

Sur le réductionnisme en physique

Claude Aslangul

(LPTMC - Université Pierre et Marie Curie)

VI^{es} Rencontres de physique de l'infiniment grand à l'infiniment petit

Orsay, 12 juillet 2016

Sans souci de discuter pour eux-mêmes les fondements théoriques du réductionnisme, le but est de montrer comment, s'ils sont tous réductionnistes dans l'âme, les physiciens adoptent une position pragmatique et nuancée prenant en compte dès le départ la nature du problème étudié. Sans bien sûr nier l'existence de lois fondamentales, ils en viennent ainsi à considérer différents plans de description suggérés par l'expérience et/ou par des impossibilités pratiques. C'est ainsi qu'apparaissent des concepts de nature émergentiste venant prendre leur place dans la définition précise d'un modèle où les bonnes échelles physiques jouent le rôle de juges de paix pour éliminer les grandeurs non pertinentes ou résoudre les difficultés techniques artificielles.

1 Introduction

L'idée fondatrice du réductionnisme¹ préside à la volonté de décrire et d'expliquer le complexe à partir de lois ou d'événements plus élémentaires, en quelque sorte d'accepter le principe suivant lequel *le tout est la somme*² *des parties* et fonctionne suivant la relation de cause à effet à partir d'objets (théories, lois, phénomènes) acquérant *ipso facto* un caractère réputé *fondamental* au sens étymologique du terme ce qui, aux yeux de certains, leur confère une supériorité ontologique. Cela étant dit, on peut admettre *a priori* que le réductionnisme puisse concerner toutes les disciplines, qu'il s'agisse de sciences dures ou de sciences sociales ou de sciences humaines, tout en étant conscient du fait que dans certains cas, le débat ne pourrait que reposer sur des présupposés idéologiques, formulés ou non.

Une fois cette problématique posée, il convient de définir une hiérarchie fondée sur la relation précise permettant d'affirmer qu'une théorie E est *réductible* à une autre G , c'est-à-dire que G est susceptible de s'exprimer de façon plus "élémentaire" dans les termes de E – on dirait plus communément que E est une généralisation de G , et/ou que G s'obtient en effectuant une certaine limite de E . Le premier exemple venant à l'esprit est évidemment la relativité de Galilée comparée à celle d'Einstein, mais on pourrait aussi citer, quoique la

¹ Selon Larousse, le réductionnisme est une "tendance qui consiste à réduire les phénomènes complexes à leurs composants plus simples et à considérer ces derniers comme plus fondamentaux que les phénomènes observés".

² Le mot *somme* n'est pas forcément le plus heureux, et on a envie de le remplacer par *réunion*... mais pour les probabilistes, n'y a-t-il pas identité entre \cup et $+$?

correspondance est bien plus subtile, la mécanique classique et la mécanique quantique ; en ce sens, on peut dire que la *réduction* est quelque peu synonyme de *généralisation*, ces deux mots étant connotés respectivement de façon péjorative et méliorative. En tout cas, une fois clairement posé(s) le(s) critère(s) permettant d'affirmer qu'une théorie T_1 est réductible à T_2 , il est possible par transitivité d'envisager une chaîne de théories réductibles les unes aux autres de proche en proche, chaîne contenant un nombre quelconque de maillons mais bornée en direction de l'élémentaire par l'état des connaissances à l'instant considéré.

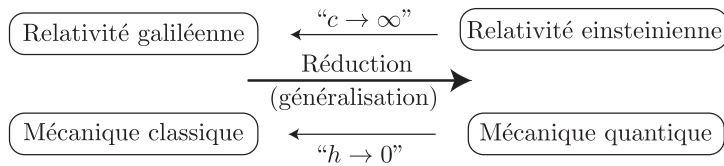


Figure 1: Deux exemples de réduction (généralisation).

Cette hiérarchie à définir constitue l'un des fondements théoriques du réductionnisme, lesquels peuvent être discutés pour eux-mêmes et conduisent d'ailleurs à considérer diverses formes de réductionnisme : fort/faible, homogène/hétérogène, horizontal/vertical, classification que je ne discuterai pas et qui n'est d'ailleurs pas toujours dénuée d'ambiguïtés. Juste pour l'exemple, la question de poser les critères permettant de savoir si une théorie est ainsi réductible à une autre est elle-même l'objet de maintes discussions. Depuis les années 1920, il semble que trois modes de réduction principaux ont été considérés :

1. Une théorie G se réduit à une théorie E quand tout ce qui est vrai dans G a été traduit dans le langage de E .
2. Une théorie G se réduit à une théorie E quand toutes les lois de G ont été déduites de celles de E .
3. Une théorie G se réduit à une théorie E quand toutes les observations expliquées par G sont aussi expliquées par E .

Les trois modes de réduction ci-dessus sont caractérisés par trois modèles : le *modèle de traduction*, le *modèle de déduction* et le *modèle d'explication*. Chacun d'entre eux a été abondamment discuté³, commenté et critiqué ; la question ici n'est pas de revenir sur la théorisation du réductionnisme, qui constitue un débat en soi se situant plutôt sur le terrain de la philosophie et de l'épistémologie posant *in fine* le problème de l'*unité* de la science – voire de la connaissance.

Si *a priori* toutes les disciplines peuvent en effet être concernées par la question du réductionnisme, je ne discuterai ici que des sciences dures et plus particulièrement de la physique⁴ – me bornant à mentionner tout juste les mathématiques ici et là – mais on pourrait bien sûr considérer la chimie et la biologie moléculaire, par exemple. En tout cas, il ne sera nullement

³ Pour une synthèse, voir <http://www.iep.utm.edu/red-ism/>.

⁴ On vient de mentionner sans l'explicitier le lien entre le réductionnisme et l'unité de la science. S'agissant plus particulièrement de la physique, je me dois de renvoyer au livre d'Étienne Klein, "*L'unité de la physique*" (PUF, Paris, 2000).

question d'économie, de médecine, de neurosciences ou d'éthologie pas plus que de philosophie, de psychologie ou de psychanalyse – et encore moins de débattre d'un point qui pourrait sembler primordial : faut-il être pour ou contre le réductionnisme ? Posée aussi brutalement, la question ne manque d'ailleurs pas d'équivoque. En tout cas, si cette dernière alternative a un sens manifeste sur le plan philosophique, elle peut sembler évanescence quand elle est posée à propos de sciences dures : on serait tenté de croire que, de nos jours, les physiciens adhèrent tous au projet réductionniste – la question en pratique de l'accomplir et de le quantifier étant une tout autre entreprise – mais l'affaire est plus délicate qu'il n'y paraît, comme l'a subtilement montré Anderson dans un article célèbre⁵ où il présente des arguments montrant les limites du réductionnisme – pour ne pas dire ses faillites, en raison de sa stérilité – et l'existence d'une hiérarchie de la science dont chaque niveau exige ses principes spécifiques fondamentaux afin d'assurer son propre développement. Je reviendrai sur les idées d'Anderson dans la deuxième partie de cet exposé.

Même réduite à la physique et acceptée, la démarche délibérément réductionniste est visiblement sans fin, ressemblant à une plongée toujours plus profonde vers l'infiniment petit. Que l'on se souvienne de la longue marche pour que l'atomisme triomphe (fin du XIX^e siècle), première étape nécessaire pour que la structure de l'atome s'impose comme une question à élucider ; la mise en évidence du noyau atomique – grâce aux expériences de Rutherford (~ 1912) – ne fut à son tour qu'une étape, et souleva d'autres questions conduisant à la découverte des nucléons (neutrons et protons⁶) pour en arriver finalement à l'introduction des *quarks* peu après 1960 et à la situation actuelle où l'on distingue d'une part les particules élémentaires (quarks, photon, électron,...) et celles qui ne le sont pas – classification reposant d'ailleurs sur la conception tenace d'une nature *corpusculaire* de ces objets alors que l'on sait bien qu'il s'agit d'une métaphore dont Schrödinger disait⁷ en d'autres temps, à propos de la soi-disant *dualité onde-corpuscule*, “[il s'agit d'] images que nous sommes obligés de garder toutes les deux parce que nous ne savons pas encore comment nous en débarrasser”. Quoi qu'il en soit, toute l'histoire de la physique incite à la réserve et à ne pas croire que ce qui est déclaré *fondamental* aujourd'hui le sera encore demain.

Cette même quête sans fin existe aussi en mathématiques, qui est sans doute la discipline où le réductionnisme le plus radical semble pourtant constituer l'âme de la discipline : arriver à construire un *corpus* théorique en se donnant le moins possible d'axiomes ou de postulats, voire à mettre au premier plan – au-delà des objets familiers (nombres, figures géométriques...) – la notion de *structure*. Il semble que ce fut l'idée directrice présidant à la formation du groupe *Bourbaki* au milieu des années 1930 sous l'impulsion d'André Weil, avec l'objectif d'unifier les mathématiques et, semble-t-il, de réduire la prééminence de l'analyse jugée insatisfaisante en raison de sa rigueur jugée souvent déficiente. L'influence considérable des travaux de Bourbaki mais aussi les critiques dont ils furent l'objet montrent à quel point la notion de réductionnisme peut être prégnante tout en étant le sujet d'un débat dans une discipline où, peut-être, on l'attend le moins en raison de sa nature quelque peu platonicienne attribuant aux objets une existence objective, inaliénable et indépendante de l'esprit humain.

