

DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE OU DU SIMPLE AU COMPLIQUÉ ?

Par Eric SURAUD*

Introduction

Ce texte se propose d'analyser la relation entre microscopique et macroscopique vis-à-vis de la simplicité, d'un point de vue physique. Autrement dit un système microscopique est-il plus simple, parce qu'élémentaire (nous reviendrons plus bas sur le sens précis à donner à ces termes) qu'un système plus compliqué/complexe parce que composite ? La relation est-elle directe et, surtout, aussi simple ? Mais cet argument « ascendant » (du simple au compliqué) peut aussi en quelque sorte être renversé. Dans quelle mesure en effet avons-nous besoin de systèmes simples pour comprendre les systèmes complexes ? Autrement dit, le passage « descendant » du macroscopique vers le microscopique s'assortit-il nécessairement d'une simplification ? Cette question d'apparence anodine et à laquelle la réponse peut paraître évidente soulève, à mon sens, une question plus générale et profonde que je qualifierais d'analytique. Formulée un peu brutalement on pourrait la résumer en se demandant si l'on a besoin du microscopique (« l'analytique ») pour comprendre le macroscopique (« le synthétique »). Ou encore dans quelle mesure a-t-on besoin du simple pour comprendre le complexe ? Il est évident que cette question déborde largement le cadre de la physique même si, en physique, elle a longtemps représenté, et représente toujours, un enjeu essentiel notamment en relation avec la question centrale de la structure de la matière.

Je vais donc concentrer mon analyse sur la structure de la matière et ce à diverses échelles, en illustrant mon propos par des exemples du monde microscopique, disons pour simplifier l'atome et ses constituants ou ses « dérivés », et du monde macroscopique, disons pour simplifier les objets à l'échelle humaine ou supra humaine. La matière et ses constituants représenteront donc un point de passage obligé que je vais rapidement rappeler pour fixer le vocabulaire. Essentielles également sont les interactions sans lesquelles ne peuvent exister de systèmes composites en tant qu'ensembles de composants élémentaires. Enfin, puisqu'il sera

*Communication présentée à l'Académie des Sciences, Inscriptions et Belles-Lettres de Toulouse à la séance du 21 novembre 2019

question de systèmes microscopiques je ne pourrai totalement éviter de parler de mécanique quantique, au moins sous certains de ses aspects les plus simples.

Le texte est organisé en trois parties. La première abordera la question du point de vue descendant : plus petit implique-t-il plus simple ? La seconde prendra en quelque sorte le point de vue opposé de questionner si plus grand implique plus simple. La troisième partie posera directement la question d'identifier où se trouve finalement la simplicité. Enfin je tirerai quelques conclusions elles-mêmes sources de nouvelles questions.

Plus petit implique-t-il plus simple ?

Pour fixer les idées il n'est pas inutile de rappeler brièvement quelle est la structure de la matière, sa composition en constituants élémentaires et quelles sont les interactions entre ces constituants élémentaires. Le mètre représente l'échelle macroscopique naturelle, celle de l'homme. La matière est composée d'atomes (au sens moderne du terme) liés entre eux par l'interaction électromagnétique, notamment la force électrique de Coulomb. Les structures atomiques s'organisent à l'échelle sub nanométrique (1 nanomètre = 1nm = 1 milliardième de m = 10^{-9} m) à des énergies de l'ordre de l'électron-Volt (eV) que nous prendrons comme unité de référence dans la suite. L'atome est lui même constitué d'un noyau central minuscule, typiquement quelques cent millièmes de la taille de l'atome, entouré par un nuage d'électrons liés au noyau par l'attraction coulombienne qu'il exerce sur eux. Les énergies des électrons par rapport au noyau sont variables, typiquement entre 1 et quelques milliers d'eV. Les noyaux sont eux aussi des objets composites, constitués de protons (le noyau d'hydrogène) et de neutrons, liés entre eux par l'interaction nucléaire forte qui compense notamment la répulsion coulombienne entre protons. A la taille très faible du noyau (facteur 100000 par rapport à l'atome) est associée une gamme d'énergie beaucoup plus élevée de l'ordre de quelques millions d'eV, suivant un mécanisme général (et bien compris) que les structures les plus petites impliquent les énergies les plus grandes. Enfin neutrons et protons sont eux-mêmes chacun composés de trois particules, cette fois-ci élémentaires (non composites, c'est-à-dire sans constituants), les quarks. Les énergies mises en jeu atteignent le milliard d'eV sur des distances du milliardième de nanomètre. Les quarks sont liés entre eux, dans les neutrons et les protons, par l'interaction nucléaire forte, l'interaction entre neutrons et protons n'étant en fait que le résidu des interactions entre quarks les constituant.

DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE OU DU SIMPLE AU COMPLIQUÉ ?

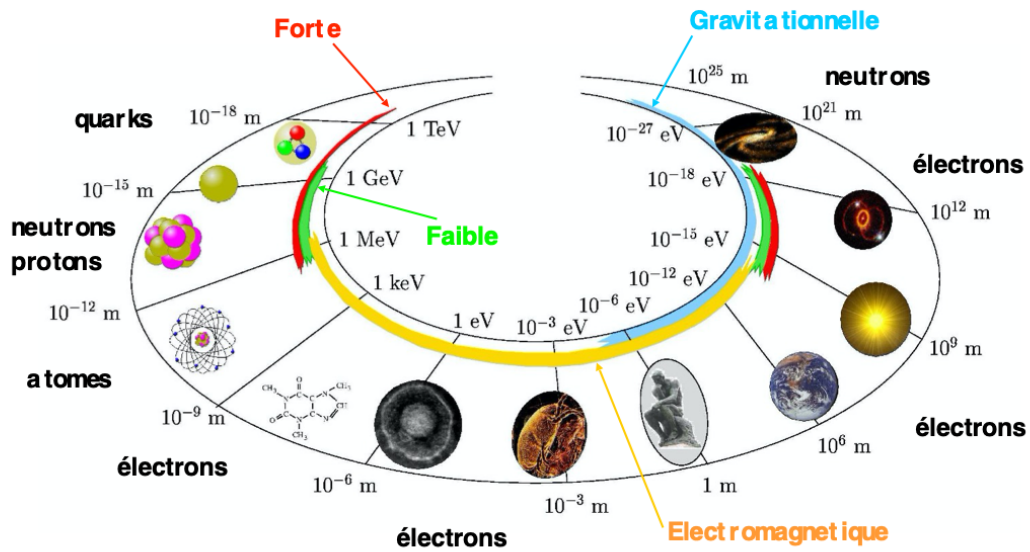


Figure 1 : Illustration des différentes échelles spatiales et énergétiques. Des exemples de systèmes caractéristiques d'une échelle donnée sont également fournis. Le domaine d'échelles où domine une interaction est indiqué pour chacune des quatre interactions fondamentales. Adapté de P.M. Dinh et al, « Océans et gouttelettes quantiques », CNRS Editions, Paris, 2007

Deux points importants sont à noter ici. Tout d'abord, dans la hiérarchie des échelles de la matière, c'est le niveau des quarks qui correspond à des constituants élémentaires sans sous-structure. Il existe bien entendu d'autres particules élémentaires, notamment les électrons. Pour le reste, toutes les particules, du proton à la molécule ou au solide, en passant par le noyau ou l'atome, sont des objets composites, « donc » a priori complexes. Par ailleurs les structures composites n'existent que grâce aux interactions qui elles-mêmes n'agissent pas sur toutes les particules. Seule la gravitation intervient dès que des masses sont en jeu (ce qui est le cas général), mais dans le monde microscopique son intensité est négligeable vis-à-vis des autres interactions. Il existe quatre interactions fondamentales. Outre la gravitation bien connue, et de peu d'importance ici, l'interaction coulombienne s'étend à toutes les échelles, de l'atome à l'échelle humaine dès que des charges sont en jeu, ce qui est toujours le cas via les électrons et les noyaux. Les interactions faibles et fortes ne deviennent dominantes que dans le monde subatomique (dans le noyau) ou les étoiles, et ne concernent que certaines classes de particules. Ces deux dernières interactions sont de très faible portée alors que l'interaction électrique, comme la gravitation, ont une portée infinie. Une illustration des échelles de la matière et des interactions est donnée sur la Figure 1.

La description des objets microscopiques (et de leurs interactions d'ailleurs) relève de la mécanique quantique qui attribue un caractère ondulatoire même aux particules massives. La description d'un objet microscopique, et plus encore d'un objet microscopique composite comme une molécule ou un noyau, requiert donc un traitement en termes d'ondes pour lesquelles les concepts de position ou de vitesse perdent leur sens courant pour laisser place à des concepts plus surprenants comme la diffraction ou l'effet Doppler. On connaît bien ce dernier effet pour les ondes sonores à l'échelle macroscopique, par exemple avec le bruit variable que nous percevons d'une voiture qui passe à côté de nous. La mécanique quantique, indispensable à cette échelle du monde physique, ajoute donc une complexité supplémentaire, tant sur le plan conceptuel que technique.

