

ALEAS ET DETERMINATION

Sur les indéterminations, leurs sources et leurs limites

Nous nous poserons maintenant la question : quel sens peut on donner au mot "aléatoire" ? comment le hasard se présente-t-il dans les sciences de la nature aujourd'hui ? Y-a-t-il un aléatoire propre aux différents domaines de la physique ? quel impact a-t-elle cette éventuelle différenciation/unité de la notion d'aléas physique sur le concept commun/scientifique de hasard ? est-elle corrélée aux différents outils mathématiques mis en place (continus vs. discrets, par exemple) ?

Nous réfléchissons d'abord à la physique classique, pour nous poser le problème de ce que veut dire aléatoire dans le contexte de différents cadres théoriques. Nous verrons que les systèmes dynamiques et la physique quantique proposent, indépendamment, des notions très importantes, mais non identiques, de *hasard*, donnant lieu à un rôle différent des probabilités dans leurs différents contextes. Notre critère de distinction fera référence à la notion d'"épistémique" en tant que contraposée à celle d'"objectif", la différence se rapportant au rôle du sujet connaissant dans la construction de l'objectivité scientifique, rôle essentiel en physique moderne, en particulier quand il est question de probabilité et de hasard. Bref, on se posera d'abord le problème de savoir si les choix de traitements d'une suite désordonnée (ou, plus généralement, d'un état désordonné) comme effet d'un déterminisme chaotique ou d'un aléatoire pur relèvent de l'épistémique ou de l'objectif ? En l'absence de théorèmes très généraux en la matière (qui contribueraient à une constitution d'objectivité¹), nous pouvons développer une argumentation qui aura pour effet de déplacer quelque peu le problème tout en mettant plus clairement en évidence certaines des contraintes qu'il implique.

Nous développerons la thèse qu'en physique classique l'aléatoire est de nature "épistémique", ce qui voudra dire, en particulier, qu'on pourra toujours interpréter une suite apparemment aléatoire comme issue d'un déterminisme chaotique ou comme issue d'un aléatoire pur, analysable en *termes statistiques*, selon le regard que l'on assume (pour l'affirmer, nous supposons que l'on peut s'appuyer sur des théorèmes d'équivalence suffisamment généraux). Par contraste, on appellera "objectif" l'aléatoire propre à la mécanique quantique. Notre argument se basera sur deux éléments justifiant cette distinction. L'un centré sur le rôle de la détermination théorique, du "regard" (du cadre théorique proposé) et de la mesure, l'autre, plus fort en un certain sens, fondé sur les propriétés de non-séparabilité quantique et du continu mathématique, dont on parlera longuement.

1. Chaos déterministe et aléatoire mathématique : le cas de la physique classique.

Commençons donc par analyser l'aléatoire classique. Dans ce but, nous admettons l'idée selon laquelle le *résultat* d'un jet de dé, par exemple, que l'on considère légitimement comme aléatoire, peut être interprété comme tel du fait que le système des équations et contraintes permettant de le prévoir (de façon déterministe donc) est (très) sensible aux conditions initiales². Bref, du point de vue moderne (post-laplacien), même ce système, paradigme de l'aléatoire, est bien déterministe, dans le sens qu'un nombre suffisant (en fait très grand) d'équations pourraient théoriquement décrire toutes les forces en jeu, toutes du reste bien connues (gravitation, frictions diverses...). Toutefois, cela nous dirait très peu sur son évolution : ce système classique est si sensible à la moindre variation des conditions au contour, de surcroît très nombreuses, que l'effort théorique de décrire les (dizaines ?) équations le déterminant, ne nous aiderait pas en pratique. Et son évolution reste tout à fait imprédictible : c'est cela qui nous le fait considérer, dans un cadre classique, comme aléatoire tout en étant déterministe (chaotique).

¹ Comme c'est le cas pour les systèmes mélangeant (dynamiques de Bernoulli) dont on montre qu'ils peuvent être équivalents à (et donc interpréter comme) des suites aléatoires du genre de "pile ou face", nous y reviendrons.

² Bien entendu, le problème inverse est très différent : un système dynamique défini par ses équations et présentant un comportement chaotique a un caractère objectif associé à ces équations elles-mêmes et à leurs propriétés intrinsèques (il est décrit/donné par des objets physiques, avec leurs propriétés, leurs invariants, leurs symétries...).

