

Le concept d'émergence

Hervé ZWIRN

IHPST, UMR 8590 CNRS/Paris 1, France
CMLA, UMR 8536 CNRS/ENS Cachan, France

Les sciences de la complexité ont pour objet l'étude et la prédiction du comportement des systèmes composés d'un grand nombre de constituants en interaction. Ces systèmes, dits "complexes" sont omniprésents. C'est bien sûr en biologie qu'on en rencontre le plus fréquemment. Ainsi, une cellule vivante, le cerveau, le système immunitaire, le système génétique sont des systèmes complexes. Mais un réseau aimanté, une galaxie, un marché financier, une colonie de fourmis et même Internet en sont également. John von Neumann, le père de l'ordinateur, avait prédit à juste titre qu'elles seraient les sciences du 21^e siècle. Pourquoi les systèmes complexes sont-ils difficiles à prédire ? C'est ce que nous allons essayer de comprendre. Disons tout de suite qu'une des raisons de cette difficulté provient du fait que certaines de leurs propriétés globales, bien que résultant des interactions de leurs constituants, semblent inattendues et impossibles à prévoir à partir de la connaissance qu'on peut avoir du comportement de ces constituants. Ces propriétés globales sont qualifiées d'émergentes. Au delà d'une intuition simple, définir correctement ce qu'on entend par là n'est pas trivial car le concept d'émergence, bien qu'il ne soit pas nouveau, peut se comprendre dans des sens plus ou moins forts et plus ou moins objectifs.

Les premiers émergentistes¹

Au siècle dernier, John Stuart Mill, Alexander Bain et George Henry Lewes furent les premiers à s'intéresser à la différence entre effets résultants et effets émergents dans le cas où plusieurs causes se combinent. Mill introduisit ainsi la distinction entre les effets *homopathiques* qui se réduisent à la somme des effets de chacune de leurs causes et les effets *hétéropathiques* pour lesquels une telle réduction est impossible. Lewes semble être le premier à avoir introduit le terme *émergent*. Selon lui, alors que tout effet est bien la résultante de ses facteurs, il n'est pas toujours possible de suivre les étapes du processus qui permet de retrouver dans le produit des facteurs, le mode d'opération de chacun d'entre eux. C'est ce dernier type d'effets, hétéropathiques au sens de Mill, qu'il propose d'appeler émergents. Il ajoute que ce qui émerge n'est pas comparable aux constituants qui lui ont donné naissance car ce n'est réductible ni à leur somme ni à leur différence. On doit peut-être voir là le premier énoncé de la phrase (galvaudée par la suite) "le tout est plus que la somme de ses parties". Au début des années vingt, Samuel Alexander et Lloyd Morgan utilisèrent cette distinction pour bâtir une théorie connue sous le nom d'"évolutionnisme émergent" selon laquelle l'univers se développe à partir de ses éléments de base en faisant apparaître des configurations de plus en plus complexes. Lors de cette croissance et lorsque la complexité franchit certains seuils, des propriétés réellement nouvelles émergent et ce processus conduit à des niveaux d'organisation hiérarchiques successifs. Selon Alexander, quatre niveaux principaux sont à distinguer dans l'évolution de l'univers : tout d'abord l'apparition de la matière à partir de l'espace-temps, puis l'émergence de la vie à partir des configurations complexes de la matière, puis celle de la conscience à partir des processus biologiques et enfin, l'émergence du divin à partir de la conscience. A la même époque (1925), C.D. Broad utilisa le concept d'émergence comme moyen de sortir du débat entre vitalistes et mécanistes. La thèse mécaniste prétend que la vie et les phénomènes biologiques peuvent être expliqués entièrement par les lois de la nature appliquées aux seules entités matérielles. La thèse

¹ Emergence or Reduction, A. Beckermann, H. Flohr, J. Kim éditeurs, de Gruyter (1992).

vitaliste, elle, postule l'existence de certaines entités non matérielles comme l'"élan vital" ou l'"entéléchie" qui seraient présentes dans les organismes vivants et absentes dans les objets inanimés. Broad proposa comme issue au conflit une théorie émergentiste, intermédiaire entre vitalisme et mécanisme, qui repose comme la théorie mécaniste sur le fait que les phénomènes de la vie proviennent uniquement d'entités purement matérielles mais qui suppose de plus, que le comportement de certains ensembles de constituants (ceux par exemple qui sont des systèmes vivants) ne puisse, même en principe, être déduit de la connaissance du comportement de leurs constituants. Ceci permet d'adopter une position selon laquelle d'une part, rien d'autre que des entités matérielles n'existe dans les êtres vivants et d'autre part, la connaissance des lois de la nature et du comportement de chacun des constituants d'un système biologique ne permet en aucun cas de prédire a priori que le système global est vivant.

Ce qu'il faut retenir des positions émergentistes de cette époque est la caractéristique suivante du concept d'émergence sur lequel elles reposent et qui a été précisément décrit par Broad. Une loi L (ou une propriété P) émergente à un certain niveau A est :

- 1) entièrement due à la configuration adoptée par les constituants de niveau inférieur B
- 2) totalement irréductible en ce sens qu'il serait impossible, même avec la connaissance complète des propriétés des constituants du niveau inférieur B et des capacités de calcul infinie, de prédire que le niveau A obéit à la loi L ou (possède la propriété P).

