aux phénomènes encore incompris. Mais il refuse les abus du réductionnisme, conduisant à penser qu'aujourd'hui la science a tout compris et n'a plus rien de profond à découvrir.

Les systèmes complexes, comme les événements météorologiques, sont régulés par les lois de leurs composants microscopiques (en l'espèce les atomes des molécules d'eau) mais dans le même temps leurs aspects les plus sophistiqués sont insensibles à ces lois et parfois même en contradiction avec elles. L'organisation en ce cas prend le dessus sur les parties et les transcende. Le concept d'organisation ne désigne pas seulement un principe théorique mais un phénomène du monde physique, aussi « réel » que les phénomènes microscopiques. Cela s'applique évidemment aussi aux êtres vivants et à l'homme lui-même. Tous les systèmes physiques étudiés par la science découlent de mécanismes d'organisation collective, et pas seulement les plus complexes. Il est illusoire de distinguer des lois fondamentales dont découleraient des lois subordonnées. Cela entraîne la conclusion que la prétention consistant non seulement à identifier ces lois fondamentales, mais à leur donner une formulation mathématique qui permettra ensuite de représenter par des équations les systèmes émergents à base d'organisation est également une illusion. Ce point de vue n'est pas partagé par tous. Nous le verrons dans le chapitre 2 en présentant les travaux de chercheurs visant à élaborer une théorie générale de la vie.

Il en résulte que la recherche des lois physiques, à quelque niveau qu'elle se fasse, ne peut se faire par la seule déduction, ni même par induction (Exemple de déduction : les quadrupèdes ont 4 pattes. Cet animal que je rencontre n'en a que 3. J'en déduis (déduction fautive) qu'il s'agit d'un représentant d'une espèce vivante inconnue – ou bien alors (déduction vraie) qu'il a subi une amputation.)

- Exemple d'induction : l'homme dispose d'un cerveau qui le rend apte à l'intelligence. J'en induis que le singe, qui dispose aussi d'un cerveau, devrait être également apte à l'intelligence. Selon les définitions que l'on donnera de celle-ci, l'induction se révélera soit fautive, soit très fructueuse. On parle de plus en plus aussi d'abduction, qui consiste à formuler des hypothèses de très grande ampleur, pouvant conduire à des théories très générales. On ne confondra pas ce type d'abduction avec l'abduction ou enlèvement temporaire dont plus d'un million d'américains prétendent avoir été victimes du fait d'extra-

terrestres. Elle doit faire appel à l'expérimentation, seule à même de faire apparaître les phénomènes complexes d'organisation que l'on serait conduit à ne pas voir en s'en tenant aux explications par les lois élémentaires. Mais encore faut-il expérimenter avec une grande ouverture d'esprit. Comment acquérir celle-ci ? Il faudrait commencer par se persuader que le monde est empli de choses pour le moment incompréhensibles, à commencer par nous-mêmes. La science doit nous aider à les comprendre en nous mettant, grâce à la force brute de l'expérimentation, elle-même constamment rendue plus efficace grâce à l'évolution technologique, en présence de phénomènes que nous n'avons pas vus jusqu'ici et qu'il nous faudra bien introduire dans notre représentation générale du monde. Mais ce n'est pas pour autant que tout s'éclaircira.

Vivre avec l'incertitude

Les biologistes et les chercheurs en sciences humaines admettent que l'incertitude est inséparable de leurs représentations de la nature. On ne peut jamais prédire exactement, en s'appuyant sur les lois censées réguler les composants biologiques ou psychologiques, la façon dont se comportera un système associant plusieurs de ces composants. Cela se manifeste à tous les niveaux d'organisation du vivant, de la molécule biologique à l'homme. Par contre, pour les physiciens du monde macroscopique, il importe d'éliminer l'incertitude, laquelle ne peut découler que d'expérimentations insuffisantes. Cela les conduit à procéder à des mesures de plus en plus précises. Faire apparaître des erreurs de mesure conduit logiquement à remettre en cause une théorie jusque là admise. Mais le fait d'obtenir une très grande précision dans la mesure ne doit pas conduire à penser que le phénomène est définitivement décrit et maîtrisé. Ainsi la physique contemporaine repose sur la connaissance de ce que l'on appelle des constantes universelles. Il s'agit en réalité d'expériences donnant un résultat universel. Il en existe dix à vingt, telle la vitesse de la lumière dans le vide. Mais le caractère apparemment universel de telles expérimentations est un piège. Il conduit à faire penser que ces constantes ont mis en évidence les briques primitives à partir desquelles est construite la réalité.