Un exemple moins familier mais plus simple peut aussi être mentionné. Considérons un double pendule. Il s'agit ici d'un pendule à deux battants dont le second est articulé sur le premier ; au point d'articulation on place un deuxième poids. Ce mécanisme simple, parfaitement déterminé par deux équations (il a deux degrés de liberté), a un comportement chaotique : ses trajectoires sont denses (les poids vont partout, dans les limites des contraintes), il est sensible aux conditions initiales. Encore une fois, l'évolution du système paraît aléatoire à tout observateur, malgré la simplicité apparente de la détermination. C'est là un autre cas d'aléatoire épistémique, qui en fait pourrait être aussi analysé en termes de suite aléatoire (en écrivant 0 ou 1 suivant que le poids inférieur se trouve à droite ou à gauche après 10 oscillations, par exemple)³.

Un dernier exemple classique, et des plus pertinents car il a fait démarrer toute l'analyse de l'imprédictibilité déterministe, est le "problème des trois corps" dans leur champ gravitationnel. Poincaré, en démontrant l'impossibilité de résoudre de façon élémentaire et directe (par des fonctions "simples", disons), ni analytiquement (par des séries convergentes) le système des neuf équations de Newton-Laplace qui en décrivent le mouvement, a permis l'analyse que nous venons de faire : la détermination classique peut ne pas impliquer la prédictibilité. Par ce résultat, il a ouvert la voie à l'intégration-compréhension de l'aléatoire classique dans le cadre de la détermination mathématique : les "lois" en jeu sont toutes explicitées par des équations, toutefois l'évolution reste imprédictible, *donc* épistémiquement aléatoire. Des résultats modernes confirment la pertinence scientifique de cette démarche : Laskar, dans nombreux articles [Laskar, 1990 ; 1994], a démontré que le système solaire, notre cher vieux système planétaire, est chaotique. À part donc quelques petites différences quant aux échelles de temps (temps démontrable de l'imprédictibilité : 1 million d'années pour Pluton, 100 millions pour la Terre), du point de vue mathématique, il n'est pas si différent d'un double pendule, ni d'un lancement de dé. À long terme on pourrait aussi le traiter en termes purement statistiques, comme les dés (et faire le pari, par exemple, à 2 contre 1 que la Terre ne sera plus autour du Soleil dans 500 millions d'années).

Le système dynamique que l'on considère peut donc avoir un grand nombre de paramètres, comme les dés, un nombre moyen de paramètres, comme le système solaire, voire même un petit nombre de degrés de liberté, comme le double pendule, alors qu'une représentation aléatoire de la statistique des résultats obtenus, dans tous les cas mentionnés, en suppose un nombre élevé. On remarquera enfin que cette possibilité d'alternative (déterminisme chaotique ou aléatoire à analyser de façon purement statistique) est intimement associée au fait que des descriptions locales du système sont possibles : celles associées aux équations sous-jacentes et à leurs conditions initiales, alors que les représentations statistiques et probabilistes font intervenir en général une représentation globale du système (un exemple en est le comportement physique d'un gaz, dont la thermodynamique consiste précisément à prendre des moyennes statistiques globales - mécanique statistique - sur des comportements mécaniques locaux).

Résumons enfin les deux raisons pour lesquelles nous appelons *épistémique* l'aléatoire classique. *Primo*, on peut choisir un traitement (regard) mathématique purement statistique ou une analyse en termes de détermination (équationnelle). Bien évidemment, les deux regards, quoique théoriquement équivalents (et il existe suffisamment de théorèmes qui démontrent cette équivalence), peuvent être plus ou moins efficaces voire pertinents : normalement on déconseille l'analyse des évolutions planétaires en termes statistiques tout comme celle des dés en termes équationnels – chaque système aura sa propre méthode d'analyse, la plus adaptée (dans le cas d'un double pendule, la différence est moins nette et dépend des buts de l'analyse : il peut très bien être utilisé pour un petit jeu de hasard en famille). *Secundo*, l'imprédictibilité d'un système déterministe est due à un *principe* physique (classique) : la mesure est toujours un intervalle. C'est-à-dire, même si l'on a un système d'équations qui déterminent un système, point par point (dans le sens des points d'Euclide, voire des nombres réels à la Cantor), seul Dieu, dit Laplace fort justement, connaît le monde par points (mathématiques) et peut donc prédire (et rétrodire) ses états futurs (et passés). En ce qui nous concerne, notre physique, utilise des mesures approchées et cela par principe, car, au pire (ou au mieux) il y a la fluctuation thermique classique qui oblige à l'approximation (l'intervalle de mesure). Seules les machines à états discrets (nos ordinateurs digitaux, hors contextes physiques) ont une base de données exactes et possèdent donc des évolutions prédictibles, comme déjà souligné par Turing (on y reveindra). Si donc on considère un système déterministe quelque

³ Un pendule simple est en revanche déterministe et, en principe, prédictible. Fort heureusement, Galilée est tombé sur un pendule simple, sinon on serait encore loin de comprendre les lois de la chute des corps, dans leur simplicité de base...

peu sensible aux conditions initiales ou au contour (non-linéaire typiquement, voire chaotique, dont une définition plus générale de celle suggérée utilise les notions de transitivité topologique et de densité des points périodiques, que nous ne développons pas ici), l'imprédictibilité *est le résultat* de cette dépendance des conditions au contour et des propriétés *théoriques* de la mesure classique. La théorie donc nous donne simultanément la détermination parfaite (le point de vue de Dieu, mais concevable même par nous, mathématiquement) et imprédictibilité.

