

Le déterminisme en physique

Harold Erbin

Table des matières

1	Introduction	2
2	Mécanique classique	2
3	Physique statistique	3
4	Systèmes chaotiques	3
5	Mécanique quantique	5
6	Relativité	6
7	Conclusion	6
	Références	7

Ce texte est publié sous la licence libre

Licence Art Libre :

<http://artlibre.org/licence/lal/>

Version : 5 octobre 2010

Site : <http://harold.e.free.fr/>

1 Introduction

L'objectif de la physique est de décrire l'univers et son évolution. De fait, son cadre se prête particulièrement bien à une réflexion sur le déterminisme et j'en présenterai un court exposé en présentant certains domaines : la mécanique classique, la physique statistique, les systèmes dynamiques et le chaos, la mécanique quantique et enfin la relativité restreinte.

Pour écrire cette présentation, je me suis essentiellement basé sur ma vision de la physique et ce que j'en ai appris en l'étudiant. Les quelques références données à la fin servent simplement à compléter ce que j'expose, bien que je ne m'en sois pas servi.

2 Mécanique classique

Par essence, la mécanique classique (Galilée, Newton) et sa descendante, la mécanique analytique (Lagrange, Hamilton, etc.), sont parfaitement déterministes : selon ces théories, il suffit de connaître, à un instant donné, la position et la vitesse (six variables donc, puisque notre monde possède trois dimensions) d'une particule pour déterminer son mouvement futur (et même passé)¹. Le déterminisme laplacien a totalement banni le hasard de la mécanique classique, pour laisser un monde entièrement régi par des équations et la connaissance de certains paramètres :

« Nous devons envisager l'état présent de l'univers comme l'effet de son état antérieur, et comme la cause de celui qui va suivre. Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux. »²

On retrouve donc l'image de la grande horloge cosmique, où tout dans l'univers n'est qu'un rouage parfaitement huilé, et l'Horloger n'est plus Dieu mais les lois de la physique. De même, la notion de causalité est extrêmement importante en mécanique classique — et plus généralement en physique : il s'agit d'un des principaux postulats : tout événement possède une cause, qui a eu lieu forcément à un instant antérieur³. Bien sûr, cela suppose aussi de connaître parfaitement toutes les lois de l'univers.

Ainsi, tout événement est la conséquence d'une succession d'autres événements, et les équations de la mécanique peuvent tout expliquer :

« La courbe décrite par une simple molécule d'air ou de vapeurs est réglée d'une manière aussi certaine que les orbites planétaires : il n'y a pas de différence entre elles que celle qu'y met notre ignorance. »⁴

1. Ceci est dû au fait que les équations de la mécanique sont des équations différentielles d'ordre 2 : pour les résoudre, il faut donc connaître la position et la vitesse à un instant quelconque (on parle de conditions initiales).

2. Laplace, *Essai philosophique sur les probabilités*.

3. On peut aussi reformuler : « les mêmes causes possèdent les mêmes effets. »

4. *ibid.*

3 Physique statistique

La deuxième citation de Laplace est très intéressante et trouve écho dans la suivante :

« Si nous attribuons les phénomènes inexpliqués au hasard, ce n'est que par des lacunes de notre connaissance. »⁵,

idée que l'on retrouve aussi dans la première citation. Cette constatation a amené à la construction de la physique statistique (Boltzmann, Maxwell — fin du XIX^e). Cette dernière permet d'expliquer le comportement de systèmes comportant un grand nombre d'objets — comme des particules —, car cela est tout à fait impossible, en pratique, en utilisant les lois de la mécanique classique. Prenons un exemple afin de fixer les idées : un cube de 1 cm³ d'air contient quelques 10¹⁴ (un 1 suivi de 14 zéros) molécules. Nous pourrions décider d'appliquer à chaque molécule les lois de la mécanique classique afin de déterminer leurs trajectoires en fonction de leurs interactions réciproques et de leurs propriétés, et ainsi déduire les propriétés de l'air. Théoriquement, cela est faisable. En pratique, cela demande de connaître la vitesse (trois variables) et la position (encore trois variables) des 10¹⁴ molécules à un instant donné, puis d'établir l'évolution de ses variables en manipulant 10¹⁴ équations. Nous comprenons immédiatement qu'une telle tentative est vouée à l'échec⁶.