Pour Robert Laughlin, si la vitesse de la lumière apparaît constante aujourd'hui, ce ne serait pas parce que la lumière serait une composante élémentaire de l'univers. Prendre en considération les phénomènes d'émergence montre que cette constante elle-même résulte d'un phénomène d'organisation sous-jacent. La lumière pourrait être le produit d'une émergence. Fondamentalement, derrière les constantes, on peut retrouver si on s'en donne la peine l'incertitude et l'inconnu. Toutes les constantes dites fondamentales requièrent un contexte environnemental organisationnel pour prendre un sens. La réalité quotidienne est un phénomène d'organisation collective, se traduisant par des « vérités » statistiques ou probabilistes (ce qu'ont dit depuis longtemps les biologistes comme les physiciens quantiques). On peut pour des besoins pratiques, dans le monde quotidien, décrire les objets macroscopiques comme des constructions d'atomes situés dans l'espace-temps newtonien, mais l'atome isolé n'est pas newtonien. Nous avons vu dans la section précédente que c'est une entité quantique « éthérée » manquant de la première des caractéristiques du monde newtonien, la possibilité d'être définie par une position identifiable. Cela apparaîtra non seulement dans les expériences de la physique quantique, mais dans les expériences de la physique des matériaux et des états de la matière intéressant la vie quotidienne. Les physiciens s'intéressant aux phénomènes macroscopiques doivent donc eux aussi apprendre à gérer l'incertitude née de l'émergence, considérée comme un aspect incontournable de toute « réalité » et la voie permettant d'accéder à de nouvelles découvertes.

Cela s'applique à la physique quantique, notamment au processus de la mesure. Nous avons indiqué plus haut qu'il faut se garder de la tentation d'expliquer par des termes du langage courant, masquant l'irréductibilité du monde quantique sous-jacent, des phénomènes comme l'intrication. La matière quantique n'est pas faite d'une superposition d'ondes et de particules, comme on le dit souvent. Elle est faite ni d'ondes ni de particules, mais de quelque chose de différent, qu'il faut se résoudre à qualifier d'« autre chose » sans chercher à en définir l'essence. Mais cela n'empêche pas d'utiliser la fonction d'onde pour représenter l'entité quantique avec la précision nécessaire aux applications de plus en plus nombreuses requises par la technologie moderne.

Qu'est ce que l'Effet Hall quantique, théorisé par Robert Laughlin, travail qui lui a permis d'obtenir le Prix Nobel?

Qu'est-ce d'abord que l'effet Hall?

La découverte remonte à 1879 lorsque le physicien américain Edwin Herbert Hall, étudiant en thèse du professeur Rowland de l'université Johns Hopkins de Baltimore, plaça une feuille d'or dans un champ magnétique et lui appliqua un courant électrique.

Il observa alors une tension perpendiculaire à la direction du courant et à celle du champ magnétique. Cette tension transverse, dite tension de Hall V_H , résulte de la force de Lorentz F_L qui dévie la trajectoire des électrons vers un bord de la feuille, entraînant une accumulation de charges négatives sur ce bord, un excès de charges positives sur l'autre bord, et l'apparition d'un champ électrique E .

L'équilibre est atteint lorsque la force électrique F_E , due au champ de Hall, compense la force de Lorentz. Une tension V_H , perpendiculaire au courant I , peut être alors mesurée. Celle-ci est proportionnelle à la densité de flux magnétique B , alors que la tension longitudinale V_{xx} , liée aux processus classiques de diffusion des électrons dans le métal, reste faible et constante en présence d'un champ magnétique. La tension de Hall V_H , ou la résistance de Hall R_H , est une grandeur intéressante à mesurer dans le domaine de la magnétométrie.