Ce sont ces deux arguments,

1. l'équivalence possible du regard statistique et de la détermination équationnelle,
2. le rôle de la mesure (effectuée par le sujet connaissant)

qui nous conduisent à considérer comme épistémique l'aléatoire classique.

2. L'objectivité de l'aléatoire quantique.

On peut argumenter qu'en physique quantique, par contraste, on propose un aléatoire "objectif", intrinsèque à la théorie, conceptuellement et mathématiquement fort différent de l'aléatoire classique (dans [Mugur-Schachter, 2005], il est appelé "primordial"). Cet aléatoire est *intrinsèque* en tant qu'il est associé à toute opération de mesure, car une mesure, en physique quantique, ne donne, comme résultat, qu'une *probabilité*. Plus précisément, le hasard objectif de la physique quantique est dû, conjointement,

1. à la valeur non nulle de la constante de Planck h (qui constitue une borne inférieure pour le produit des précisions possibles dans la mesure simultanée de deux variables conjuguées),
2. au processus de mesure ("projection du vecteur d'état"),
3. au caractère complexe de la fonction d'onde (qui fait que ce qui s'ajoute, des valeurs complexes – principe de superposition – n'est pas ce qui se mesure, des nombres réels).

Quant aux deux premiers points, on comprend bien la différence par rapport à la mesure classique. La théorie quantique est centrée sur ce rôle essentiel de *l'indétermination* dans la mesure : il n'est pas donné, par choix théorique inhérent à l'approche elle-même, la possibilité de disposer toujours d'une détermination par points (Euclide-Cantor, comme dans les mathématiques de la détermination classique) ; une telle détermination générale est théoriquement inconcevable, voire interdite, contrairement à ce qu'imposent les mathématiques des systèmes déterministes classiques. Les mathématiques de la physique quantique démarrent avec le h de Planck ; elles se développent ensuite par une analyse des états quantiques en termes de vecteurs dans un espace de dimension infinie (de Hilbert), qui permet de comprendre, mathématiquement, la mesure comme projection de ces vecteurs sur un espace de dimension finie. Elles arrivent enfin à proposer un champ linéaire où la fonction d'onde est donnée en termes de variables complexes : la mesure est alors associée à une perte essentielle d'information, le passage d'une variable complexe à sa valeur absolue, ou à l'apparition de phénomènes d'interférences quantiques.

Voilà donc déjà de bonnes raisons pour considérer l'aléatoire comme intrinsèque à la théorie : il surgit des mathématiques, de la mesure et de l'évolution du système (la fonction d'onde).

A cela il faudra ajouter le caractère intrinsèque des fluctuations quantiques (par contraste avec les fluctuations classiques liées à la température, par exemple). Ce caractère se manifeste, dans les mesures, aussi bien par l'énergie résiduelle (au zéro absolu, 0°K), de l'oscillateur harmonique, par exemple, que par les largeurs des résonances en théorie des particules. Bref, le 0°K , en physique classique, correspond à l'absence absolue d'énergie, tandis qu'en mécanique quantique, on admet une énergie résiduelle, ce qui joue un rôle remarquable (spéculativement), en cosmologie, dans la déstabilisation du "vide quantique" (état fondamental énergétique) lors du "big-bang"⁴.

2.1 Séparabilité vs. non-séparabilité.

Présentons maintenant notre argument principal et, peut-être, nouveau dans ces analyses de l'aléatoire (classique vs. quantique). L'aléatoire objectif (quantique) nous paraît profondément couplé avec les

⁴ Au sujet du big-bang, on remarquera (avec quelques grains de sel ou jeux de mots) que cette représentation résout du même coup l'énigme du *clinamen* lucrécien (dont on s'est toujours demandé quelle pouvait bien en être l'origine si aucune influence extérieure ne se manifestait : on la trouve ici dans les fluctuations intrinsèques) et celle de la perplexité leibnizienne (pourquoi y a-t-il quelque chose plutôt que rien ? Eh bien parce que le "rien" est instable tout en étant soumis à ces mêmes fluctuations intrinsèques : donc, vide instable, fluctuation et... big bang).

propriétés de non-séparabilité (l'équation qui décrit l'évolution du système donne un résultat intriqué pour des quantons ayant interagi), ainsi que de non-localité (la mesure effectuée sur un des quantons qui ont interagi donne une information instantanée sur l'état de l'autre). En effet, c'est cela qui conduit à réfuter toute représentation causale localiste qui chercherait à rendre compte de propriétés quantiques spécifiques (techniquement cette réfutation est assurée par les inégalités de Bell validées à leur tour par les expériences d'Aspect) : en ce sens, donc, la situation d'un système quantique ne peut toujours être considérée *que* comme globale, sans qu'on puisse la réduire à une combinatoire de composantes locales (qui nous paraît indissociable de la possibilité d'établir des équations d'évolution causalo-déterministes)⁵.