La discussion suivante est structurée en trois parties. Dans la première, je me situerai sur un plan que l'on peut qualifier de *théorique* au sens où, quoiqu'essentiellement restreinte à la

⁵ Philip Warren Anderson, “*More Is Different*”, *Science* **177**, 393 (1972).

⁶ La taille du proton peut être déterminée par des mesures spectroscopiques très fines sur l'atome d'hydrogène muonique (Aldo Antognini et al., “*Proton Structure from the Measurement of 2S-2P Transition Frequencies of Muonic Hydrogen*”, *Science* **339**, 417 (2013), <http://science.sciencemag.org/content/339/6118/417.full.pdf+html>) ; on trouve ainsi que le rayon (de charge) du proton est environ 0.841 fm.

⁷ *Mémoires sur la mécanique ondulatoire* (J. Gabay, Paris, 1988), p. XIV.

physique, la question sera examinée dans l'absolu, sans chercher à la rattacher à des contingences liées à la pratique de l'analyse qualitative ou quantitative d'un problème donné. Dans la seconde partie, glissant sur le plan pragmatique, j'examinerai les implications nécessaires lorsqu'il s'agit de passer à l'action à propos d'une question précise où la seule pratique féconde consiste d'abord dans le choix de la bonne méthodologie puis de construire une simplification de la réalité débouchant sur un *modèle*. Enfin, j'essaierai de montrer par l'exemple comment la notion d'*échelles caractéristiques* est un concept essentiel dans l'activité du physicien, lui permettant de progresser en toute confiance dans un domaine déterminé sans cependant renier sa croyance en l'existence d'une vérité plus ultime mais sans utilité pour la question qui est posée. Essentiel, ce concept est aussi unificateur par la relation qu'il établit entre deux disciplines majeures trop souvent dissociées, les mathématiques et la physique.

2 Sur le plan théorique

Comme annoncé plus haut, je n'évoquerai pas les sciences sociales ou humaines mais il convient toutefois de mentionner l'existence d'un réductionnisme global dit *physicaliste* (appelé *physicalisme*) qui considère que toute forme de complexité, quelle qu'en soit la nature, peut être rattachée de proche en proche au niveau le plus fondamental que la physique autorise à définir. Par exemple, selon Oppenheim et Putnam⁸, on peut introduire une hiérarchie à six niveaux :

Groupes sociaux → êtres vivants → cellules → molécules → atomes → particules élémentaires

la question étant finalement, et schématiquement, d'envisager la possibilité de comprendre la dynamique d'un groupe social en connaissant tout de la physique des particules... Il est clair que chacune des flèches ci-dessus entend symboliser sans le préciser un édifice complexe de lois permettant de comprendre les rapports et les relations de cause à effet à l'intérieur de et entre les ensembles ainsi mis en filiation.

Sans se prononcer pour l'instant sur le bien-fondé d'une telle problématique, deux questions (au moins) se posent. La première est de se demander pourquoi la chaîne ci-dessus commence par les groupes sociaux, qui ne sont apparus qu'à un stade avancé de l'évolution ; on pourrait aussi remonter aux organismes unicellulaires, puis pourquoi pas à l'apparition de la vie, à la formation de la Terre et du système solaire et, de fil en aiguille, en arriver au *Big Bang*.

La deuxième question est au fond de même nature : le maillon origine étant fixé plus ou moins arbitrairement comme ci-dessus, doit-on *réellement* envisager de pouvoir relier toutes les étapes ainsi dûment précisées ? Il ne saurait y avoir une seule réponse car toutes les réponses possibles résultent d'une sorte d'acte de foi qui, en tant que tel, ne peut se fonder sur aucune démonstration ou preuve et n'est acceptable que s'il revendique et affiche clairement son statut de postulat posé *ab initio*.

C'est cet acte de foi qui va aussi permettre éventuellement de briser la chaîne ci-dessus en décidant par exemple de faire des molécules son point de départ – on peut dire que ce serait

⁸ Paul Oppenheim et Hilary Putnam, "*Unity of science as a working hypothesis*", édité par H. Feigl *et al*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, vol. 2, (Minnesota University Press, Minneapolis, 1958). Il convient de préciser que Oppenheimer et Putnam ne se prononcent pas sur la possibilité d'élucider en détail les relations entre les maillons de la chaîne qu'ils définissent.

le choix du physicien alors que le biologiste serait sans doute tenté de s'en tenir à élucider les rapports entre les êtres vivants et les cellules. Dans tous les cas, le souci de la rationalité peut et doit servir de guide afin d'éviter de s'égarer dans le domaine des pseudo-sciences dont trop d'exemples peuvent être produits⁹, et avec la conscience du fait qu'il est de toute façon impossible de maîtriser proprement des disciplines reposant chacune sur des connaissances dont la complexité (!) est autant conceptuelle que technique.

Dans la suite, en tant que physicien, pour la clarté de la discussion et éviter toute ambiguïté, je m'en tiendrai le cas échéant à la dichotomie :

monde macroscopique → monde microscopique

que l'on peut aussi mettre en correspondance assez vaguement avec :

systèmes complexes → systèmes simples

et, dans tous les cas, je me référerai implicitement aux domaines qui relèvent de la rationalité fondée sur une expérimentation satisfaisant les trois critères suivants :

1. Le système étudié doit pouvoir être préparé d'une façon parfaitement maîtrisée, l'adverbe *parfaitement* signifiant que toute différence éventuelle d'un échantillon à l'autre est au-delà de la précision expérimentale.
2. Les paramètres de contrôle de l'expérience doivent être identifiés afin de pouvoir les faire varier *un par un*. On sait bien que l'on ne peut pas se perdre si l'on se déplace sur un fil mais que, au contraire, l'égarement est possible dès que l'on se promène sur une surface même si celle-ci n'est qu'à deux dimensions, comme le sont le plan ou la sphère.
3. Toute expérience conduite dans le souci de respecter les deux exigences précédentes doit pouvoir être reproduite.

Il s'agit clairement de l'expérimentation au sens le plus *dur* du terme, qui cependant ne nie d'aucune façon d'autres formes d'expériences pertinentes pour d'autres disciplines (la sociologie, la médecine ou la recherche pharmaceutique) où l'unicité du sujet d'étude n'est pas assurée (quand bien même elle serait concevable) et qui se fondent notamment sur l'utilisation d'outils alors appropriés, les méthodes statistiques pour n'en citer qu'un. Il me semble raisonnable d'admettre que le monde dit *inanimé* est justiciable de cette notion contraignante d'expérimentation dont le cadre, parce qu'il est rigoureux et strict, doit d'une part mettre totalement à l'abri de l'erreur ou de l'*artefact*, d'autre part rendre réfutable au sens de Duhem¹⁰ et Popper¹¹ toute expérience réalisée en conformité avec ces exigences.

Ces prémisses étant posées, le réductionnisme pour le physicien s'inscrit par nature dans l'analyse de la question globale de l'unité de la physique¹² ; une fois le mot *unité* prononcé, on

⁹ Un exemple, juste pour le fun : “*De l'Homme quantique à l'homéopathie fractale yin-yang*”, vaste programme à découvrir à l'adresse <http://www.amessi.org/De-1-Homme-quantique-a-1-homeopathie-fractale>. Pour prendre la mesure de récupérations stupéfiantes, on pourra consulter mon article “*Théorie quantique et médecine : le point de vue d'un physicien*”, Hegel 6(2), 130 (2016), <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/60007>.

¹⁰ Pierre Duhem, *La Théorie physique. Son objet et sa structure* (Chevalier et Rivière, Paris (1906).

¹¹ Karl Popper, *Le réalisme et la science* (Hermann, Paris (1999).

¹² Voir la référence citée dans la note 4.

pense immédiatement au problème de l'unification des interactions dont la résolution conduirait à une “*Théorie du tout*” (“*Theory Of Everything*”, acronyme usuel *TOE*), qui n'est pas actuellement construite puisque notamment la théorie quantique et la relativité générale, dans leurs formes connues aujourd'hui, ne sont pas compatibles l'une avec l'autre, la première posant que l'espace est plat, rigide et immuable, la seconde lui attribuant essentiellement la possibilité d'être courbe, souple et dynamique. Il est indéniable que la recherche d'une telle unification est un enjeu intellectuel de première importance, mais il ne faut surtout pas y voir la quête ultime des physiciens car, même réalisée, elle ne serait d'aucun secours pour comprendre l'immense majorité des phénomènes que la physique prétend expliquer, décrire et prévoir.