À l'issue de ce rapide tour d'horizon il n'est donc pas si évident que plus petit implique nécessairement plus simple. Le chemin vers le monde subatomique en représente un bel exemple. Et pourtant n'oublions pas qu'un des arguments majeurs des recherches sur la structure de la matière a toujours été, et demeure, de simplifier notre vision du monde. L'idée est que la simplification naît du nombre somme toute réduit de constituants élémentaires et du nombre d'interactions qui les lient. Le modèle actuel de cette structure de la matière, appelé « modèle standard » se réduit en effet à quelques particules élémentaires, liées par quatre interactions. La découverte récente du fameux boson de Higgs est venue encore renforcer le modèle standard, en expliquant l'origine des masses, mais des questions restent en suspens (notamment celle de la différence des masses entre particules de natures différentes). Nous touchons donc là du doigt une sorte de paradoxe qui allie la simplicité du faible nombre de briques élémentaires à la complexité de leurs arrangements. Là encore, conclure simplement que plus petit implique plus simple, demeure donc sans doute un peu rapide.

Plus grand implique-t-il plus simple ?

La contrepartie immédiate de la conclusion de la première partie est bien évidemment de se demander si ce ne sont pas, au contraire, les systèmes plus grands qui sont plus simples. Mais au regard de notre discussion précédente il semble évident que cette question est sans objet. Nous venons en effet de voir à quel point les systèmes composites, y compris dans le monde microscopique, sont complexes, mêmes lorsqu'ils ne sont composés que d'un nombre limité de constituants élémentaires. Il en va ainsi par exemple du neutron ou du proton, chacun constitué de trois quarks, mais dont les propriétés continuent de faire l'objet de recherches fondamentales, aussi bien expérimentales que théoriques. Le processus de radioactivité dite β^- est un bel exemple de cette complexité. Lors de la désintégration β^- d'un

DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE OU DU SIMPLE AU COMPLIQUÉ ?

noyau un neutron se transforme en proton parce qu'un de ses quarks s'est transformé en un autre quark. Ladite transformation implique l'apparition d'une troisième particule qui se trouve être instable et qui se désintègre sous forme d'un électron et d'une autre particule légère. Tout cela pour qu'un noyau du fameux Carbone 14 se désintègre en Azote et nous permette de dater une momie égyptienne !

Sans aller jusqu'à la complexité de la radioactivité β -, ni même s'encombrer des difficultés techniques de la mécanique quantique, comprendre par exemple la structure d'un liquide macroscopique, comme l'eau dans un verre, demeure un véritable challenge. Cela tient notamment à ce que l'on appelle les corrélations entre particules, qui reflètent justement les interactions multiples entre particules constituant un système. On mesure ces corrélations en étudiant la probabilité de trouver une particule en un point quelconque sachant qu'une autre particule est située en un autre point donné connu. Cette mesure va bien au-delà de caractéristiques moyennes du fluide comme sa densité, qui donne accès à la probabilité de trouver une particule (n'importe laquelle) en un point quelconque de l'espace. Mieux, ces corrélations sont caractéristiques de la structure du fluide et de l'arrangement des particules à l'intérieur du système, et reflètent donc bien les interactions multiples entre constituants du système. Mais les corrélations sont extrêmement difficiles à calculer et plus encore dans le monde quantique où des effets supplémentaires (non liés aux interactions) doivent être pris en compte.

Au total il semble donc difficile d'imaginer que plus grand puisse conduire à plus simple ? Et pourtant ce serait conclure un peu hâtivement. Il existe en effet de très nombreuses situations physiques que l'on peut comprendre de manière assez précise sans pour autant connaître les détails des composants du système ni de leurs interactions. Un exemple typique est donné par les modèles de percolation qui permettent d'expliquer, dans une très large mesure, de nombreux phénomènes comme la propagation des feux de forêts ou des épidémies, sans parler bien entendu de leurs applications en physique de la matière condensée. Et pourtant ces modèles ne contiennent que peu d'informations spécifiques aux systèmes auxquels on les applique. Une interaction modèle « de contact » entre plus proches voisins sur un réseau, par exemple dans le plan, suffit. On pourrait arguer qu'il s'agit là de systèmes très « macroscopiques » pour lesquels non seulement une approche quantique n'est pas envisageable mais qui plus est inutile. Et pourtant la mécanique quantique elle aussi conduit à des situations extrêmement « simples ».