Cette mesure présente aussi un grand intérêt dans la caractérisation des semi-conducteurs au cours de leur élaboration. La mesure de V_H donne en effet accès aux paramètres principaux d'un semi-conducteur, à savoir la nature des porteurs (électrons ou trous), leur densité n et leur mobilité μ .

L'Effet Hall possède des utilisations dans des domaines variés et très différents.

Par exemple, il est utilisé dans les gaussmètres, les ampèremètres, les wattmètres, les moteurs à courant continu, les multimètres analogiques, les compas magnétiques et de nombreux autres instruments et dispositifs. Ceci sous forme de sonde à Effet Hall, qui est une sonde magnétique utilisant l'effet Hall et dont la réponse est proportionnelle au champ magnétique.

L'effet Hall quantique

L'effet Hall quantique est observé sous certaines conditions:

- le mouvement des électrons doit être restreint de telle manière qu'ils ne puissent se mouvoir que dans un "flatland" à deux dimensions. Cela peut être accompli en confinant les électrons dans une couche extrêmement fine d'un semi-conducteur, ainsi les transistors à effets de champ de types MOSFET sont un terrain d'exploration très fructueux.

- la température doit être très basse (aux alentours de 4.2 K ou en dessous).

- un champ magnétique très intense (de l'ordre de 10 Tesla) doit être utilisé.

Le champ magnétique, appliqué perpendiculairement à la couche de semi-conducteur, produit la tension transversale de Hall, V_H , comme pour l'effet Hall ordinaire. Le rapport entre V_H et le courant est la résistance de Hall.

Toutefois, à certaine valeur de température, la conductivité et la résistivité du solide tombent à zéro, comme dans le cas des supraconducteurs. Le graphique de résistance de Hall en fonction de B fait

apparaître des marches, qui correspondent aux valeurs pour lesquelles la conductivité vaut zéro. R_{xx} et R_{xy} sont respectivement la résistance longitudinale et transversale

L'effet Hall quantique (EHQ) est observé à très basse température (<1 K) dans un gaz électronique à deux dimensions de haute mobilité ($\mu > 2$ T⁻¹), soumis à un fort champ magnétique perpendiculaire au plan de conduction. Un gaz électronique bidimensionnel peut par exemple être réalisé dans un transistor MOSFET ou dans une hétérostructure en GaAs/AlGaAs. Si l'on mesure la résistance de Hall en fonction de la densité de flux magnétique B dans ces conditions expérimentales, des plateaux de résistance constante apparaissent. La résistance de Hall R_H est quantifiée sur ces plateaux et la relation $R_H = h/i-e^2$ s'applique, i étant un nombre entier.

La résistance h/e^2 est également appelée constante de von Klitzing R_K . La résistance longitudinale de l'échantillon révèle un comportement oscillatoire marqué (effet Shubnikov de Haas). Les plateaux de résistance Hall coïncident avec des minima étendus de la résistance longitudinale. Aux plus basses températures, la résistance dans ces minima devient infiniment petite et ne peut plus être mesurée. Par conséquent, pour le zéro absolu de température au moins, le transport de courant à travers l'échantillon s'effectue sans perte.

Application métrologique

L'effet Hall quantique est utilisé par la plupart des Instituts nationaux comme résistance étalon primaire depuis le 1er janvier 1990. A cette fin, le Comité international des poids et mesures (CIPM) a fixé la constante de von Klitzing R_K à une valeur de $R_K-90 = 25812.807 \Omega$, soit la meilleure valeur possible pour l'état des connaissances à l'époque de la détermination. L'incertitude relative de cette constante dans le SI est d'environ 2×10^{-7} et est ainsi deux ordres de grandeur supérieure à la reproductibilité basée sur l'effet Hall quantique. L'incertitude au sein du SI n'a cependant d'importance qu'en cas de combinaison d'unités électriques et mécaniques.