C'est ici qu'apparaît la hiérarchie proposée par Anderson, avec l'inévitable concept d'*émergence*, qui est en un sens quelque peu antagoniste au réductionnisme puisque cette notion peut être ramassée dans la formule¹³ *le tout est plus que la somme des parties*, signifiant essentiellement que les propriétés des systèmes complexes, composés d'un grand nombre d'objets primordiaux, ne doivent pas toujours être recherchées par une simple extrapolation avec des grands nombres des propriétés d'un petit nombre de particules et que leur bonne compréhension repose souvent sur des concepts non définis à un niveau inférieur. Cet antagonisme est relatif dans la mesure où la formule présuppose sans la nier l'existence de mécanismes plus fondamentaux auxquels on se réfère plus ou moins explicitement pour justement marquer les différences entre deux plans de description, mais que l'on délaisse au motif de leur invisibilité et de leur passivité dans les phénomènes à décrire. Selon Balian¹⁴ “... , la mise en œuvre du réductionnisme implique un double mouvement ascendant et descendant. Ce va-et-vient entre induction et déduction, émergence et réduction, macroscopique et microscopique, est établi en physique depuis longtemps”. C'est pourquoi il paraît plus juste de dire que loin d'être antagonistes, réductionnisme et émergentisme sont *complémentaires* et se répondent l'un à l'autre.

Quoi qu'il en soit, Anderson cite maints exemples montrant que les systèmes complexes et/ou macroscopiques possèdent des propriétés qui les démarquent qualitativement de l'image fautive que l'on pourrait forger spontanément en les considérant comme la simple réunion¹⁵ de leurs constituants – ce qui d'ailleurs éliminerait d'emblée des comportements *collectifs* pourtant responsables d'effets remarquables (comme la supraconductivité par exemple). Avant de rentrer un peu dans le détail, on peut d'ores et déjà réaliser que le concept d'émergence est finalement très familier : une planche de bois est certes rigide mais peut-on définir de la même façon la rigidité d'un atome ou d'une molécule ? Une goutte d'eau est sphérique mais les molécules H₂O le sont-elles ? Et plus généralement, doit-on vraiment toujours en appeler à la théorie quantique pour discuter l'existence et les propriétés des objets macroscopiques au motif que cette théorie, parce qu'elle décrit correctement l'infiniment petit, est aussi la seule capable d'expliquer la stabilité de la matière à *toutes* les échelles aujourd'hui observables¹⁶ ?

Le premier exemple analysé par Anderson est un tout petit objet, la molécule d'ammoniac NH₃, que l'image naïve présente comme une pyramide statique alors que l'atome d'azote oscille¹⁷ par effet tunnel de part et d'autre du plan des hydrogènes à une fréquence de l'ordre

¹³ Cette affirmation est parfois appelée *Principe d'émergence*.

¹⁴ Roger Balian, “*Réductionnisme et émergence*”, <http://ipht.cea.fr/Docspht//articles/t05/116/public/publi.pdf>.

¹⁵ Ici, mieux vaut parler de *réunion* que d'*addition* afin d'inclure le cas (essentiel) où les constituants exercent une influence les uns sur les autres, c'est-à-dire sont en interaction mutuelle.

¹⁶ Elliott H. Lieb et Robert Seiringer, *The Stability of Matter in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010). Voir aussi “*From Quarks to Neutron Stars*”, disponible à l'adresse : <https://uofi.app.box.com/s/9zcxv4yqg0f696bbd5j6vo52sa0br1t4> et les proceedings de “*Quantum Fluids from nK to TeV*”, 80th Birthday Symposium in Honor of Gordon Baym, 2015.

¹⁷ C'est le mécanisme de base du *maser*.

de 3×10^{10} Hz ; une vision plus acceptable sur le plan théorique consiste à décrire ce mouvement en termes d'états stationnaires, chacun de ces derniers possédant une symétrie *donnée* dans l'inversion d'espace par rapport au plan de base de la pyramide (ils sont pairs *ou* impairs alors que les deux pyramides ne le sont pas, chacune se transformant en l'autre par inversion). À ce petit système, Anderson oppose les sucres lévogyres et dextrogyres, molécules beaucoup plus massives, dont on sait bien qu'ils existent en tant que tels, aptes qu'ils sont à faire tourner dans un sens *ou* l'autre le plan de polarisation de la lumière, ne passant *jamais* d'une forme à l'autre. Il est en fait possible de réconcilier ces deux comportements en invoquant l'échelle de temps caractérisant les deux dynamiques, fortement tributaire de la taille des systèmes correspondants : le temps de passage d'un sucre de la forme gauche à la forme droite est théoriquement d'un ordre de grandeur gigantesque comparé à la durée de toute expérience matériellement possible¹⁸. Cette constatation est un premier exemple de l'importance des *échelles* en physique, importance sur laquelle je reviendrai dans la dernière partie de cet exposé, et révèle en tout cas que la symétrie peut être ruinée (on dit *brisée*) par des considérations d'apparence prosaïque semblant conduire à une violation de principes pourtant réputés universels.

D'autres situations sont considérées par Anderson, montrant comment la notion de *symétrie brisée* intervient en effet de façon décisive pour expliquer que, partant d'un gaz ou d'un fluide, on en arrive à un cristal alors que nul ne remet pour autant en cause l'homogénéité de l'espace physique en vertu de laquelle tout système devrait posséder une symétrie de translation *continue*. C'est d'ailleurs aussi ce qui se passe à propos du ferromagnétisme et permet de comprendre l'existence à basse température de l'aimantation spontanée qui, en tant que vecteur, définit une direction remarquable de l'espace ; cette aimantation persiste après que le champ magnétique, graduellement réduit à zéro, est effectivement devenu strictement nul, alors que l'espace est toujours réputé isotrope. Le scénario à l'œuvre pour expliquer cette apparente contradiction porte le nom de *brisure d'ergodicité*¹⁹ et, techniquement parlant, résulte de la non commutation²⁰ des deux limites : limite thermodynamique²¹ et limite de champ nul. Autrement dit, sans nullement remettre en cause les lois fondamentales, il arrive que celles-ci semblent violées à un niveau macroscopique ; je reviendrai brièvement plus loin sur la flèche du temps qui est sans doute la problématique la plus exemplaire à ce sujet.

Anderson prend également appui sur l'explication (assez tardive) des transitions de phase (liquide-solide, para-ferromagnétique, normal-supraconducteur,...), dont il sera plus précisément question ci-dessous, pour montrer à nouveau de façon éclatante comment l'approche réductionniste pure et dure n'est d'aucun secours quand il s'agit de comprendre l'immense majorité des phénomènes que la physique entend décrire et quantifier, illustrant ainsi de façon éclatante sa

¹⁸ Il faut aussi admettre que pour une si grosse molécule il n'est pas raisonnable d'oublier son environnement et la décohérence qui va avec, en d'autres termes il faut éviter de s'aventurer dangereusement vers le pseudo-paradoxe du *Chat de Schrödinger*...

Au sujet de la décohérence, on pourra consulter le livre de Erich Joos, H. Dieter Zeh, Claus Kiefer, Domenico J. W. Giulini, Joachim Kupsch et Ion-Olimpiu Stamatescu, "*Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*" (Springer Science & Business Media, Berlin, 2013).

¹⁹ Nigel Goldenfeld, *Lectures on Phase Transitions and the Renormalization Group* (Addison-Wesley Publishing Co, Reading, 1992)

²⁰ La non commutation de plusieurs limites est un exercice favori de l'apprenti mathématicien. La physique regorge d'exemples montrant que ce divertissement n'a rien d'académique...

Outre l'exemple cité ci-dessus, on peut s'amuser avec la longueur d'onde Compton d'une particule de masse m , $\lambda_C \stackrel{\text{def}}{=} \frac{h}{mc}$: visiblement, $\lim_{h \rightarrow 0} \lim_{c \rightarrow \infty} \neq \lim_{c \rightarrow \infty} \lim_{h \rightarrow 0}$ puisque l'on obtient respectivement zéro et l'infini !

²¹ La limite thermodynamique consiste à augmenter indéfiniment certains paramètres physiques tout en maintenant entre eux les relations adéquates. Par exemple, pour un gaz de N atomes dans un récipient de volume V , on fait tendre N et V tous deux vers l'infini mais en gardant constant le rapport $\frac{N}{V}$ qui définit la densité du gaz, grandeur intensive s'il en est.

formule “*More is different*”.