La mécanique quantique nous enseigne que les particules se rangent en deux classes, les bosons et les fermions. Les fermions, de loin les plus nombreux parmi les particules élémentaires, comme les quarks ou l'électron, tendent (pour simplifier) à « s'éviter » lorsqu'ils « rencontrent » un fermion

identique. C'est le fameux principe d'exclusion de Pauli qui joue un rôle essentiel pour comprendre la structure de la matière. Les bosons, au contraire, tendent à se regrouper dans le même état, notamment lorsqu'ils se trouvent dans leur état d'équilibre. Aux interactions près (que l'on sait moduler expérimentalement) on atteint ainsi le fameux Condensat de Bose Einstein dans lequel un échantillon macroscopique de matière possède une représentation quantique ultra-simple, comme s'il s'agissait d'une seule particule quantique. L'exemple le plus emblématique d'une telle situation est le cas de l'Helium qui se comporte presque comme un condensat de Bose Einstein aux températures proches du zéro absolu. Mieux, et c'est là encore une propriété quantique, l'Helium perd à ces températures toute viscosité et, non content de demeurer à l'état fluide, devient superfluide. Il peut ainsi, pour le remplir, remonter les parois d'un tube à essais qui toucheraient ce liquide très particulier ! Au final la relation entre taille et simplicité est donc loin d'être « simple ». Mais alors où se trouve la simplicité ?

Où se trouve la simplicité ?

La première réponse est en quelque sorte triviale mais plus profonde qu'il n'y paraît. La première source de simplicité tient au choix des variables utilisées pour décrire un système, notamment un système complexe. Prenons à titre l'exemple la pression et la température pour caractériser l'état d'un gaz. Une pièce de 10 m² de surface contient environ 10²⁶ molécules en interaction. Dans les conditions habituelles le recours à la mécanique quantique n'est pas nécessaire ici et l'on peut se contenter d'une description mécanique « à la Newton ». On sait donc parfaitement écrire, et en principe résoudre, les équations du mouvement de toutes ces molécules, même si la tâche est quelque peu titanesque. Mais une telle démarche est un non-sens car on ne peut en tirer aucune information physique pertinente. Dans ce cas en effet pression et température sont les variables pertinentes, tant sur le plan théorique qu'opérationnel. La pression mesure la force moyenne exercée par les molécules sur les parois de la pièce et la température leur énergie cinétique moyenne, c'est-à-dire leur agitation. Il s'agit finalement de deux quantités simples mais ce sont les bonnes !

DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE OU DU SIMPLE AU COMPLIQUÉ ?