Ce qui émerge est donc à la fois totalement dû au niveau inférieur et nouveau par rapport à celui-ci.

Ce matérialisme non réductionniste peut se comprendre lorsqu'on se replace dans le contexte scientifique de l'époque. La mécanique quantique n'était pas encore née et l'énigme des liaisons chimiques embarrassait tous les scientifiques. Aucune explication cohérente des raisons pour lesquelles certains éléments se liaient à d'autres en donnant de nouveaux éléments aux propriétés totalement différentes de leurs constituants n'était disponible. Il était donc tentant de postuler que certains arrangements, certaines configurations, donnaient naissance à de nouvelles forces fondamentales donc à de nouvelles lois, qui n'étaient en rien réductibles aux lois connues. J'appellerai cette thèse, la thèse émergentiste forte. L'avènement de la mécanique quantique et les explications qu'elle fournit quant à la nature des liaisons chimiques ont rendu la thèse émergentiste forte à la fois inutile et peu probable, même si l'énigme des relations entre les états mentaux et leur substrat matériel a aujourd'hui pris la place de celle des liaisons chimiques. La possibilité, récente grâce à la puissance accrue des ordinateurs, de calculer ab initio les propriétés d'une molécule à partir de ses constituants est un démenti clair apporté aux tenants de l'irréductibilité de la chimie à la physique. Plus personne aujourd'hui ne défend réellement l'idée selon laquelle il existe des lois ou des forces qui sont dues aux configurations adoptées par les constituants d'un système et qui sont non réductibles aux lois de la physique standard. Ce qui reste de la notion d'émergence est donc une version faible selon laquelle une propriété ou un processus sont émergents à un niveau donné d'un système physique si, bien que réductibles en principe aux propriétés des constituants de niveau inférieur, il semble impossible de prédire leur survenance a priori à partir de la connaissance, même complète, de ces propriétés. Cette exigence n'est évidemment pas sans poser de nombreux problèmes, comme celui de savoir ce qu'on entend précisément par prédire.

Le renouveau du débat

Le débat autour de l'émergence a connu un renouveau ces dernières années en raison de plusieurs avancées importantes à la fois sur le plan conceptuel et sur le plan pratique. L'étude des systèmes non linéaires (qui a été popularisée sous le nom de chaos déterministe) a tout

d'abord montré l'importance des phénomènes d'auto organisation. Ceux-ci se manifestent par exemple dans de nombreux systèmes chimiques dont l'évolution à partir d'un état initial homogène fait apparaître spontanément des motifs ordonnés ou des oscillations. C'est le cas de la célèbre réaction de Belousov-Zhabotinsky dans laquelle la couleur de la solution passe périodiquement du rouge au bleu. Alors que la plupart des réactions chimiques évoluent de manière monotone, on est là en présence d'une oscillation interdite par la thermodynamique linéaire qui ne se comprend que grâce au fait que les équations modélisant la réaction sont non linéaires. On a aussi découvert le fait qu'un comportement complexe n'est pas obligatoirement dû à des règles qui le sont. Un exemple frappant de cela est donné par les automates cellulaires² dont les règles extrêmement simples peuvent engendrer des comportements qui défient toute tentative de prédiction a priori, voire semblent totalement aléatoires (voir l'article sur les automates cellulaires). C'est l'augmentation considérable de la puissance des ordinateurs qui a permis d'explorer leur comportement ainsi que celui de nombreux systèmes qui autrement seraient restés hors de portée. Lorsqu'un système n'est pas complexe, son comportement résulte d'une manière plus ou moins simple du comportement de ses parties (voir encadré 1). Lorsque le système est complexe une telle décomposition est impossible. Il en résulte que la prédiction du comportement devient plus problématique. Bien entendu, cela ne veut pas dire obligatoirement qu'elle est impossible à partir de méthodes analytiques mais elle passe alors par des équations non linéaires qui souvent n'ont pas de solutions analytiques exactes. Devant une telle situation, simuler le comportement des constituants du système et de leurs interactions sur un ordinateur est la meilleure méthode pour déterminer quel sera le comportement global du système. C'est ce qu'on appelle la simulation à base d'agents, un agent pouvant être aussi bien une particule élémentaire n'ayant que des interactions simples avec les autres particules, qu'un individu conscient ayant lui-même un comportement sophistiqué (voir encadré 2). Lorsqu'on simule un système complexe, il devient clair que le comportement global d'un ensemble de constituants peut à la fois résulter directement du comportement simple de chacune de ses parties et être néanmoins différent de ce qu'on aurait pu intuitivement anticiper de la connaissance de ces constituants. Le concept de phénomène émergent a donc perdu l'aspect quelque peu "magique" qu'il pouvait avoir dans la conception de Broad, pour qualifier aujourd'hui un phénomène qui se manifeste à un niveau global et qu'il semble difficile de réduire de manière évidente aux propriétés des constituants qui lui donnent naissance. Ce glissement de sens a été grandement facilité par la possibilité de simuler sur ordinateur le comportement des systèmes étudiés.