Les mathématiques offrent d’ailleurs autant d’exemples que l’on veut de la notion d’émergence contrastée à celle de réductionnisme, la bifurcation étant rendue possible par la subtile complicité de l’infini. Par exemple – pour en prendre un qui est cher au physicien –, la fonction de partition Z d’un système ; tant que celui-ci est *fini*, Z est une somme en nombre *fini* d’exponentielles qui, parce que chacune d’entre elles est une fonction analytique, est aussi une fonction analytique. Au contraire, si l’on passe à la limite thermodynamique, Z devient une *série* qui *peut* à l’inverse posséder des singularités²² : aucun doute, quand l’infini s’en mêle, le tout n’est en rien, qualitativement mais pas toujours, la somme des parties ! Il en va de même de la diabolique fonction de Weierstrass, nulle part dérivable alors qu’elle n’est que (!?) l’addition de cosinus, des mesures singulières continues de Lebesgue et des escaliers du diable... L’inventaire serait sans fin, les mathématiques fournissant autant d’exemples que l’on veut de grandeurs émergentes et de caractéristiques absentes à un niveau plus “fondamental” : une singularité isolée ou non pour une fonction ailleurs analytique, la longueur du périmètre d’un flocon de Koch, etc.

En définitive, Anderson met en scène, sans réellement les opposer au fond ni les poser comme incompatibles, une approche réductionniste et une approche qu’il appelle *constructiviste* : si la chromodynamique quantique est heureusement disponible et connaît le succès que l’on sait, ce n’est pas elle qui va permettre de comprendre pourquoi le sodium est conducteur alors que le diamant est isolant ni pourquoi, en dessous de la température de Curie, un morceau de fer peut posséder une aimantation spontanée – et encore moins de fournir une explication de la loi d’Ohm. De façon plus provocante et certes métaphorique : un poème de René Char est-il inscrit dans les molécules de l’encre de son stylo²³ ?

3 Sur le plan pragmatique

C’est au moment du passage à la pratique que la question du réductionnisme se pose réellement puisque c’est elle qui va déterminer le choix de la *bonne* théorie en fonction du phénomène étudié et de la nature du système à décrire. Une première démarcation s’impose en général suivant que ce dernier est micro- ou macroscopique : il ne viendrait l’idée à personne d’aller chercher la théorie quantique pour fonder la mécanique des fluides ou croire que l’origine du déplacement de Lamb est inscrite dans l’équation de Newton.

En réalité, il ne s’agit pas seulement de choisir le cadre théorique adéquat mais aussi d’adopter la bonne *méthodologie* compte tenu de la question que l’on se pose. L’exemple le plus banal et sans doute le plus connu est celui du gaz parfait à température ordinaire, dont on sait d’emblée que la théorie quantique n’a rien à en dire²⁴ en raison de la dilution quasi infinie des atomes qui le constituent. Ceci réalisé et admis, il ne subsiste aucun doute que les atomes possèdent chacun une trajectoire dont l’équation de Newton est, *en principe*, capable de fournir toutes les caractéristiques. Pourtant, tout en restant dans le cadre classique, ce serait déraison de croire que la bonne façon de faire est d’entreprendre la résolution de ces équations dynamiques. À cela, plusieurs raisons de fond :

²² Une expérience numérique instructive : choisir une série entière divergente et faire tracer par la machine la suite des sommes partielles quand le nombre de termes augmente afin de voir la singularité “pousser” à vue d’œil.

²³ Agrémentée au goût de chacun, je dois cette image à Hubert Krivine.

²⁴ Étant sous-entendu que la question n’est pas d’étudier la résonance optique d’une vapeur atomique ou sa superradiance, ou de faire de la spectroscopie atomique...

- Il est totalement exclu de pouvoir écrire les $\sim 10^{23}$ équations du mouvement, et encore moins de les résoudre complètement puisque l'on ne connaît même pas les conditions initiales²⁵. Les ordinateurs les plus puissants sont tout juste capables de traiter la dynamique de quelques milliers de particules et à condition que le modèle de simulation numérique soit assez simple²⁶.
- Quand bien même une telle entreprise serait possible, elle n'aurait aucun intérêt, en fournissant une information pléthorique, inutile et inexploitable.
- Enfin, et c'est la vraie grande raison, qui est en effet de nature méthodologique : l'observation courante démontre à l'évidence que la description complète d'un système "complexe" comme 1 cm³ de gaz (parfait ou non) avec ses milliards de milliards d'atomes requiert en réalité l'usage d'un très petit nombre de grandeurs physiques : pour un gaz neutre et non magnétique, enfermé dans un bocal étanche, les trois variables pression, température et volume suffisent (ces trois grandeurs étant de surcroît reliées par l'équation d'état) pour en caractériser le comportement macroscopique. On peut dire que la bonne approche passe par la construction d'une théorie *effective* n'introduisant qu'un très petit nombre de variables ou paramètres contrastant avec le nombre quasi infini des variables microscopiques du système réel.

Ici, en tout premier, c'est finalement la *pertinence* et l'efficacité de la méthode qui sont en jeu, le choix de celle-ci ne remettant nullement en cause tout ce que l'on sait par ailleurs des théories de l'infiniment petit. Les succès qualitatifs et quantitatifs de la mécanique statistique ne sont pas la seule conséquence de cette façon d'attaquer le problème : ils résident aussi (surtout ?) dans sa fécondité conceptuelle puisque, comme Boltzmann l'a montré par son²⁷ théorème H, ces fondements de nature statistique forment le creuset où se coule le second principe de la thermodynamique, loi *émergente* s'il en est... et capitale. En définitive, c'est la nature même du système étudié qui impose ici le choix du *modèle probabiliste* bien que, dans le cadre classique, la dynamique soit foncièrement déterministe²⁸ au sens où l'entendait Laplace. De surcroît, température et pression sont typiquement des grandeurs de nature émergente puisqu'elles n'apparaissent qu'à une certaine échelle et par le biais de méthodes statistiques ne prenant leur vigueur que grâce à l'intervention des (très) grands nombres : cela n'a pas de sens de parler de la température d'un atome ou de la pression exercée sur une paroi par *une* molécule.

L'évocation qui vient d'être faite des approches probabilistes donne d'ailleurs l'occasion d'exhiber une situation où, tout en restant dans le cadre strict des mathématiques, la notion d'émergence s'impose pour montrer que le tout ne peut se réduire systématiquement à n'être que

²⁵ Quand bien même les connaîtrait-on ! On doit à Borel l'estimation que le déplacement sur un centimètre d'un gramme de matière sur Sirius se traduit par une variation relative de la pesanteur terrestre de l'ordre de 10^{-100} , ce qui interdit la prévision du mouvement d'une molécule au-delà d'un millionième de seconde... Voir Émile Borel, *Introduction géométrique à quelques théories physiques* (Gauthier-Villars, Paris, 1914).

²⁶ Si ces merveilleuses machines que sont les ordinateurs peuvent revigorer la tentation réductionniste, la simulation numérique ne doit intervenir en tout état de cause qu'une fois le terrain défriché et pour éventuellement conforter des tendances mises en lumière par d'autres moyens. Pour séduisante qu'elle soit, la puissance sans cesse croissante des ordinateurs ne doit pas faire tomber dans le piège du tout numérique et constituer ainsi un miroir aux alouettes.

²⁷ H désigne ici la capitale grecque de η , d'où la prononciation *théorème éta*.

²⁸ On oppose souvent aléatoire et déterminisme. Pourtant, comme l'écrit Sinai dans l'ouvrage *Chaos et déterminisme*, édité par A. Dahan Dalmenico, J.-L. Chabert et K. Chemla (Seuil, Coll. Point Sciences, Paris, 1992), "*La conclusion immédiate de tout ceci est l'absence de nécessité d'un mécanisme aléatoire extérieur pour l'applicabilité des lois de la théorie des probabilités. [...] L'instabilité d'une dynamique non aléatoire conduit à l'apparition de l'aléatoire.*"

le reflet de la somme des parties. Il s'agit des théorèmes limites de la théorie des probabilités, le plus connu étant le *théorème limite central* stipulant que sous des hypothèses assez peu contraignantes, la somme²⁹ d'un grand nombre de variables aléatoires indépendantes obéit à la loi de Gauss. Ces variables fluctuantes peuvent bien avoir des distributions extrêmement variées (mais devant toutes néanmoins posséder une variance), il n'empêche que, si elles sont en grand nombre, leur somme obéit asymptotiquement à une loi universelle où les caractéristiques précises des lois individuelles sont en quelque sorte effacées, évanescence qui est un bel exemple de l'apparition d'un concept émergent – avec en prime l'apparition du simple à partir du complexe. Il n'est sans doute pas excessif de dire que, compte tenu de l'énormité du nombre d'Avogadro, c'est l'existence de ce résultat majeur qui assure les éclatants succès de la mécanique statistique et, dans la limite thermodynamique, fait glisser le statut de certaines grandeurs physiques de la fluctuabilité à la certitude, de l'aléatoire au non aléatoire, puisque dans cette limite les fluctuations relatives deviennent nulles.