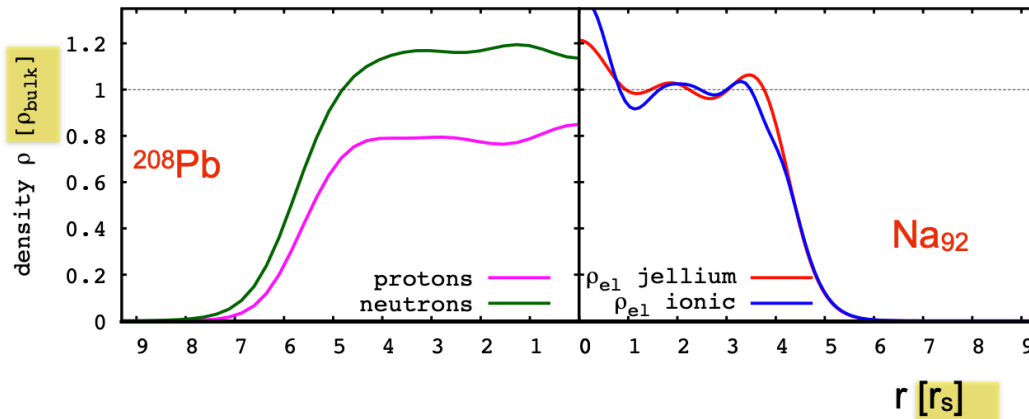


Figure 2 : Densité de neutrons et protons dans un noyau de Plomb (à gauche) et densité d'électrons dans une grosse molécule, un agrégat, de Sodium (à droite) comprenant un nombre comparable de particules chargées (dans le Sodium deux types de modèles pour les ions sont considérés mais conduisent à des résultats très semblables). Les échelles ont été choisies dans les variables « naturelles » de chacun de ces deux systèmes. L'échelle de densité est celle de la matière infinie correspondante $[\rho_{\text{bulk}}]$, directement liée au rayon de la sphère occupée en moyenne par l'un des constituants (neutron/proton ou électron) $[r_s]$. Dans ces échelles « naturelles » la similitude entre les deux systèmes est remarquable alors qu'ils diffèrent complètement dans leurs constituants et leurs échelles (facteur 100 000). Adapté de P. M. Dinh et al, in « Nuclear particle correlations and cluster physics », Edité par U. Schröder, *World Scientific*, Singapour, 2017

La simplicité naît aussi de la comparaison de systèmes apparemment très différents mais possédant des propriétés voisines. De telles situations ouvrent la porte à l'identification de quantités non spécifiques à un système donné et qui permettent de transférer la compréhension de l'un vers l'autre et vice versa. Prenons l'exemple illustré sur la Figure 2. Nous comparons sur cette figure les densités de matière à l'intérieur d'un noyau et d'une grosse molécule. Les échelles physiques (spatiale et énergétique notamment) diffèrent d'environ 5 ordres de grandeur (1 à 100000). Le noyau est constitué de neutrons et protons liés par l'interaction nucléaire forte en dépit de la répulsion Coulombienne entre protons. La molécule est constituée d'ions et d'électrons liés par l'attraction Coulombienne en dépit de la répulsion

Coulombienne entre électrons. Que peuvent bien avoir en commun de tels systèmes ? Il se trouve que ces deux systèmes peuvent être décrits par un modèle commun fondé sur la relative indépendance de leurs constituants et sur le fait que les constituants principaux sont des fermions. Et le résultat est surprenant. En utilisant les bonnes unités (fournies par le modèle) la comparaison est frappante, sur le plan qualitatif voire au niveau quantitatif. Le même modèle permet d'ailleurs de comprendre la structure des Naines blanches, ces étoiles fossiles de petite taille : un changement d'échelle encore plus vertigineux.

Il reste un dernier aspect que je voudrais évoquer et qui pourrait paraître paradoxal, parce qu'il comporte une dimension liée au hasard, traditionnellement associé à une insuffisance de compréhension. Nous avons déjà rencontré cette question dans le cadre des modèles de percolation dont nous avons souligné la simplicité et l'économie de moyens. Dans ce cas, finalement, un simple critère statistique sur le remplissage du réseau suffit à expliquer le comportement global du système. Dans le même ordre d'idées on pourrait considérer le cas de la température. Notre vision « standard » de la température l'associe au désordre puisque les hautes températures correspondent à une forte agitation des particules constituant un système. Ainsi dans un corps simple, comme l'eau à la pression atmosphérique, les températures inférieures à 0 degrés Celsius correspondent à une phase solide (même si l'on ne peut pas dans ce cas parler d'une phase ordonnée) et les températures supérieures à 100 degrés Celsius correspondent à la phase gazeuse. On évolue ainsi d'une phase compacte (la glace) à une phase volatile (la vapeur ou le gaz), en passant par la phase liquide intermédiaire, par simple augmentation de la température. En résumé la température a augmenté le « désordre » du système, ce qui peut simplement se mesurer par exemple par la capacité du système à remplir un volume plus ou moins grand. Le cas de l'eau est générique, l'ordre à basse température étant par exemple typique des solides comme les métaux. Et pourtant on peut aussi voir la température comme un facteur d'ordre, au sens où elle permet une compréhension simplifiée d'une situation physique. Pour illustrer ce point prenons un exemple proposé par N. Bohr dans les années 1930 pour analyser les collisions entre un noyau et un neutron (situation typique par exemple des processus de fission nucléaire). La Figure 3 reprend des illustrations originales de N. Bohr.

DU MICROSCOPIQUE AU MACROSCOPIQUE OU DU SIMPLE AU COMPLIQUÉ ?