Ce point de vue pourrait indiquer que plutôt que de recourir aux concepts de "déterminisme chaotique" d'une part et d'"aléatoire intrinsèque" d'autre part, pour rendre compte des situations que nous venons d'évoquer, il serait encore plus éclairant de recourir aux concepts de "séparable" (pour caractériser le côté déterministe) et de "non-séparable" (pour caractériser le côté aléatoire intrinsèque ou objectif – en tant que participant de la construction de l'objectivité scientifique, en physique quantique). Bref, c'est la séparation possible des différents "objets" qui participent d'un processus classique (chaque planète d'un système astronomique, les dés, un pendule simple ou double...) qui en permet la description/détermination mathématique des évolutions observables. Dans les cas suffisamment sensibles aux conditions au contour, ces objets peuvent évoluer d'une façon imprédictible, quoique toujours théoriquement déterminée, individuellement, par les équations de la dynamique. En revanche, la physique quantique, suite à la non-séparabilité (aspect de globalité associée à une non-localité), confère à l'aléatoire un caractère différent, intrinsèque disons-nous : étant donné un système quantique, il n'y a pas de variables ni d'équations caché qui en détermineraient l'évolution, voire la "trajectoire" dans le cas d'un quanton, par l'absence d'une détermination locale possible⁶.

De plus, rappelons-le, et de façon corrélée, les processus chaotiques classiques (les dés, un double pendule, en contraste avec un pendule simple, mais aussi le système solaire) permettent normalement aussi une autre description, en termes purement statistiques. Du fait donc que la réalité physique classique est justiciable de cette double description et de la nature physique (non pas mathématique) des limites de la mesure, l'aléatoire y serait de nature épistémique (dépendrait du regard, comme c'est le cas pour le rapport entre mécanique statistique et thermodynamique), tandis qu'en physique quantique il n'y a pas de double représentation possible : toute donnée, qui permet d'accéder à (de construire) la connaissance, toute mesure, est une probabilité.

Bien entendu il s'agit ici d'une approche qui aurait besoin de pouvoir s'appuyer sur des théorèmes un peu généraux pour être argumentées plus avant. Il demeure néanmoins que la situation quantique diffère essentiellement de la situation classique quant au statut des probabilités qu'elle implique et que nous ne pouvons éviter d'avoir à prendre cette situation en considération.

2.2 Des objections possibles.

Quelles objections pourrait-on formuler par rapport à un tel point de vue ?

-. D'abord, sans doute, que d'une façon comparable (tout en restant différente) à la situation quantique, il pourrait exister un aléatoire classique intrinsèque, lié précisément à cet effet collectif d'énergie cinétique (température) et qui ne serait pas réductible à un système dynamique.

Deux réponses, au moins, à cette objection sont possibles : d'abord, qu'il est clair que le rôle des conditions initiales est déterminant (il existe un ensemble de mesure nulle de conditions initiales qui engendre une situation ordonnée pour un gaz, par exemple – toutes les directions de moment parallèles, et aucun choc possible⁷), ce qui ne se produit pas en cas de fluctuation quantique (dont l'existence est inéluctable). Ensuite que pour le système classique, le principe de Nernst (3^{ème} principe de la

⁵ Bien entendu, nous ne parlons pas ici de l'équation – locale – de Schrödinger qui décrit l'évolution d'un vecteur d'état *complexe* et *hors* l'opération de mesure (cette dernière concernant un autre vecteur d'état impliquant l'appareil de mesure lui-même – cf. notamment la théorie de la décohérence, qui correspond, du point de vue mathématique, au passage des valeurs complexes des états à des nombres *réels*).

⁶ Les théories dites "à variables cachées" n'échappent pas à ce genre d'analyse dans la mesure où ces variables doivent être considérées comme non-locales.

⁷ Ce que n'autorise pas la situation quantique où la non-localité et les fluctuations spontanées engendrent nécessairement des "*clinamen*".

thermodynamique) énonce qu'à température nulle (énergie cinétique nulle, ce qui est concevable pour un système classique) l'entropie du système est nulle (ordre complet) ; dans un système quantique au contraire les relations d'indétermination interdisent un tel ordre complet même à cette limite (pour autant qu'on puisse concevoir de l'atteindre).