Dans le même ordre d'idée, il est également naturel de parler de la place du *hasard* dans la démarche du physicien³⁰ – sans pour autant s'égarer dans la question de l'impossible définition rigoureuse de ce concept. Dans le contexte de la présente discussion, on doit pouvoir accepter que le hasard est ce par quoi l'on désigne un ensemble de (petites) causes que, pour une raison ou une autre, on décide de ne pas traduire par une description fine tout en étant soumis à la nécessité de décrire les effets qu'elles produisent – et ce sans se prononcer sur le fait de savoir si ces causes sont connues ou inconnues, identifiables ou non. C'est typiquement ce que l'on fait pour le mouvement brownien d'une grosse³¹ particule immergée dans un fluide. Il ne fait plus aucun doute que si la trajectoire est erratique, c'est parce que la particule est bombardée des milliers de milliards de fois par seconde par les molécules du fluide, mais nul ne songerait à utiliser les équations de Newton pour décrire finement la dynamique couplée de ce système considéré comme purement mécanique. La bonne façon de faire est de prendre acte de cette impossibilité et d'admettre qu'une approche stochastique judicieusement pensée pour la seule particule doit pouvoir rendre compte de ce que Jean Perrin observa dans son microscope optique – et c'est ce que fit Langevin pour écrire son illustrissime équation, devenue depuis lors emblématique pour le traitement quantitatif d'une très grande variété de problèmes. Ce faisant, et tout comme pour un gaz traité par la mécanique statistique, on est ainsi passé d'un modèle fondamentaliste à un autre de nature constructiviste sans cependant remettre en cause les lois qui, si elles demeurent objectivement vraies, ne sont d'aucune utilité pour la description des phénomènes observés tout en restant compatibles avec ceux-ci. Il convient aussi de remarquer que le passage d'un plan descriptif à l'autre constitue un changement de pensée majeur puisque l'on est ainsi passé d'une vision totalement déterministe à une autre foncièrement inspirée par l'aléatoire.

Le glissement du certain à l'aléatoire n'est pas toujours le résultat d'une décision pragmatique mais peut être aussi une nécessité imposée par la mise en évidence de nouvelles lois de la nature, comme en témoigne la révolution conceptuelle introduite par la théorie quantique où une forme d'indéterminisme semble inscrite dans l'essence même des choses ; si alors la notion de probabilité devient inévitable, elle est cependant, et de loin, moins *primordiale* que celle d'*amplitude de probabilité*, au demeurant fort étrange et pas seulement parce qu'elle prend des valeurs complexes. On sait aussi que ce bouleversement rendu nécessaire pour décrire l'infiniment petit n'est que l'une des conséquences surprenantes de cette théorie : une autre, tenant à la na-

²⁹ C'est ici vraiment la *somme*, au sens de l'addition usuelle des nombres.

³⁰ Ne pas croire que le physicien marche au hasard !

³¹ Tout est relatif : la taille de la particule brownienne est de l'ordre du micromètre et si elle est pour nous minuscule, son rayon est encore, en gros, 10 000 fois plus grand que celui des molécules du fluide.

ture non locale de celle-ci, est le phénomène d'intrication rendant en principe inséparables deux systèmes ayant partagé un peu d'existence commune. En pareil cas, la volonté de réductionnisme peut entrer en conflit frontal avec les lois sur lesquelles on persiste pourtant à vouloir s'appuyer, conflit auquel on peut espérer mettre un terme en quittant le terrain des principes avérés pour arriver sur celui des réalités contingentes imposées par le problème analysé ; en ce qui concerne l'intrication, le rôle de la décohérence ne saurait être ignoré et doit être soigneusement analysé pour trancher la question de savoir si deux électrons ou deux photons sont ou non intriqués : un électron sur la Lune et son jumeau sur la Terre sont-ils vraiment dans un état singulet ou triplet ?!

Les phénomènes critiques fournissent un autre exemple montrant comment le réflexe de la prééminence explicite du microscopique peut conduire à une impasse. Depuis longtemps, on avait observé que, près d'un point critique, des systèmes très différents obéissent à des lois quantitativement identiques, constat qui avait conduit à l'introduction de mystérieux exposants *critiques* prenant de surcroît des valeurs inattendues. Par exemple, au voisinage de la transition liquide-gaz, la courbe donnant la différence de densité du liquide et du gaz varie³² comme $(T_C - T)^\beta$ avec $\beta \simeq 0.32$, l'exposant β étant expérimentalement le même pour la plupart des fluides – d'où la loi dite *des états correspondants*. Mais il y a plus : près de la transition paramagnétique – ferromagnétique survenant à la température de Curie T_C , la magnétisation \mathcal{M} d'un ferromagnétique présente le même type de comportement, $\mathcal{M} \sim (T_C - T)^\beta$, avec de façon très surprenante et remarquable, des valeurs très similaires³³ pour l'exposant critique.

Cette *universalité* démontre à l'évidence que la nature physique précise des objets microscopiques impliqués peut ici être totalement oubliée à condition de se placer suffisamment près de la transition ; c'est ce constat qui a conduit à l'édification d'une théorie générale des phénomènes critiques dont la théorie phénoménologique de Landau est le génial prototype, contenant d'ailleurs essentiellement la notion de symétrie brisée mise en avant par Anderson. On peut ainsi mesurer la fécondité du renoncement au réductionnisme engendrant une meilleure compréhension de phénomènes ayant pendant des décennies semblé constituer un *puzzle* infaisable. Ces progrès n'ont nullement remis en cause les lois fondamentales mais ce serait pure illusion d'imaginer que celles-ci sont nécessaires pour comprendre l'existence des exposants critiques et pure utopie de croire qu'elles peuvent donner les valeurs de ces derniers. À l'inverse, il convient de ne pas sombrer dans l'universalisme débridé à propos de tout et d'aller vers une *physique sans ingrédients* où les phénomènes les plus divers, des tremblements de terre aux cours de la bourse en passant par la forme des nuages, relèveraient de prétendues théories universelles caractérisées par des exposants l'étant plutôt moins que plus³⁴.

L'abandon du réductionnisme pour la compréhension des phénomènes critiques n'a pas seulement produit une avancée conceptuelle d'une immense portée mais s'est également traduit par la mise au point de méthodes de résolution d'une très grande efficacité, la plus connue étant sans doute le *groupe de renormalisation*. Cette technique s'est en fait développée dans plusieurs

³² Pour $T \lesssim T_C$.

³³ Expérimentalement, pour la plupart des ferromagnétiques, la valeur est comprise entre 0.31 et 0.38. Pour le modèle d'Ising bidimensionnel, Onsager a trouvé exactement $\beta = \frac{1}{8} = 0.125$, résultat non publié par lui-même mais explicité par Yang (Chen Ning Yang, "The Spontaneous Magnetization of the Two-Dimensional Ising Model", Physical Review **85**, 808 (1952)).

³⁴ La physique, aussi, connaît des phénomènes de mode. Il y a quelques décennies, on trouvait du bruit en $1/f$ partout, y compris dans les sonates de Mozart...

Se souvenir qu'une loi-puissance étant caractérisée par un exposant, la vérification précise de sa pertinence exige une exploration sur un très grand nombre d'ordres de grandeur.

contextes, principalement la théorie des champs³⁵ et la mécanique statistique, mais dans ce dernier cadre c'est la traduction technique de l'idée physique des *blocs de spins* introduite par Kadanoff³⁶, idée précisément fondée sur la conviction que les phénomènes critiques impliquent essentiellement une *physique à grande échelle* où les détails microscopiques de la matière ne jouent en fait aucun rôle. Le groupe de renormalisation (en réalité un *semi-groupe*³⁷) est une procédure itérative permettant d'éliminer de proche en proche les variables non pertinentes et constitue *de facto* un crible anti-réductionniste dont l'efficacité n'est plus à démontrer ; on peut même dire que c'est une machine à fabriquer les grandeurs pertinentes. En tout cas, et comme le souligne Anderson, l'intelligence des phénomènes critiques est l'une des plus belles illustrations du fait que la renonciation maîtrisée au réductionnisme pur et dur ouvre la voie pour que la connaissance progresse.

Indépendamment de toute problématique donnée et une fois le cadre théorique choisi à bon escient, l'analyse précise d'un problème concret, qu'elle soit qualitative ou quantitative, passe par la définition d'un *modèle* et cette étape se fait nécessairement en adoptant plus ou moins implicitement une position lucide où certains aspects ou effets doivent être ignorés afin de pouvoir effectivement *raisonner* avant même de pouvoir *calculer*. De fait, si la construction effective d'un modèle est elle aussi anti-réductionniste, c'est parce qu'elle établit une hiérarchie fondant la séparation entre l'essentiel et l'accessoire³⁸ pour finalement laisser de côté ce dernier tout en sachant que cela peut revenir à fermer les yeux sur l'existence de lois plus fondamentales, connues ou inconnues, voire à rentrer carrément en conflit avec celles qui sont en vigueur à l'instant considéré... à condition de le faire à bon escient. L'art du physicien (et d'autres) est vraiment l'art de construire le *bon* modèle.