Emergence objective ou subjective ?

Tel que nous l'avons défini, le concept d'émergence semble donc reposer sur la difficulté que nous éprouvons à relier intuitivement ce que nous observons au niveau global aux lois qui régissent le niveau des constituants. L'émergence serait donc une propriété dépendant de nos capacités intellectuelles humaines. Pour éviter cette conclusion, certaines définitions objectives de l'émergence ont été proposées. Il est devenu courant de distinguer deux types d'émergence : l'émergence synchronique et l'émergence diachronique. L'émergence synchronique fait référence à l'identification à un instant donné d'une structure ou d'une propriété, présente dans le système à un certain niveau et absente ou non pertinente aux niveaux inférieurs. D'une certaine manière, la reconnaissance d'un visage dans un tableau pointilliste, invisible tant que l'on est trop près mais qui apparaît lorsqu'on se met à la bonne distance est un bon exemple d'émergence synchronique. La reconnaissance de la structure fractale des côtes qui ne se manifeste qu'à partir d'une certaine hauteur d'observation, mais aussi les états mentaux qui émergent du fonctionnement des neurones sont d'autres exemples

² A New Kind of Science, S. Wolfram, Wolfram media (2002).

classiques. L'émergence synchronique a été associée par certains à une baisse soudaine de la complexité algorithmique (voir l'article de Jean-Paul Delahaye) descriptionnelle du système. Cette définition repose sur le fait que l'identification d'une structure au niveau global permet de donner une description du système beaucoup plus concise que celle qui consisterait à décrire individuellement chaque constituant. L'émergence diachronique concerne elle, le comportement dynamique du système. La succession des états d'un automates cellulaire, les oscillations de certaines réactions chimiques, la création d'anneaux autour de Saturne en sont des exemples. L'émergence diachronique est souvent définie de la manière suivante : étant donné un système qui évolue dans le temps, on qualifiera son comportement d'émergent si et seulement si le seul moyen de prédire son évolution est de simuler le fonctionnement du système. L'idée de base est qu'il n'y a aucun moyen plus rapide que d'observer le système lui-même (à travers une simulation sur ordinateur) pour savoir comment il va se comporter. C'est ainsi que Wolfram a avancé l'idée selon laquelle la succession des états de certains automates cellulaires ne pourrait être prédite qu'en simulant leur fonctionnement. En d'autres termes, il n'y aurait aucun raccourci permettant de connaître directement l'état de l'automate à la millième itération. Prédire cet état exigerait de passer au préalable par les 999 étapes précédentes. Wolfram ne prouve cependant aucunement ce qu'il avance et cette définition demande de toute façon à être rendue rigoureuse, ce qui pose un certain nombre de difficultés non triviales. Mais, en première approximation, on peut conserver l'intuition sur laquelle elle repose et qui peut être formulée de manière objective.

Compréhension

Qu'en est-il de la compréhension des phénomènes émergents ? La notion de compréhension n'est pas simple et nécessiterait à elle seule de longs développements mais il semble que les deux éléments suivants y jouent un rôle important. On dit qu'on a compris un phénomène lorsque : 1) on a identifié les règles qui l'engendrent 2) on peut suivre mentalement les étapes qui, d'un état initial connu aboutissent à l'apparition du phénomène ou de l'état final à expliquer. Si l'application répétée des règles simples d'un automate cellulaire me montre à l'évidence que tel pattern va apparaître (par exemple une alternance de cases noires et blanches), je dirai que je comprends le comportement de cet automate et qu'il n'est pas émergent. Si en revanche l'application répétée des règles n'est pas possible mentalement (par exemple pour l'automate obéissant à la règle 101) alors, je qualifierai le comportement d'émergent et je ne le comprendrai pas. A la réflexion cependant, il semble que les deux situations diffèrent seulement par une question de degré et ne soient pas réellement de nature différente. "Comprendre", c'est en partie être capable d'enchaîner mentalement les étapes d'un processus menant d'un état initial à un état final. Lorsque ces étapes sont trop nombreuses ou trop intriquées pour que cela soit possible, il faut recourir à la simulation sur un ordinateur et la sensation de compréhension s'évanouit. On peut donc défendre l'idée que la compréhension est en partie la possibilité d'une simulation mentale. On pourrait alors faire la distinction entre deux concepts d'émergence : un concept d'émergence subjective qui serait applicable lorsqu'un processus est trop complexe pour que nous puissions suivre mentalement la manière dont il se produit et un concept d'émergence objectif qui serait lié au fait qu'il n'existe aucun moyen plus rapide pour prédire le comportement du système au cours de son évolution que d'observer le système lui-même ou une simulation sur ordinateur. Le fait qu'il semble bien que, pour nous, un phénomène émergent au sens objectif l'est obligatoirement au sens subjectif pourrait alors n'être qu'une manifestation de nos limites humaines. Cette implication pourrait bien ne pas être absolue. Pour des êtres aux capacités supérieures aux nôtres, certains phénomènes émergents au sens objectif pourraient ne pas l'être au sens subjectif.