-. Ensuite, on pourrait objecter plus profondément que l'aléatoire quantique qui se manifeste par ces fluctuations est, malgré les apparences contraires, lui aussi un effet de "regard" et que l'agitation sous-jacente au sein d'un milieu que l'on pourrait qualifier de sub-quantique (cf. Vigier, Bohm, Halbwachs, Hillion, Lochak) permettrait d'en rendre compte de façon tout aussi déterministe que dans le cas de systèmes dynamiques chaotiques (théorie de la double solution⁸ de Louis de Broglie ou version des théories à variables cachées de Bohm). Ce qui revient à considérer que la mécanique quantique "ne donne qu'une description *statistiquement exacte*, mais *incomplète* des phénomènes physiques"⁹ (une incomplétude qui était la perspective d'Einstein - et plus généralement de E.P.R - ou de Schrödinger au début).

Une réponse que peut appeler cette objection tient dans le fait que ce milieu lui-même, si on en formalise l'effet, intervient, comme nous l'avons noté plus haut, de façon globale, non-locale, sur les grandeurs quantiques et leurs mesures. De plus ses propriétés s'identifient en quelque sorte à celles du vide quantique tel qu'il est actuellement "classiquement" décrit (source d'énergie, de fluctuations, de particules virtuelles, etc.) et de plus il nécessite le recours à un nouveau concept d'"éther" qui présente ces propriétés. Si l'on ne peut totalement écarter la possibilité d'une telle approche, il demeure qu'elle ne répond pas au principe heuristique d'économie conceptuelle (ce qui, somme toute, n'est pas déterminant) mais aussi et surtout, selon notre point de vue, qu'elle reste non-locale.

-. On pourrait encore arguer que cette non-localité s'apparente à la globalité que présente un système classique (le gaz considéré plus haut, par exemple) et donc conforter la représentation de l'effet d'un désordre statistique sous-jacent au niveau quantique lui-même.

Toutefois, nous répondrons que les voies de recherche sur l'unification des théories physiques, qui mènent aux théories de la gravitation quantique ou à celles des supercordes semblent mal s'accorder avec cette représentation. En particulier les supersymétries d'une part, la substitution d'une dimensionalité non nulle (cordes ou p-branes) au caractère ponctuel (de dimension nulle, donc) des structures considérées comme élémentaires, tout comme les problèmes de la "masse des particules" ouvrent un champ d'intelligibilité et d'objectivité d'une nature différente (champs de Higgs, voire dimensions supplémentaires "compacifiées") du fait de la rupture avec la représentation ponctuelle classique ou avec celle de l'espace-temps quadri-dimensionnel usuel, qui soulèvent ces "paradoxes".

-. Autre point à prendre en considération et qui pourrait rendre caduque notre distinction : le passage à la limite classique à partir de la mécanique quantique, c'est à dire, de reconstruire le classique en faisant tendre h vers 0. Or, ce passage demande des conditions doubles : d'une part il doit bien y avoir annulation de la constante de Planck h , mais d'autre part il faut aussi se situer dans le domaine des grands nombres quantiques (la simple annulation de h ne permet pas toujours de construire la limite classique). De la même façon que, partant de la non-séparabilité quantique, on parvient à modéliser le passage à la séparabilité classique et aux propriétés de la mesure quantique (théorie de la décohérence, par exemple), il est tentant de voir dans ces conditions de passage à la limite classique la possibilité de passer d'un aléatoire objectif quantique (si, comme nous en faisons l'hypothèse, il existe) à un dédoublement épistémique entre représentation aléatoire (purement statistique) et système dynamique chaotique dans le domaine classique (sans que cela entre en contradiction avec ce que l'on appelle le "chaos quantique" qui, précisément correspond à une limite classique chaotique). On verrait alors dans l'annulation de h la possibilité de réduction à un système dynamique (obtention des équations classiques de la mécanique) et dans le fait de recourir à des nombres quantiques élevés la possibilité de réduction à du probabiliste épistémique. Ce double passage à la limite est loin d'être accompli et constitue un des grands défis de l'"unification" tant recherchée entre cadre classique (classiques et relativistes) et quantique.

Ayant essayé de répondre à quelques grands objections possibles à notre approche, un autre aspect encore milite en faveur du caractère objectif de l'aléatoire quantique : la différence profonde qui existe entre

⁸ Superposition d'une solution régulière et étendue de l'équation de Schrödinger (onde) et d'une solution singulière et très localisée (particule) correspondant à un opérateur non-linéaire (encore non connu) inséré dans cette équation.

