



Les émergences : quand la quantité se transforme en qualité

Jean-Louis BRETONNET
Professeur Émérite

02 02 2021

Dans *La Science de la logique*, Hegel [1] établit des lois sur les sciences du vivant et de la vie sociale pouvant être résumées par : "*au-delà d'un certain seuil, la quantité se transforme en qualité.*" Cela signifie que, parvenu à un certain niveau, un simple changement du nombre peut provoquer une différence de qualité. Pour le montrer, Hegel utilise de nombreux exemples dont le plus familier est le suivant. Un homme essaye de déplacer une charge, sans succès. Il appelle à l'aide un premier individu, sans plus de succès, puis un deuxième, puis un troisième... jusqu'au moment où, conjuguant leurs efforts, ils parviennent à bouger la charge. Ce mouvement a été rendu possible grâce au grand nombre de contributions cumulées dont la dernière a permis de mener l'opération à bien. Le but est de saisir à temps l'instant critique où la quantité se change en qualité.

Tant que le nouvel état ne s'est pas manifesté, on ne voit pas comment il pourrait se révéler, tant l'ordre précédent semble le seul possible dans l'environnement existant. Aussitôt qu'il est apparu, c'est lui qui semble normal et inéluctable. Les propriétés imputées à la transition d'un état dans un autre sont aussi qualifiées d'*émergentes*. Le concept d'émergence apparaît dans tous les domaines des sciences, chaque fois qu'il se produit des sauts qualitatifs [2].

La géophysique et la climatologie abondent en changements brusques qualifiés de révolutionnaires par les spécialistes. Parmi ces révolutions il y a la formation de l'atmosphère, l'apparition de l'ozone et celle de l'eau, la formation des continents, les périodes de glaciation etc. Le mécanisme d'oxygénation de la planète, qui s'est développé lentement jusqu'au moment où l'oxygénation s'est auto-entretenu grâce à la photosynthèse de la chlorophylle, est un exemple typique.

Les sciences du vivant et les sciences sociales regorgent de phénomènes émergents tels que l'apparition de la vie anaérobie, les changements d'espèces, la diversification du vivant, l'extinction de certaines espèces animales, l'émergence du langage et de l'art, l'apparition de nouvelles formes d'organisations des sociétés après destruction des précédentes, etc. La physiologie humaine et les rythmes biologiques donnent également de multiples exemples de sauts qualitatifs. Bien que la discipline remonte à Hippocrate,

il a fallu attendre le 19^{ème} siècle avant que soient acceptées les théories darwiniennes décrivant l'évolution des espèces vivantes. A des moments précis de la vie s'enclenchent des processus de croissance de l'embryon (nidation, gastrulation), de lancement des hormones, de développement des organes...

Dans le domaine médical on parle de maladies émergentes pour désigner des infections nouvelles causées par l'évolution ou la modification d'un agent infectieux ou d'un parasite existant. Parmi ces maladies on compte la peste et la syphilis, ainsi que les pandémies dues à certains virus fortement pathogènes (SIDA, SRAS, Ebola, H5N1... et Covid-19). L'OMS estimait en 1997 que les maladies émergentes sont responsables du tiers des décès dans le monde.

Mentionnons encore quelques exemples majeurs de sauts qualitatifs (pris au hasard) qui ont changé le monde au cours des deux derniers siècles, comme les révolutions industrielles qui ont libéré l'homme de ses tâches subalternes : la machine à vapeur (1850), l'énergie électrique (1900), l'énergie nucléaire (1950), l'internet et les nouvelles technologies (2000). Aujourd'hui c'est la révolution numérique qui transforme notre vie au quotidien, demain ce seront la révolution transhumaniste et la conquête de l'espace qui seront en passe de faire émerger une humanité nouvelle [3].

Les premiers changements de la quantité en qualité ont été observés en thermodynamique. Parmi ceux-ci, le plus connu est la transition liquide-vapeur : il est impossible d'augmenter la température d'un liquide au-delà de sa température de vaporisation. Tant que ce seuil de température n'est pas atteint, la transformation thermodynamique est continue et réversible. Or, dès que la température de vaporisation est atteinte, un apport supplémentaire d'énergie provoque une modification spectaculaire du système et l'apparition de la phase vapeur dont le comportement collectif ne ressemble pas à la phase initiale.

A partir du 17^{ème} siècle, la révolution copernicienne (dans laquelle Copernic voit les choses à partir du Soleil) a eu une influence décisive dans tous les domaines de la connaissance scientifique. En 1609, Kepler pressentit que les planètes décrivent des

ellipses autour du Soleil. La découverte des relations mathématiques qui régissent leurs mouvements a permis de confirmer les résultats d'observations de Tycho Brahe. Ces relations furent ensuite exploitées par Newton à partir de 1666 pour élaborer la théorie de la gravitation universelle.