Un pont de mesure de résistances de haute précision permet de comparer des résistances étalons traditionnelles (100Ω et 10Ω) à la résistance de Hall quantique et par-là même de les étalonner de manière absolue. Ces résistances étalons servent dans une étape ultérieure d'étalons de transfert pour étalonner des étalons de clients. La structure de mesure mise en place par METAS permet de comparer une résistance étalon à la résistance de Hall quantique avec une précision relative de 1×10^{-9} (3). Cette incertitude de mesure a été confirmée en novembre 1994 lors de la comparaison directe avec l'étalon de Hall quantique transportable du BIPM.

L'effet Hall quantique intégral est dû, (en partie seulement), à la présence d'un gap d'énergie (celui entre les niveaux de Landau). Pour expliquer l'effet Hall quantique fractionnaire, il est essentiel de considérer l'effet des interactions coulombiennes entre électrons. Dans ce cas, c'est l'ensemble du gaz d'électrons qui doit être décrit par une fonction d'onde (une fonction d'onde à N particules). L'étude des deux effets Hall quantiques est un domaine de recherche très actif de la physique de la matière condensée où sont introduites des idées comme les charges électriques fractionnaires, les anyons, les excitations topologiques (skyrmions et mérons), les états de bords, etc.

L'effet Hall quantique est aujourd'hui un défi pour la physique théorique. De façon surprenante, des structures mathématiques riches ont pu être dégagées des résultats expérimentaux. De la même manière que la spectroscopie a influencé le développement de la mécanique quantique, ces structures sont des guides incontournables pour la modélisation et la compréhension de ce phénomène.

1 : Observons que dans la vie de tous les jours, nous sommes constamment en présence de l'émergence, ceci sans l'avoir théorisée. L'observateur politique qui cherche à pronostiquer l'avenir de la constitution européenne, par exemple, sait bien qu'il ne pourra rien pronostiquer de solide. Il sera obligé d'attendre que l'Europe institutionnelle émerge de la confusion apparente des événements politiques pour

pouvoir commencer à l'étudier. Certains physiciens ont fait la même observation à propos des concepts de superposition d'état ou d'intrication évoqués ci-dessus. Constamment, dans la vie quotidienne, nous nous trouvons personnellement en superposition d'état : à la fois assis à notre table de travail et rêvant à mille choses différentes. De même, les couples amoureux ou les équipes soudées donnent de bons exemples d'intrication. On objectera qu'il ne s'agit pas des mêmes phénomènes que ceux désignés par la physique quantique. C'est vrai... ou est-ce vrai ?.

2 : Le physicien français Pierre Simon Laplace (1749-1827) a réalisé des travaux remarquables en astronomie et en mathématiques. Déterministe convaincu, il était persuadé qu'avec une bonne théorie et en connaissant les données de départ, un démon imaginaire pourrait calculer tous les développements d'un système, fut-il aussi compliqué que l'univers. Laplace avait également expliqué à Napoléon médusé qu'il n'avait pas besoin de Dieu dans ses équations. Aujourd'hui, on sait qu'un tel déterminisme mathématique ne peut être utilisé que dans un nombre de cas limité. On le remplace par le déterminisme statistique s'appliquant aux grands nombres. Il n'est donc pas nécessaire de réintroduire Dieu dans les équations.

3 : Hypothèse de l'inflation cosmologique. Dans les premiers instants de la vie de l'univers, celui-ci aurait subi une énorme augmentation de taille. Celle-ci expliquerait pourquoi aujourd'hui il nous apparaît illimité dans l'horizon visible. Cette hypothèse, qui explique beaucoup de choses, semble aujourd'hui de plus en plus contestée. Elle paraît vraiment conçue, selon l'ancienne expression, pour sauver les apparences. On en saura davantage après le lancement de la sonde européenne Planck, vers 2010/2012, destinée à mesurer de façon plus précise qu'actuellement les anisotropies ou différences dans le rayonnement micro-onde à 4° résultant du Big Bang.