Ainsi, revenant au gaz composé d'objets supposés classiques quoique microscopiques, la *réalité* des choses exige souvent de délaisser l'hypothèse du gaz *parfait* ce qui revient essentiellement à introduire une interaction entre les atomes ou les molécules. Cette décision prise, il est évidemment hors de question d'en faire une représentation *exacte* et c'est pourquoi on fait usuellement un choix réalisant un juste équilibre entre les arguments physiques et la faisabilité des calculs. Si pour un gaz neutre le comportement à longue portée est bien connu (c'est principalement la force de van der Waals), la variation à très courte distance est le plus souvent choisie par commodité : un cœur dur, une divergence algébrique,... alors qu'aux distances de l'ordre de l'ångström, le principe de Fermi exige plutôt une violente divergence de type exponentiel (comme le traduit le potentiel de Morse). C'est un cas où l'on ferme les yeux sur des principes établis – sans inquiétude d'ailleurs, tout indiquant que la forme précise du potentiel à très courte distance est, aux températures et pressions ordinaires, sans incidence sur le résultat final.

Un autre exemple est fourni par l'histoire assez récente du magnétisme : c'est seulement peu après 1926 et l'introduction du *spin* de l'électron que l'on a enfin élucidé la source microscopique du magnétisme mais l'ignorance de celle-ci n'avait heureusement pas empêché

³⁵ Ernst Carl Gerlach Stueckelberg, et André Petermann, "La normalisation des constantes dans la théorie de quanta", *Helv. Phys. Acta* **26**, 499 (1953).

³⁶ Leo P. Kadanoff, "Scaling Laws for Ising Models Near Critical Points", *Proceedings de Midwest Conference on Theoretical Physics* (Bloomington, 1966).

³⁷ Un semi-groupe généralise la notion de groupe en ne conservant que l'associativité et la fermeture vis-à-vis de la loi de composition.

³⁸ Tout modèle est inévitablement une simplification de la réalité, la grande difficulté étant de savoir reconnaître l'essentiel. Le modèle d'Ising original, avec ses interactions réduites aux premiers voisins, semble être une outragieuse caricature et pourtant... La résolution en 1944 par Onsager du cas bidimensionnel a démontré ce à quoi personne n'acceptait de croire : que des interactions à courte portée pouvaient induire à basse température un ordre *macroscopique*. Au-delà de ses qualités de réalisme, la principale vertu d'un modèle est de pouvoir révéler l'existence de phénomènes inédits, parfois contre-intuitifs voire paradoxaux.

Langevin de faire une théorie du paramagnétisme³⁹ en remisant cette énigme et en *postulant* pour certains atomes l’existence d’un moment magnétique permanent... alors que justement, selon le théorème de Miss van Leeuwen⁴⁰, le magnétisme ne peut exister en physique classique. Un autre exemple est le modèle de Bohr⁴¹ qui, affirmant que l’électron ne rayonne pas quand il est sur l’un des cercles privilégiés, est en contradiction flagrante avec les équations de Maxwell au point de provoquer la colère de Max von Laue⁴² “*This is all nonsense ! Maxwell’s equations are valid under all circumstances !*”. On pourrait même évoquer la “fonction” de Dirac, le génial physicien ignorant superbement pour de (très) bonnes raisons le fait – fondamental pour les mathématiciens – que l’intégrale d’une fonction presque partout nulle... est nulle ! On sait la fécondité d’une telle audace, tant pour la physique que pour les mathématiques d’ailleurs puisque la “fonction” de Dirac fut la petite graine à l’origine de la théorie des distributions dont on peut aussi trouver l’origine dans certains travaux de Heaviside et Poincaré.

Dans cet ordre d’idées, on peut d’ailleurs mentionner l’alternative discret/continu – sur laquelle je reviendrai dans la dernière partie – et qui se cache en coulisse en de multiples occasions, à commencer quand on introduit la notion de charge ponctuelle qui, justement, est l’image la plus naturelle de la *distribution* de Dirac. En définissant la bonne limite mathématique, ceci permet de donner un sens à une fonction telle que la *densité* de charge électrique⁴³ alors que, jusqu’à nouvel ordre, la charge de l’électron est une brique ponctuelle indestructible⁴⁴. Plus généralement, l’alternative est aussi camouflée quand on décide de traduire par des équations *différentielles* la variation de grandeurs dont on sait, à un niveau fondamental, qu’elles sont *atomiques* au sens le plus strict du terme. Pourtant, cela n’empêche pas d’écrire que l’intensité dans un circuit (macroscopique) est la dérivée de la charge par rapport au temps, de poser l’équation $R\frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q = 0$ pour la décharge d’un condensateur, etc.

Enfin, pour terminer cette partie où la nécessité de concepts émergents a été rencontrée à plusieurs reprises, en amont même de la construction précise d’un modèle, il convient sans doute de dire un mot du problème que pose l’irréversibilité manifeste du temps⁴⁵ alors que les équations dynamiques, classiques ou quantiques⁴⁶, possèdent la symétrie d’invariance par renversement du temps. L’opposition entre ces deux affirmations, exactes l’une comme l’autre, est levée en réalisant qu’elles concernent deux situations extrêmes, chacune pouvant être caractérisée par le nombre des degrés de liberté qui sont effectivement impliqués. La réversibilité dans un cas concerne les *petits* systèmes alors que, *stricto sensu*, l’irréversibilité théorique est la règle pour les systèmes dont le nombre de degrés de liberté est *infini* ; en pratique, le rôle de cet infini est joué par un très grand nombre, qui est le plus souvent le nombre d’Avogadro. Et d’ailleurs, quoique déterministe au niveau microscopique, la réalité de cette évolution à sens unique peut s’exprimer quantitativement en termes probabilistes⁴⁷, la probabilité du mouvement inverse étant extraordinairement petite, au point même d’être inconcevable. Il ne fait pas de doute que

³⁹ Paul Langevin, “Magnétisme et théorie des électrons”, Ann. Chim. Phys. **5**, 70 (1905).

⁴⁰ Hendrika Johanna van Leeuwen, Dissertation, Leiden 1919, et “Problèmes de la théorie électronique du magnétisme”, Journal de Physique **2**, 361 (1921).

⁴¹ Niels Bohr, “On the Constitution of Atoms and Molecules”, Philosophical Magazine, **26**, 1-25 (1913) ; “Part II. – Systems containing only a Single Nucleus”, *ibid.*, 476-502.

⁴² Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (McGraw-Hill, New York, 1966), § 2.2.

⁴³ La même observation vaut pour la densité de masse puisque la matière est *atomisée*, elle aussi.

⁴⁴ Ceci est une conséquence du fait que l’électron est une particule *fondamentale*, au contraire d’un nucléon, d’un atome,...

⁴⁵ Le temps lui-même fait d’ailleurs l’objet d’un débat confrontant émergentisme et réductionnisme. Voir par exemple le petit livre de Carlo Rovelli, *Et si le temps n’existait pas ?* (Dunod, Paris, 2012).

⁴⁶ Cette affirmation usuelle ne vise que l’évolution par l’équation de Schrödinger, l’évolution par réduction du paquet d’ondes étant au contraire foncièrement *irréversible*.

⁴⁷ Voir la note 28.

la flèche du temps est l'archétype de concept émergent.

4 Un concept-clé : la notion d'échelle physique

Il a été rappelé en quoi la construction du bon modèle physique est un préalable à l'analyse qualitative ou quantitative d'un phénomène et pourquoi la modélisation se situe forcément quelque part dans la chaîne réductionniste, d'abord par le choix de la bonne théorie et de la méthodologie appropriée puis par la prise en compte du fait que pour le physicien, le zéro et l'infini⁴⁸ – on devrait plutôt dire le *petit* et le *grand* – n'ont pas une signification absolue, celle-ci étant au contraire relative à un contexte dûment précisé. Une telle *relativité* s'impose à l'esprit dès que l'on prend explicitement en considération les lois fondamentales, les contingences que toute expérience édicte, et surtout la nature même du système étudié, laquelle fixe des échelles spécifiques et inéluctables aux grandeurs physiques telles que l'énergie, le temps, la longueur, etc.

C'est à ces échelles forcément inscrites dans le problème analysé que tout doit être rapporté, en fabriquant les paramètres *sans dimension* adéquats qui, par nature, ne dépendent pas de l'unité employée (ce sont des nombres *purs*, comme on dit). Il est certain que le traitement non relativiste d'un objet de masse m exige que sa vitesse v soit très petite devant celle de la lumière, ce que l'on exprime proprement en introduisant le *nombre sans dimension* $\beta \stackrel{\text{déf}}{=} \frac{v}{c}$, soumis à la contrainte $\beta \ll 1$ traduite parfois de façon imagée en posant formellement $c = \infty$. De façon analogue, on peut oublier la théorie quantique si l'action typique S_{typ} est très grande devant la constante de Planck, $\frac{\hbar}{S_{\text{typ}}} \ll 1$, ce qui revient (toujours formellement) à poser $\hbar = 0$.