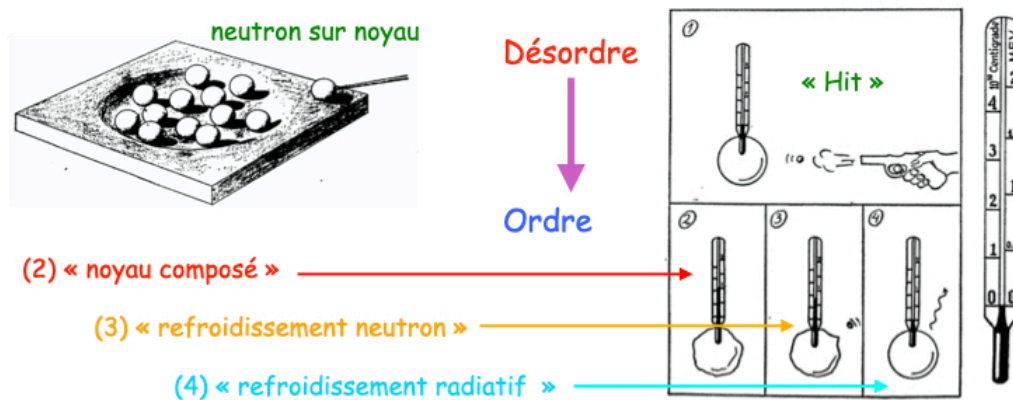


Figure 3 : Schéma de l'excitation d'un noyau par un neutron projectile (partie gauche) suivie de la désexcitation du système par thermalisation (partie droite). On notera les différentes phases de désexcitation après formation d'un noyau composé. Adapté de N. Bohr, « Niels Bohr Collected Works », Vol 9, Elsevier, Amsterdam, 1986

N. Bohr représente son noyau comme un assemblage de neutrons et protons liés entre eux (coupelle). A la manière d'une boule de billard le neutron projectile pénètre le noyau et perturbe le système qui va se réarranger. Pratiquement, l'énergie supplémentaire apportée par le neutron projectile va se répartir entre tous les constituants du nouveau système (qualifié de noyau composé). Il s'agit d'un processus de thermalisation qui finit par attribuer une température au système. Le point intéressant c'est que cette température caractérise complètement l'évolution ultérieure du noyau composé. Puisqu'il est chaud il va avoir tendance à se refroidir par émission de neutrons (les plus faciles à libérer), puis sur le plus long terme par émission radiative de lumière (non visible). Ces processus d'émission sont de nature statistique, complètement caractérisés par la seule température atteinte, elle-même directement liée à l'énergie déposée par le neutron projectile. Finalement, le processus dynamique extrêmement complexe d'excitation du noyau cible par un neutron, suivi du réarrangement des neutrons et des protons et du partage de l'énergie disponible, se réduit à caractériser le système par un seul chiffre, sa température. Cette dernière est d'ailleurs facile à mesurer dans ce cas, en étudiant les énergies des particules émises. On se retrouve donc dans un cas, assez fréquent en fait, dans lequel la température, par sa caractérisation de l'état d'un système, en rend sa description simple. On est dominé par les effets statistiques associés à la température.

Conclusion

Ce petit texte a abordé la question de la relation entre élémentarité et complexité. L'idée était d'examiner la question de savoir si la simplicité naît de l'élémentarité. Cette idée est sous-jacente à de nombreuses investigations, notamment en physique, dans lesquelles on s'attache à parfaitement comprendre un système « simple » en espérant que sa compréhension nous donnera accès à la compréhension d'un système plus complexe. Pour analyser cette question nous nous sommes restreints à la physique et plus spécifiquement aux questions tournant autour de la structure de la matière. Nous avons vu en particulier que même les systèmes simples peuvent être extrêmement complexes alors que des systèmes composites, a priori impossibles à atteindre au niveau microscopique, sont compréhensibles, parfois assez simplement, pourvu que l'on ait identifié les bonnes variables qui les caractérisent. La compréhension microscopique de la matière n'explique donc pas forcément la matière à l'échelle macroscopique. Par ailleurs le microscopique est complexe (structure de la matière, interactions, mécanique quantique...). Et même si le macroscopique est lui aussi complexe (problème à plusieurs corps, corrélations, mécanique quantique...) il est possible de comprendre simplement des systèmes macroscopiques, même sans bien connaître leurs constituants microscopiques (situation physique, variables pertinentes, caractère générique...). Ces conclusions se fondent sur des exemples tirés de la physique mais il serait tout à fait intéressant et pertinent de considérer d'autres situations semblables dans d'autres domaines scientifiques.