⁹ voir [de Broglie, 1961], les parties soulignées le sont par L. de Broglie.

statistiques quantiques et statistique classique. Cette différence, en effet, ne tient pas seulement à la non nullité de h , elle tient aussi aux propriétés d'"observation" associées aux particules classiques par rapport aux quantons. Les premières sont discernables et les seconds indiscernables, ce qui conduit à des expressions différentes des statistiques auxquelles ces entités obéissent : Fermi-Dirac pour les fermions (qui ne peuvent occuper simultanément un même état quantique, et qui sont considérés comme les quantons de matière, pourvus d'un spin demi-entier), Bose-Einstein pour les bosons (qui peuvent occuper simultanément le même état quantique, et qui sont considérés comme les quantons d'interaction, pourvus d'un spin entier ou nul), alors que c'est la statistique de Maxwell-Boltzmann qui prévaut pour des particules classiques. L'indiscernabilité des uns (qui est d'ailleurs en relation avec la non-séparabilité) renvoie, à notre avis, au caractère objectif de l'aléatoire quantique, alors que la discernabilité des autres (des particules bien isolé et "individuéés" dont on considère la somme – intégrale – de l'énergie libre) renverrait au caractère épistémique de l'aléatoire classique.

Par ailleurs, nous souhaiterions verser un autre élément, de nature assez différente, à ce dossier, mais qui, à notre avis, a pour effet de renforcer le caractère objectif des probabilités quantiques. Comme nous l'avons rappelé précédemment, le domaine de la physique où probabilité et statistiques se révèlent le plus présentes est, sans doute, la mécanique statistique et la thermodynamique, que ce soit à l'équilibre ou dans l'étude des phénomènes irréversibles.

Pour rendre compte de ces phénomènes et du fait que des fluctuations (non nécessairement quantique) peuplent aussi notre univers en même temps qu'un certain degré de désordre peut y régner, Boltzmann a été amené à introduire la constante k_B qui porte son nom. Cette dernière mesure en quelque sorte une entropie, c'est-à-dire une quantité physique liée généralement à des moyennes prises sur des collections. Les éléments de ces collections (un gaz, par exemple, d'atomes en mouvements soumis à des chocs aléatoires) sont animés de mouvements désordonnés dont l'effet d'interaction moyen est représenté par la température T (en Kelvin : K) et dans les cas les plus simples chaque degré de liberté du système est associé à une énergie qui s'exprime sous la forme : $k_B T/2$. On notera que si les autres théories physiques (gravitation, quantique, électromagnétisme, ...) sont susceptibles de traiter d'éléments isolés (deux masses, un électron, un photon, ..., en tout cas d'un nombre restreint de degrés de liberté), en revanche la thermodynamique (domaine de pertinence par excellence de l'apparition et de l'utilisation de k_B) traite de situations où le nombre de ces éléments est très élevé (nombre élevé de degrés de liberté), ce qui, précisément, la rend justiciable d'une approche par la mécanique statistique¹⁰.

Nous ne sommes évidemment pas en état de fournir une réelle conclusion : notre approche est conjecturale et il manque pour l'étayer suffisamment à la fois des théorèmes mathématiques généraux (sur les rapports entre aléatoire et chaotique classiques) et des développements dans les théories physiques elles-mêmes qui puissent nourrir une vue sinon tout à fait unifiée de la physique contemporaine, au moins assez objective et discriminante des processus en jeu dans la nature quantique du monde des interactions. Actuellement le paradigme dominant (ce qui ne veut pas dire définitivement établi) va plutôt dans le sens des conceptions que nous avons présentées, mais la recherche d'une interprétation causale de la physique quantique se rapportant par exemple à un milieu subquantique n'est pas close, même si l'on peut considérer que, depuis ses débuts, sa fécondité demeure quelque peu limitée, alors que les avancées dans d'autres directions se révèlent fort riches. Nous voudrions surtout éviter de nous trouver en quelque sorte surdéterminés par des vues *a priori*, de nature trop idéologique, qui feraient souhaiter et donc défendre un déterminisme total ou, à l'inverse, un indéterminisme essentiel, dont, de toute façon la pertinence pour les enjeux philosophiques demeure à démontrer. En admettant que l'on veuille néanmoins aller au-delà du côté opératoire de l'approche scientifique pour s'interroger sur le jeu de significations qu'elle mobilise (ce qui est aussi notre préoccupation), il nous paraît beaucoup plus intéressant de plaider (et d'argumenter) pour l'irréductibilité spatio-énergético-temporelle qu'introduit la non nullité de la constante h . En fait, cette irréductibilité est porteuse de développements considérables encore à établir et qui nous semble corrélative de ces probabilités intrinsèques que nous avons considérées, elles-mêmes expression, selon nous, des conditions imposées par les relations d'indétermination, du caractère complexe de la fonction d'onde, des relations de non-commutation, de la non-séparabilité, etc., bref des spécificités quantiques. Un peu comme il paraît beaucoup plus heuristique et fécond de plaider et d'argumenter pour une spécificité