Ainsi, il faut renoncer à décrire avec certitude les trajectoires et utiliser des méthodes probabilistes. Toutefois, dans la limite des grands nombres, ces méthodes conduisent à des résultats certains⁷ : les probabilités des autres événements est tellement faible qu'elle est considérée comme négligeable, et l'on peut ainsi établir un résultat avec certitude. C'est ainsi que plusieurs lois empiriques (comme l'équation des gaz parfaits, le mouvement brownien...) ont pu être démontrées.

En conclusion, nous pouvons dire que les probabilités ne sont qu'un outil pour manipuler des systèmes sur lesquels nous manquons d'information⁸ : si je lance une pièce de monnaie, je suis en théorie capable de décrire avant même de la lancer si elle va tomber sur pile ou sur face. Toutefois, le nombre de paramètres entrant en jeu est tel que cette connaissance est inaccessible. Donc là encore, la physique statistique laisse place au déterminisme.

4 Systèmes chaotiques

À la fin du XIX^e siècle, la question du déterminisme au sein de la mécanique classique a surgi lors des travaux de Poincaré : certaines systèmes physiques présentent un caractère chaotique et semblent aléatoires en apparence. Toutefois, ses travaux à ce sujet ne furent guère suivis, et il faudra attendre les années 1950

5. *ibid.*

6. Les meilleurs ordinateurs dont nous disposons sont capables de suivre l'évolution de quelques milliers de particules, c'est à dire 10³–10⁴. . . soit dix milliards de fois moins.

7. Pour les mathématiciens : l'incertitude relative croît comme 1/√N. Ainsi, plus le nombre de particules est important, plus l'erreur est faible par rapport au résultat.

8. D'ailleurs l'entropie — principal outil de la physique statistique — est une mesure de ce manque d'information, et une théorie de l'information, inspirée de ces concepts, est née il y a une cinquantaine d'années

pour que le sujet se redéveloppe, sous l'impulsion d'E. Lorenz⁹.

D'une certaine manière, on peut dire que le chaos réintroduit du hasard en permanence dans notre système [2]. Un simple jeu pour enfant, constitué d'un pendule avec un aimant à son extrémité, et de quatre aimants sur un plateau permettent de disposer d'un système chaotique (le système n'est pas constitué d'un grand nombre d'objets, donc la physique statistique ne nous aide pas)¹⁰. En fait, un système chaotique est défini par sa très forte sensibilité aux conditions initiales : cela signifie que si l'on change légèrement un paramètre entre deux expériences, alors il est impossible de déterminer l'évolution du second système à partir des résultats du premier¹¹ :

« Une cause très petite, et qui nous échappe, détermine un effet considérable que nous ne pouvons ne pas voir, et alors nous disons que cet effet est dû au hasard. Si nous connaissions exactement les lois de la Nature et la situation de l'Univers à l'instant initial, nous pourrions prédire la situation de ce même Univers à l'instant ultérieur. Mais, lors même que les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation initiale qu'approximativement. Si cela nous permet de prévoir la situation ultérieure avec la même approximation, c'est tout ce qu'il nous faut, nous disons que le phénomène a été prévu, qu'il est régi par des lois ; mais il n'en est pas toujours ainsi, il peut arriver que de petites différences dans les conditions initiales en engendrent de très grandes dans les phénomènes finaux ; une petite erreur sur les premières produirait une erreur énorme sur les derniers. La prédiction devient impossible et nous avons le phénomène fortuit. »¹²

Par exemple, le système solaire est chaotique : il nous est impossible de déterminer ce qu'il sera d'ici quelques dizaines millions d'années, malgré ce que laisse penser les excellentes prévisions que font les astronomes — par exemple sur les éclipses, les passages de comètes... : si elles sont correctes, cela est dû uniquement au fait qu'elles se font sur une très courte échelle de temps (en comparaison des temps de l'univers et du temps d'évolution du système). D'ailleurs, une étude récente a simulé l'évolution du système solaire sur une longue période, en changeant légèrement la position de Mercure à chaque fois (quelques mètres) : ils ont mis en évidence un grand nombre de scénarios probables (collision entre Mercure et la Terre ou Vénus, éjection de Mercure en dehors du système solaire...)[4].