Les échelles ne sont d'ailleurs pas toujours liées à des constantes fondamentales de la physique, mais peuvent (doivent !) jouer leur rôle en cas de difficulté technique. Par exemple, la fonction propre d'une particule libre, sans autre précision, est une onde plane $e^{i\vec{k}\cdot\vec{r}}$ qui a le défaut de ne pas être de carré sommable, alors que bien évidemment la probabilité de trouver cette particule dans tout l'espace est bornée et égale à 1. Cette difficulté se résout d'elle-même en introduisant une boîte de confinement arbitrairement grande mais *finie*, un cube de côté L par exemple, qui n'aura aucun effet sur les prévisions physiques à condition de choisir L gigantesque devant toute autre longueur propre au problème et éventuellement, en bout de calcul, prendre effectivement la limite $L \rightarrow +\infty$; procédant ainsi, on évite les troubles liés à l'apparition d'objets plus ou moins bien définis comme la "fonction" de Dirac et produisant des difficultés qui ne sont en fait qu'artificielles. Multiplier les exemples de régularisation de ce type permet d'ailleurs finalement de réaliser que l'on a fait de la théorie des distributions à la manière de Monsieur Jourdain.

S'agissant d'abord du *zéro*, il importe de réaliser qu'il ne vise pas seulement les petits effets qu'aucune expérience ne pourra sans doute jamais mettre en évidence quand bien même il y aurait quelque intérêt à tenter de le faire, et qu'il convient donc de ne pas envisager d'inclure dans le modèle : dans l'expérience de Thomson⁴⁹, nul n'aurait l'idée d'inclure la pesanteur

⁴⁸ Au passage, on doit noter que l'infini n'est pas l'inverse de zéro, ni pour les nombres réels (on arrive à l'origine par la gauche ou par la droite ?) et encore moins pour les complexes puisque si zéro est alors au centre du plan, l'infini est partout sur sa périphérie (ce n'est pas sans raison que Riemann a inventé la sphère portant son nom). Autrement dit, ces deux notions ne sont nullement réductibles l'une à l'autre et doivent souvent être discutées séparément.

⁴⁹ Dans une expérience historique (1897), J. J. Thomson a mesuré quantitativement la déviation des électrons dans un condensateur plan et en a déduit le rapport charge sur masse.

terrestre⁵⁰ ! De même, on fait comme si la constante de Planck était *nulle* quand on cherche à déterminer la trajectoire d'un obus de canon, ou que la température l'est aussi pour l'étude du gaz d'électrons dans un métal ordinaire à l'ambiante puisque la température de Fermi est alors de plusieurs dizaines de milliers de degrés kelvin. En pareil cas, zéro signale ce qui est appelé couramment une *approximation*, à justifier dans chaque cas, et désigne l'oubli d'un effet lié à des grandeurs très petites par rapport à toute autre grandeur intrinsèquement liée au système étudié.

Le *zéro* exprime aussi parfois une vérité première admise et considérée comme telle à un instant donné. Ainsi en va-t-il aujourd'hui du rayon de l'électron⁵¹, du second membre de l'équation exprimant la variation totale de charge électrique lors d'une réaction en vertu de la conservation de la charge, ou encore du principe de la conservation de l'énergie – conséquence de l'hypothèse d'*uniformité* du temps – principe que Bohr remet d'ailleurs en cause (brièvement) en affirmant que l'énergie pourrait n'être conservée que *statistiquement* parlant. Dans tous ces cas, il n'est alors nullement question d'échelle physique puisque l'apparition du zéro est une conséquence des théories alors en vigueur (ou en cours d'élaboration), indépendamment de tout projet réductionniste, émergentiste ou constructiviste.

En ce qui concerne l'infini, les mêmes considérations peuvent être mises en avant. Déclarer qu'une cible est *infiniment* massive, c'est juste dire que sa masse est très grande par rapport à celle du projectile qui la bombarde ou qu'elle émet, et faire ainsi une petite erreur numérique à rectifier si nécessaire ; par exemple, la règle de Bohr pour l'émission d'un photon par un atome, $E_i - E_f = h\nu$, n'est pas vraie en toute rigueur puisqu'elle ignore le recul de l'atome. La même considération prévaut quand il s'agit de donner l'explication de l'effet Mossbauer (le *canon sans recul*) puisque c'est le cristal macroscopique (de masse "infinie") qui encaisse la variation d'impulsion autorisant alors à n'écrire que la seule la loi de conservation de l'énergie. De même, l'action typique de la Terre dans sa révolution sidérale est donnée par son moment cinétique dont l'ordre de grandeur est 10^{40} J.s, soit environ 10^{74} quand on le rapporte à la constante de Planck ; décréter alors que ce moment cinétique est un infini⁵² de la théorie quantique n'est que l'expression du bon sens : cette théorie, quoique plus *fondamentale* en un sens que la mécanique de Newton et Galilée, n'a ici évidemment rien à dire et peut être oubliée.

La discussion du zéro et de l'infini est aussi celle de l'alternative⁵³ discret/continu, c'est-à-dire de la décision de représenter les grandeurs physiques par des variables prenant leurs valeurs dans un ensemble lacunaire comme \mathbb{N} ou \mathbb{Z} , ou dans un ensemble dense comme \mathbb{R} (voire \mathbb{C}). Par exemple, on suppose ordinairement qu'une position peut être fixée par une variable prenant ses valeurs dans \mathbb{R} , autre façon de dire que l'espace est *continu* – ce que le bon sens semble d'ailleurs devoir imposer. En fait, nul n'en sait rien et dire que l'espace est continu relève d'un postulat en accord avec le fait que, avec les moyens actuels, on est incapable de discriminer, théoriquement ou expérimentalement, entre un espace continu et un espace discret – la même question se posant d'ailleurs pour le temps. Il n'est pas *a priori* absurde d'imaginer que l'espace-temps pourrait être granulé (*atomisé*) sur une distance spatio-temporelle qui serait celle liée aux échelles de

⁵⁰ Ce qu'il faut faire au contraire pour un jet de neutrons ultra-froids.

⁵¹ Pour un article récent sur la forme de l'électron, voir <http://www.nature.com/nature/journal/v473/n7348/full/nature10104.html>.

⁵² Selon Eddington (et d'autres estimations plus récentes), le nombre de protons dans l'univers est de l'ordre de 10^{80} ; sans exagération on peut dire que c'est typiquement le *plus grand nombre* que la physique peut considérer à bon escient...

⁵³ Sur cette question, voir la conférence d'Alain Comtet, "*Le continu et le discret dans les théories physiques*", disponible à <http://www.diffusion.ens.fr/index.php?idconf=1052&res=conf>.

Planck⁵⁴ ; sauf erreur, c'est l'une des idées inscrites dans la théorie de la gravitation quantique à boucles.

À nouveau, les échelles physiques disponibles peuvent jouer un rôle déterminant lorsqu'il faut trancher entre le discret et le continu, ou découvrir que ce qui était continu ne l'est pas à un niveau fondamental. L'exemple qui vient immédiatement à l'esprit est l'hypothèse de Planck (1900) sur la quantification des échanges d'énergie entre matière et rayonnement, hypothèse que Poincaré⁵⁵ tenta en vain de *démontrer* ; cet *échec* (selon ses propres termes) conduisit finalement Poincaré à attribuer à cette hypothèse le statut d'un "*élément de réalité*", tout en montrant que la nécessité de retrouver la loi expérimentale du corps noir s'exprimait par des contraintes mathématiques qui, schématiquement parlant, reviennent à remplacer une intégrale par une série... c'est-à-dire à s'arrêter en chemin en ne prenant pas la *limite* usuelle des sommes à la Darboux, limite qui conduit à l'intégrale de Riemann.

Or il est bien évident que ce sont les échelles physiques, et évidemment la question que l'on se pose, qui permettent de discriminer entre le discret et le continu. Si l'hypothèse de Planck ne s'est imposée qu'au début du XX^e siècle, c'est bien parce que la constante de Planck est minuscule à l'échelle humaine ; pour mettre en évidence une variation d'énergie de 1 J avec la formule de Planck-Einstein $\Delta E = h\nu$, il faut utiliser une fréquence de l'ordre de 10^{33} Hz ! Inversement, aux fréquences ordinaires, par exemple de l'ordre du MHz, la variation d'énergie est de l'ordre de 10^{-27} J, environ un milliard de fois plus petite qu'un électron-volt (eV)⁵⁶. Autrement dit, sur l'axe réel des énergies, on ne risque pas de voir la quantification sauf à introduire des énergies très petites, notamment celles qui prévalent dans le domaine atomique. En définitive, c'est la plongée vers l'infiniment petit qui a permis de mettre en évidence la discrétisation de certaines grandeurs physiques : en ce sens la découverte de la quantification est l'un des fruits de la tentation réductionniste manifestée à propos de phénomènes alors inexplicables.