En 1789, l'introduction du système métrique décimal sur la recommandation de l'Académie des Sciences fut une véritable révolution dans le calcul des poids et mesures car les conversions étaient ainsi devenues beaucoup plus simples.

A la fin du 19^{ème} siècle, la physique semblait avoir atteint un degré d'achèvement considérable. Elle contenait deux grandes disciplines, la mécanique classique pour expliquer le mouvement des planètes et l'électromagnétisme qui connut son aboutissement avec les équations de Maxwell. Ayant eu l'intuition que la chaleur résulte de l'agitation aléatoire des atomes, Boltzmann fit émerger la nature probabiliste de l'entropie en concluant que la transition vers l'équilibre thermique correspond à une transition d'un état moins probable vers un état plus probable. Ce résultat permit d'inclure la thermodynamique dans la mécanique. Ainsi, la physique appliquait sous sa forme la plus stricte le programme de Descartes en cherchant à donner une représentation mécanique des phénomènes qu'elle étudiait.

Au début du 20^{ème} siècle, une incompatibilité entre la mécanique classique et l'électromagnétisme est apparue lorsqu'on voulut étudier le mouvement des électrons dans les atomes. En effet, les électrons rayonnant lorsqu'ils sont en mouvement accéléré, les atomes devaient émettre un rayonnement continu pendant que les électrons se rapprochaient du noyau ! La question fut résolue lorsque Bohr acquit la conviction que les électrons dans les atomes ne rayonnent que s'ils passent d'une orbite stable sur une autre plus proche du noyau. Les travaux de Bohr, Planck, Einstein... sur la quantification des niveaux d'énergie ont grandement contribué aux développements de la mécanique ondulatoire et de la mécanique quantique.

Une autre grande étape de la physique a été l'utilisation de la simulation qui a véritablement pris naissance au milieu du 20^{ème} siècle avec la fameuse expérience de Fermi-Pasta-Ulam (FPU) réalisée sur le plus puissant ordinateur de l'époque construit au Los Alamos National Laboratory. Cette expérience avait pour but de vérifier, par simulation, qu'un système composé de quelques dizaines d'oscillateurs couplés se comporte comme un système de mécanique statistique. En d'autres termes, il s'agissait de vérifier l'hypothèse d'ergodicité selon laquelle tous les points

de l'espace des phases sont explorés avec la même probabilité.

De l'observation du Soleil et de ses planètes à celle des étoiles et des galaxies, on est arrivé aujourd'hui à s'intéresser aux trous noirs. En mai 2019, les interféromètres Virgo et Ligo ont détecté simultanément des ondes gravitationnelles émises par des trous noirs issus de l'effondrement d'étoiles massives, dont l'existence avait été prédite par Einstein il y a cent ans. Les signaux reçus se sont révélés si complexes que les scientifiques ont mis plus d'un an à les comparer aux résultats des modèles théoriques d'évolution stellaire et à les exploiter. En septembre 2020, ils ont conclu que ces ondes gravitationnelles avaient été émises par la coalescence de deux trous noirs de 80 et 65 masses solaires. C'était une découverte exceptionnelle car on n'avait encore jamais observé de trous noirs avec une telle masse. Elle constitue le point de départ d'une nouvelle phase l'exploration qui permettra de comprendre l'origine et l'évolution des trous noirs super-massifs (plus de 1 000 000 masses solaires). Comme toute grande découverte, celle-ci pose plus de questions qu'elle n'apporte de réponses définitives sur les scénarios de l'évolution de l'Univers.

C'est grâce à la conception d'instruments de plus en plus sophistiqués, à l'invention de théories de plus en plus abstraites et à l'intelligence du génie humaine que progresse la connaissance scientifique. Les quelques exemples présentés ici permettent de suivre la succession des découvertes qui ont jalonné le développement des activités scientifiques dont certaines reposent sur des modèles de rupture. Plutôt que d'opposer systématiquement réductionnisme - fondé sur la méthode analytique - et émergentisme - fondé sur la méthode systémique -, il paraît raisonnable de penser que ces deux méthodes sont complémentaires l'une de l'autre [4]. Lorsqu'un nouveau modèle vient d'être établi, on lui fait subir les tests de validation pour vérifier qu'il est compatible avec les modèles anciens [5]. Si les tests ne sont pas satisfaisants, le modèle est réfuté.

[1] G. W. F. Hegel, *La Science de la logique*, traduit par G. Vera, 1885. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9690564d/f390.item.texteImage>

[2] P. Juignet, Le concept d'émergence. <https://philosciences.com/administration-du-site/legal/13-philosophie-generale/systemique-complexite-organisation-structure/38-le-concept-d-emergence>

[3] A. Dupas et C. Chatelin, *Le destin cosmique de l'humanité*, Odile Jacob, 2020.

[4] R. B. Laughlin, *Un univers différent*, Fayard, Paris, 2005.

[5] T. S. Kuhn, *La Structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 1972.