¹⁰ Voir néanmoins au §2.3 pour un bref commentaire à propos de ce que Louis de Broglie a appelé "la thermodynamique de la particule isolée".

du vivant, dont on sait à la fois qu'il est physico-chimique dans l'analyse de tous ses fonctionnements, mais que son mode d'existence ne s'y réduit pas (mode d'existence qui conduit, pour tenter de le comprendre, à introduire des concepts aussi particuliers que ceux de métabolisme, de normal ou de pathologique, de vivant ou de mort, de phylogenèse ou d'ontogenèse, voire de "finalité contingente"¹¹, etc.).

D'autre part, il nous paraît important de souligner le fait que le caractère objectif dont nous faisons état en l'occurrence, est un objectif construit, *constitué*. Son processus de constitution dépend bien évidemment du regard (préparation, mesures, choix des formulations, des structures mathématiques qui conviennent, etc.). Mais une fois constitué, il devient indépendant du regard en ce sens qu'il recourt à des constantes ou à des structures mathématiques abstraites qui dorénavant le prescrivent autant qu'elles le décrivent.

3. La détermination et le continu

Il est à observer que, dans les sections précédentes, nous avons identifié "aléatoire" avec "imprédictible", aussi bien en physique classique qu'en mécanique quantique. Dans le cas classique, l'imprédictibilité dynamique nous a donné la définition même d'aléatoire, comme conséquence du rapport entre détermination mathématique d'un côté et mesure physique de l'autre. En microphysique, nous avons souligné que l'aléatoire est intégré à la théorie elle-même, il en est en quelque sorte le point de départ, ancré sur une polarité entre sujet connaissant et objet donné par le biais des mathématiques, de la préparation des expériences et de la mesure, le tout conduisant à un résultat "imprédictible", ou dont on n'atteint que la probabilité. En nous référant cette fois au rôle du continu mathématique, nous allons revenir sur la différence entre les deux champs théoriques (et phénoménaux), que, relativement à l'aléatoire, nous avons départagé en termes, respectivement, d'épistémique et d'objectif (ou intrinsèque pour la théorie quantique).

Quand on se donne le regard ou les outils classiques pour l'analyse ou la production de l'aléatoire (on observe une turbulence, on lance une monnaie, un dé...), une analyse préliminaire du phénomène ou de l'objet est possible : on analyse les irrégularités et les stabilités d'un fluide, on regarde la structure physique, les symétries d'une monnaie, d'un dé... Cela permet en amont d'attribuer des probabilités au processus qui suivra et de faire des estimations physiquement bien fondées sur certains éléments de ce processus. Dans le cas d'une monnaie ou d'un dé, les symétries et l'ensemble des propriétés physiques de l'objet en question permettent d'attribuer des probabilités à l'occurrence des différents événements possibles, avant qu'ils ne se produisent (1/2, 1/6, respectivement). Bref, on peut *séparer* l'objet physique et ses propriétés du processus, l'étudier *avant* la mesure relative à la dynamique qui nous intéresse. Cela est impossible en microphysique : on ne peut pas se donner, avant la mesure, c'est-à-dire avant le processus où se vérifiera l'aléatoire, l'objet physique avec la liste de ses propriétés ; en particulier, la non-séparabilité quantique empêche d'isoler les "propriétés" d'un quanton. En microphysique, il n'y a que la mesure des processus comme forme d'accès au monde. On ne peut pas "regarder" le photon, l'électron, comme un dé, une monnaie, indépendamment de son processus de production, d'évolution et de mesure, où les probabilités seront intrinsèques à l'observation.

Même quand une information en amont du processus est donnée, sur la mesure possible, quand, par exemple, on prépare un électron pour la mesure de son spin, en fixant une direction, et l'on sait *a priori* qu'il sera "up" ou "down", il n'y a aucune théorie classique sous-jacente qui nous permette de concevoir la détermination théorique *exacte* de ce spin, avant et indépendamment de la mesure, comme résultat d'un état déterminé, voire d'une trajectoire. En revanche, on peut concevoir une analyse de la dynamique classique d'une monnaie, qui décrirait, comme solution des équations du mouvement, la trajectoire exacte de la monnaie, les lignes euclidiennes du barycentre et d'un point du bord, par exemple. Les différentes approches à variables cachées en mécanique quantique supposaient ces théories, de type classique, des trajectoires réelles sous-jacentes, mais, nous le rappelions plus haut, elles n'échappent pas au caractère non local de leurs spécifications.