Rappeler en quoi le zéro et l'infini du mathématicien ne sont pas ceux du physicien semble creuser un fossé de plus entre ces deux communautés. En réalité, je crois que c'est tout le contraire car la discussion des deux points de vue donne la possibilité aux uns et aux autres de s'enrichir mutuellement. La "fonction" de Dirac, par ses défauts de rigueur manifestes, a joué un rôle déterminant pour l'éclosion puis la construction de la théorie des fonctions généralisées ; dans l'autre sens, les mathématiciens ont forgé des concepts et donc fourni des outils permettant de donner un sens à des objets mal déterminés, par exemple la notion de prolongement analytique. Ce va-et-vient ne peut se produire que par une mise en commun de compétences diversifiées s'exprimant dans un langage ouvert prenant en compte tous les aspects du problème tel qu'il se pose afin de forcer le recul des stériles antagonismes.

En toute circonstance, et qu'il s'agisse du zéro ou de l'infini, c'est donc la nature même du système étudié et les inéluctables échelles physiques qu'elle incorpore, tout autant que la question que l'on se pose, qui vont décider de ce qu'il en est afin de participer activement à la définition précise du bon modèle. Pour la physique atomique, la taille de notre galaxie est

⁵⁴ Comme rappelé plus haut, on ne sait pas aujourd'hui comment réunir dans un même *corpus* théorique la théorie quantique et la relativité générale d'Einstein (théorie de la gravitation). Cette impossibilité interdit de décrire des phénomènes où les effets quantiques et les effets gravitationnels sont comparables ; le critère correspondant conduit aux *échelles de Planck* (longueur, temps et énergie) qui définissent une sorte de barrière infranchissable vers un monde dont la description exige une théorie qui aujourd'hui n'est pas disponible. La longueur de Planck vaut environ 2×10^{-35} m, le temps de Planck est voisin de 5×10^{-44} s, l'énergie de Planck est à peu près 5×10^{19} GeV.

⁵⁵ Henri Poincaré, "*Sur la théorie des quanta*", Journal de physique théorique et appliquée **2**, 5 (1912).

⁵⁶ $1 \text{ eV} \simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

réellement “infinie”, tandis que pour les phénomènes se situant dans le domaine d'énergie de l'eV, le noyau atomique peut être considéré comme étant sans structure interne, et donc ponctuel⁵⁷. Au contraire, pour l'astrophysicien qui étudie l'univers à grande échelle, notre galaxie est un objet “microscopique”, alors que pour l'expert en gluons et quarks, le noyau atomique est à lui seul un véritable univers. De même, le temps de (quasi-) récurrence d'un système macroscopique est exponentiellement grand, mais toujours fini : c'est pourquoi on énonce le second principe, légitimé par le fait qu'un intervalle de temps $\sim 10^{10^{23}}$ fois l'âge de l'univers est réellement insensé, tout comme l'infini au sens commun est et restera toujours hors de portée⁵⁸. Enfin, si le voisinage d'un point critique, en ce qui concerne certaines grandeurs thermodynamiques, est insensible aux détails microscopiques c'est notamment en raison de la divergence de certaines longueurs de corrélation à la transition, au sens où elles deviennent gigantesques par rapport à une longueur d'ordre atomique.

Ces exemples et beaucoup d'autres, montrent que l'étude de la plupart des problèmes ne peut être envisagée dans un cadre réductionniste pur et dur où seul ce que l'on sait pourtant *fondamental* pourrait être le point de départ d'une description raisonnée et efficace ; c'est finalement la considération des bonnes échelles physiques qui permet de fonder la hiérarchie entre les théories physiques sans mettre en cause la validité des unes et des autres ni d'en déduire un classement de valeur. Une fois cette hiérarchie établie, il devient possible de choisir celle qui fournit l'instrument le plus approprié. Les ordres de grandeur relatifs des échelles légitiment ainsi la construction d'une chaîne de domaines emboîtés à la manière de poupées russes, chacun de ceux-ci relevant d'un traitement spécifique.

Il convient toutefois de terminer sur une note tempérant l'optimisme quant à la possibilité de toujours pouvoir définir la bonne méthodologie par l'analyse des échelles. Par exemple, on connaît des objets, notamment géométriques, présentant d'étranges propriétés liées à leur symétrie d'invariance d'échelle responsable du fait que leur aspect n'est pas modifié quand on fait une succession de *zooms* ; il s'agit des fractales popularisées par Mandelbrot mais dont les pionniers furent Fatou et Julia⁵⁹ peu après que Jean Perrin eut utilisé la métaphore de la côte de Bretagne⁶⁰ à la suite de son observation des trajectoires de particules browniennes. Pour des raisons physiques fort différentes, qui tiennent essentiellement au fait que le système n'est pas conservatif et donc dénué de trajectoires périodiques, on connaît des cas où les non-linéarités sont susceptibles d'engendrer une hiérarchie (parfois infinie) d'échelles de temps rendant l'analyse extrêmement difficile et encore mal comprise, comme pour la turbulence développée⁶¹.

⁵⁷ L'ordre de grandeur du “rayon” des noyaux est le fermi, fm ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$).

⁵⁸ De l'hypothèse de Riemann (“*Tous les zéros non triviaux de la fonction de Riemann sont sur la droite. . .*”), le mathématicien ne dira pas qu'elle est vraie puisqu'elle n'est pas encore démontrée ; en revanche, quiconque travaillant dans les bonnes unités avec des nombres $\lesssim 25$ millions la considérera comme exacte. Même pour une science dite exacte, la vérité peut être toute relative.

⁵⁹ Voir par exemple Michèle Audin, *Fatou, Julia, Montel, le Grand prix des sciences mathématiques de 1918, et après...* (Springer, 2009).

⁶⁰ Voir la préface de son grand petit livre *Les atomes* (Flammarion, Paris, 1991).

⁶¹ Selon Emmanuel Lévêque, “*La difficulté du problème de la turbulence réside principalement dans le fait qu'il n'y a pas de séparation entre les grandes et les petites échelles : on ne peut pas traiter le comportement à grande échelle sans tenir compte explicitement des mécanismes mis en jeu aux petites échelles, et inversement.*” (http://www.ast.obs-mip.fr/users/rieutord/PROG_aussois_files/Lectures/aussois_leveque.pdf).

5 En guise de conclusion

Si le problème du réductionnisme est universel et peut concerner toutes les disciplines, on voit que même restreint aux sciences dures que sont la physique et les mathématiques, il imprègne la démarche et détermine l'activité de qui entend contribuer à une meilleure connaissance des fondements de ces disciplines et des phénomènes dont elles font leur objet. Ce serait un tort de croire que cette question est seulement d'ordre philosophique et que les physiciens comme les mathématiciens peuvent toujours faire l'économie d'une réflexion à ce sujet. Les exemples analysés par Anderson, et d'autres d'ailleurs, montrent bien l'importance de savoir changer son fusil d'épaule pour, passant d'un plan descriptif à un autre, acquérir la compréhension en profondeur de phénomènes ayant constitué un défi intellectuel à plusieurs générations et prendre la mesure de la nécessité contingente de concepts émergents.

Il n'est pas excessif de dire que toute la recherche en physique est un perpétuel va-et-vient entre l'accumulation de faits et la construction de modèles – voire de nouvelles théories – visant à formaliser et à donner leur véritable sens à des lois fondamentales, et la prise de distance rendue nécessaire lorsque s'impose l'évidence d'une vision moins “universelle”. D'un côté, selon Poincaré⁶² “*Une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison*” – d'où l'importance d'élaborer des descriptions théoriques –, de l'autre Anderson n'hésite pas à affirmer⁶³ “*..., at each new level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other.*” – d'où l'intérêt de reléguer en coulisse des acquis fondamentaux quand, sans être aucunement remis en cause, il est prouvé qu'ils ne sont d'aucune utilité.

Sans les soupçonner de schizophrénie, il est ainsi juste de dire que les physiciens sont à la fois réductionnistes et émergentistes, oscillant sans fin pour les besoins de leur pratique entre deux attitudes *complémentaires* leur permettant de déboucher sur un terrain constructiviste dont la fécondité se mesure à l'explication raisonnée de ce qui était incompréhensible. Croyant implicitement à l'existence de lois universelles fondamentales, avérées ou encore putatives voire carrément spéculatives – pour des raisons que l'on a envie de qualifier d'*idéologiques* – leur pragmatisme impose de les laisser à leur place sans toutefois les renier, soit pour des questions de moyens (d'où par exemple la mécanique statistique ou l'équation de Langevin), soit parce que l'expérience démontre l'existence d'échelles caractéristiques permettant de différencier nettement les variables qui sont pertinentes de celles qui ne le sont pas, soit encore parce que le déterminisme au sens de Laplace peut se révéler être une illusion venant ébranler l'absolue croyance en la prévisibilité de tout, toujours et partout.

⁶² Henri Poincaré, *La Science et l'Hypothèse*, chapitre IX.

⁶³ Article cité dans la note 5.