Un autre problème soulevé dans les systèmes chaotiques est l'impossibilité de trouver une solution analytique (c'est à dire qui s'exprime sous la forme d'une simple formule) aux équations qui les régissent. Ainsi, la seule manière de déterminer une solution est, en partant d'un état de départ, d'avancer pas à pas en veillant à respecter les contraintes des équations (l'idée est simple à réaliser avec un ordinateur). Mais pour ce faire, il faudrait que chaque pas soit

9. On lui doit d'ailleurs l'image de l'effet papillon : les battements d'aile d'un papillon pourraient donner naissance à une tornade à l'autre bout du monde, quelques semaines plus tard.

10. Voir la vidéo <http://www.youtube.com/watch?v=Qe5Enm96MFQ>.

11. Lorenz a d'ailleurs commencé à s'intéresser au chaos après avoir remarqué que deux simulations météorologiques successives donnaient des résultats très éloignés, après qu'il ait tronqué les données de la seconde à trois chiffres après la virgule.

12. Poincaré.

infiniment précis.

Ainsi, encore une fois, le hasard vient du fait qu'il est impossible de connaître avec une exactitude parfaite l'ensemble toutes les données nécessaires pour décrire notre système (et ce même si nous connaissons parfaitement toutes les lois de l'univers).

5 Mécanique quantique

La mécanique quantique, développée au dernier siècle, bouscule l'intuition commune par ses étranges prédictions et sa nature probabiliste intrinsèque : tous les résultats sont donnés sous forme de probabilités. S'agit-il des mêmes probabilités que celles de la physique statistique ? Aucunement : comme je le disais plus haut, les probabilités de la physique statistique sont dues au fait que nous manquons d'information tandis que, dans le cas de la mécanique quantique, les probabilités apparaissent naturellement. Cela signifie que même si nous possédons toutes les informations disponibles sur l'état d'un système, avec une précision absolue, il nous serait impossible de faire une prévision sur son évolution¹³. Cette particularité de la mécanique quantique déplaisait fortement à Einstein qui a eu l'échange suivant avec Niels Bohr¹⁴ :

Einstein : Dieu ne joue pas aux dés.

Bohr : Einstein, cessez de dire à Dieu ce qu'il doit faire !

Pour fixer l'idée de probabilité intrinsèque, je reprends ici un exemple que j'ai lu. Supposons que je possède deux cartes — une dame de cœur et un roi de pique —, et que je place l'une des deux dans une enveloppe, au hasard et sans la regarder. Je demande à quelqu'un d'ouvrir l'enveloppe. Il a alors autant de chance de tomber sur le roi de pique ou la dame de cœur (c'est à dire que chaque carte a une probabilité 1/2 de sortir) — disons qu'il s'agit de la dame de cœur. Alors la personne peut déduire que la dame cœur s'est toujours trouvée dans l'enveloppe, même lorsque cette dernière était encore scellée. L'ouverture ne change donc en rien la réalité. Par contre, si les cartes et l'enveloppe sont de nature quantique, alors l'expérience est profondément changée : tant que l'enveloppe n'est pas ouverte, la carte à l'intérieure n'est pas ou bien la dame de cœur, ou bien un roi de pique, mais un mélange des deux (de même que la carte qui est restée sur la table), et l'ouverture joue ici un rôle fondamentale en perturbant le système et en le forçant à se retrouver dans un état précis de base. Ainsi le système après la mesure est différent de celui avant la mesure.

Einstein a d'ailleurs conçu, avec deux de ses collègues, une expérience de pensée (appelée le paradoxe EPR) visant à mettre en défaut la mécanique quantique : l'un des arguments était qu'il pouvait exister des variables cachées qui permettraient de déterminer, si nous les connaissions, l'évolution du système (cette vision est donc celle de la physique statistique). Une expérience (menée

13. Précisons toutefois qu'il s'agit ici d'une interprétation semi-classique de la mécanique quantique. En effet, un système quantique est entièrement déterminé par sa fonction d'onde, et sa connaissance permet de déterminer totalement l'évolution future d'un système. Toutefois, les informations obtenues ainsi ne correspondent pas à celles auxquelles nous nous attendons — comme la vitesse, la position. . . , notions qui n'ont aucun sens en mécanique quantique — et c'est lors de cette "conversion" qu'apparaissent les probabilités et notre manque d'information intrinsèque. De plus la théorie quantique permet de lister tous les états possibles du système, même s'il n'est pas possible de dire *classiquement* lequel on obtiendra.