Cet aspect est crucial pour une analyse de ces deux formes de l'aléatoire. La théorie classique permet, conceptuellement, de passer à la limite de la mesure. Encore une fois, on sait très bien que la mesure est

¹¹ Cf. chapitre 5, sect. 3.1 pour une discussion de ce concept.

toujours un intervalle, en physique classique ; toutefois, la théorie des systèmes dynamiques est donnée dans un cadre des mathématiques du continu, où l'on conçoit le point euclidien. Pour cette raison, disait fort justement Laplace, une intelligence infinie et parfaite, connaissant le monde point par point, pourrait tout prévoir, y compris le lancement des dés. En théorie, ce cadre continu limite, est conceptuellement, à ce jour, essentiel, car l'imposition d'une limite *mathématique* finie *a priori* de la mesure n'a pas de sens physique classique. Cela permet alors de *concevoir* la détermination complète, la trajectoire qui part d'un point ; c'est dans ce sens que le monde classique est déterministe. Et l'aléatoire, en tant qu'imprédictibilité, reste épistémique : il est dans le rapport entre l'outil de la connaissance et de la détermination, les mathématiques, et l'objet que l'on suppose indépendant. C'est cette (prétendue) indépendance qui n'a pas lieu en physique quantique, où l'objet et l'objectivité même sont des constitués de la pratique de connaissance (préparation de l'expérience, mesure et leur mathématisation, voire leur conséquence mathématique principale : l'objet quantique).

Pour mieux souligner le rôle corrélé de la détermination et des mathématiques dans les cadres classiques, dans leur autonomie par rapport à l'objet physique, un préconstitué, observons que les mathématiques pratiquent ce passage à la limite dans maintes constructions abstraites, bien indépendantes du (à la limite *externe* du) "réel". Nous pensons, par exemple, à la suite des rationnels convergente vers un irrationnel, $\sqrt{2}$ disons : cette limite théorique *produit* $\sqrt{2}$, qui n'est pas un rationnel, il sort donc de leur univers (ce passage qui avait, justement, tant perturbés nos collègues en Grèce, au point de les amener au bord du suicide, est le vrai début des mathématiques). La construction qui s'ensuit des nombres réels à la Cantor-Dedekind a donné une assise définitive ou une immense solidité mathématique à ce continu fait de points hors du monde et elle a permis les développements de la physique moderne, où l'infini et les passages à la limite jouent un rôle crucial bien au-delà du calcul différentiel (voir II.2.1, chapitre 2). Toutefois, il est clair qu'elle n'a pas de "sens physique" si on fait référence à la mesure physique, bien que le calcul différentiel et algébrique, dans le continu, soit au cœur de la *détermination* physico-mathématique classique : ces points, sans dimensions, disait Euclide, sont les départs *exacts* des trajectoires, des lignes *sans épaisseurs*, continuait-il, déterminées par les équations, expliquent Newton, Laplace et Einstein. C'est donc le continu mathématique qui nous fait concevoir d'une part la détermination classique, théoriquement parfaite, et, d'autre part, l'imprédictibilité des évolutions physiques, quelque peu sensibles aux conditions aux contours, suite à l'inévitable imprécision de la mesure physique. Car c'est l'idée même d'un substrat continu *conceptuellement* possible qui met en évidence l'approximation de la mesure : un univers discret, digital par exemple, serait exact, car il admettrait des mesures exactes, digit par digit, tout comme la machine digitale accède à ses bases de données.

Observons enfin que, même en théorie de la turbulence, le cadre fourni par les équations de Navier-Stokes est continu, donc déterministe dans ce sens limite, quoique propre à des phénomènes hautement imprédictibles (avec quelques importantes difficultés ultérieures pour la prédiction, même théorique, due à l'absence, à nos jours, d'une preuve d'unicité des solutions, donc d'unicité de la trajectoire possible, une fois données les conditions au contour).

Or, il n'en est plus rien en physique quantique : on ne peut pas passer à la limite de la mesure possible, faire référence à un substrat continu, soit-il purement conceptuel. La théorie démarre par le h de Planck, borne inférieure théorique à la mesure, indétermination intrinsèque à la mathématique de la mécanique quantique. Il n'y a pas dans l'espace de phase de points sans dimensions, départ possible pour des trajectoires sans épaisseurs : ils sont interdits par la théorie. En fait, il n'y a plus de trajectoires au sens classique tout court, voilà le tournant radical de la physique quantique, après deux mille ans de physique des trajectoires, d'Aristote, à Galilée et Newton, à Einstein. Dans ce sens, l'aléatoire devient intrinsèque à la théorie, participe à la construction d'objectivité où il devient lui-même "objectif".