14. Il existe plusieurs versions de cet échange, j'ai choisi celle qui semblait la plus répandue.

par Alain Aspect à Orsay) a répondu expérimentalement à la question : il n'existe pas de variables cachées (je n'entrerai pas plus dans le sujet comme il n'y a pas lieu ici, mais notons toutefois qu'il est extraordinaire qu'une expérience de pensée s'inscrivant dans un débat philosophique ait pu recevoir une preuve expérimentale).

En fait, la particularité de la mécanique quantique est que l'état n'est pas déterminé avant la mesure (nous retombons ici sur le chat de Schrödinger, qui est à la fois mort et vivant, tant que l'on ne cherche pas à observer ce qu'il est) et donc, d'une certaine manière, l'observation et la conscience créent la réalité : la mesure et, de fait, l'observateur jouent un rôle clé dans la mécanique quantique, mais cela pose de nombreux problèmes philosophiques, notamment à travers la question : « Qu'est-ce qu'un observateur ? » Les animaux ou les insectes en sont-ils ? Ou seulement l'Homme ou les êtres "conscients" ? Toutefois, ce débat est séculaire et nous l'abandonnerons ici.

Vous me demanderez alors : « Mais comment cela se fait-il que nous ne voyions aucun de ces phénomènes ? Pourquoi les cartes se comportent-elles bien ? » En fait, les effets quantiques ne se sont sentis que dans certaines conditions (qui correspondent en général à des systèmes de très petite taille) et, lorsque ces conditions ne sont pas présentes, les probabilités quantiques donnent des résultats certains. La question du déterminisme se pose donc réellement dans le cadre de la mécanique quantique.

6 Relativité

Finalement, je terminerai par une courte remarque sur la relativité. Cette dernière théorie affirme qu'il est possible, si on considère deux événements simultanés dans un certain référentiel, de trouver un référentiel où ils ne sont plus. De même, si on prend deux événements successifs dans un référentiel, alors il existe une infinité de référentiels où le second événement a lieu avant le premier. Le principe de causalité, à savoir que l'on peut trouver un effet qui précède sa cause, pourrait donc être violé si l'on se place dans le "bon" référentiel ? La réponse est non : on peut montrer que deux événements reliés causalement ne peuvent jamais se retrouver inversés ; ceci est dû au fait que l'information voyage au plus vite à la vitesse de la lumière. Ainsi, s'il est possible d'inverser deux événements, cela signifie qu'il est impossible d'envoyer un signal de l'un à l'autre (car il faudrait pour cela que l'information voyage à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui est impossible) : il est donc impossible que l'un soit la cause ou l'effet de l'autre, et ils sont donc totalement indépendants.

7 Conclusion

Toutefois, une question se pose, qui n'apparaît nulle part directement (bien qu'il s'agisse de l'un des principaux problèmes d'interprétation de la mécanique quantique) : où se situe la conscience dans la physique ? Rien ne nous le dit et il est donc impossible d'interpréter les décisions de l'humain avec les théories physiques actuelles (certains ont bien essayé, mais il s'agit plus de charlatans qui n'ont rien saisi à la physique qu'autre chose).

Références

- [1] Jean–Pierre Kahane, *Déterminisme et hasard chez Laplace* (<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00175229/fr/>) : très accessible et intéressant.
- [2] Christian Marchal, *Déterminisme, hasard, chaos, liberté*. (<http://Annales.org/archives/x/poinc.doc>) : assez complet et intéressant.
- [3] Max Born *Dans quelle mesure la mécanique classique peut-elle prédire les trajectoires ?* (<http://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00235987/en/>) : plus difficile d'accès et nécessite des connaissances en physique et mathématiques (Born est l'un des fondateurs de la mécanique quantique).
- [4] CNRS, *Le chaos et Mercure* (<http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/496.htm/>) : article détaillé sur les instabilités du systèmes solaires dues à Mercure.
- [5] James Gleick, *La Théorie du Chaos* : un livre de vulgarisation tout à fait passionnant sur le chaos, les fractales . . .