

1. Doctrine du déterminisme

Cette section décrit des définitions successives du déterminisme, postulées par Daniel Martin au fur et à mesure des progrès de la physique pour rendre compte de l'approfondissement de ses lois.

Les références entre crochets ou "Voir..." pointent vers le livre de Daniel Martin :

Déterminisme, chaos et cosmologie relativiste *Philosophie des sciences et vulgarisation*

1.1 Origine historique : déterminisme philosophique

Dans l'*Essai philosophique sur les probabilités* [B31-1] de Laplace on lit page 3 :

"Les événements actuels ont, avec les précédents, une liaison fondée sur le principe évident, qu'une chose ne peut pas commencer d'être, sans une cause qui la produise. Cet axiome, connu sous le nom de *principe de la raison suffisante*, s'étend aux actions mêmes que l'on juge indifférentes. La volonté la plus libre ne peut sans un motif déterminant, leur donner naissance ; [...] L'opinion contraire est une illusion de l'esprit qui, perdant de vue les raisons fugitives du choix de la volonté dans les choses indifférentes, se persuade qu'elle s'est déterminée d'elle-même et sans motifs."

Dans ce texte de 1814, l'astronome et mathématicien Laplace affirme le déterminisme sans utiliser ce terme ; c'est parce qu'il parle de *motif déterminant* que sa doctrine a reçu le nom de *déterminisme*.

D'après cette doctrine, appelée *déterminisme philosophique* :

- Rien ne peut exister sans cause : une cause précède nécessairement toute existence de chose ; et elle suffit, lorsqu'elle existe, pour que la chose soit ou apparaisse.
- Laplace était athée, sa doctrine est matérialiste. Pour lui, l'existence d'une chose n'est jamais due à une volonté transcendante, sa cause est toujours naturelle ; et il n'y a ni libre arbitre humain ni phénomène sans cause.

Laplace écrit à la suite :

"Nous devons donc 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 [le « démon » de Laplace] 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. L'esprit humain offre, dans la perfection qu'il a su donner à l'Astronomie, une faible esquisse de cette intelligence. Ses découvertes en Mécanique et en Géométrie, jointes à celle de la pesanteur universelle, l'ont mis à portée de comprendre dans les mêmes expressions analytiques les états passés et futurs du système du monde."

Selon le déterminisme philosophique :

- Les causes provoquent l'enchaînement des états d'un système qui évolue, ces états successifs formant une *chaîne de causalité*.
- La science humaine doit permettre de *comprendre* l'état présent d'un système et de reconstituer par la pensée l'historique complet des évolutions dont il résulte conformément aux lois, promesse d'intelligibilité ;
- Les lois de la science doivent aussi permettre de *prévoir* les évolutions futures et de *prédire* les situations correspondantes, promesse de prédictibilité.

1.2 Du déterminisme philosophique au déterminisme statistique

Laplace ne connaissait pas le phénomène de décomposition radioactive, *qui se produit sans cause apparente* et constitue un contre-exemple fatal à la possibilité de son déterminisme philosophique de prédire un phénomène ou d'en retrouver la cause ; la radioactivité n'a été découverte par Henri Becquerel qu'en 1896.

Un morceau de corps radioactif comme l'uranium 238 (noté ^{238}U) se décompose spontanément : de temps en temps un de ses atomes se brise en deux atomes : du thorium 234 (^{234}Th) et de l'hélium 4 (^4He) : $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} + ^4\text{He}$.

Mais contrairement aux promesses du déterminisme philosophique :

- *Cette décomposition a lieu sans cause apparente* : les physiciens disent seulement que l'atome ^{238}U est instable, ce qui n'explique rien ;
- *L'instant de la décomposition est imprédictible*.

La loi qui décrit la décomposition d'un échantillon ne donne qu'une *période de demi-vie*, durée au bout de laquelle 50% de son ^{238}U se sera décomposé ; et cette demi-vie n'est qu'une moyenne statistique, vraie pour un nombre significatif d'échantillons.

Si un atome d'un échantillon est du ^{234}Th , il s'est probablement formé lors de la décomposition d'un atome ^{238}U , mais il ne peut exister de loi pour savoir à quelle date.

Le phénomène de décomposition radioactive d'un atome n'a donc ni cause suffisante, ni date prévisible. Il est régi par une loi ne permettant pas de prédire quoi que ce soit pour un atome donné, mais seulement statistiquement pour une population d'atomes. Et l'état actuel d'un échantillon ^{238}U contenant du ^{234}Th ne permet pas de reconstituer en pensée la succession des décompositions (quel atome, à quelle date).

Conclusions

1. Rejet du déterminisme philosophique

Au niveau des atomes de ^{238}U , la doctrine du déterminisme philosophique ne tient pas ses promesses de prédiction des états futurs et de reconstitution en pensée de l'historique des états passés. Elle n'associe même pas une cause nécessaire au phénomène de décomposition.

Cet unique contre-exemple suffit pour qu'on la rejette en tant que principe, car un principe doit être vérifié dans tous les cas. En outre, la physique connaît aujourd'hui de nombreux exemples de viols de ce « principe ».

2. Adoption provisoire d'une autre définition de l'adjectif « déterministe »

L'adjectif déterministe qualifie une opération, une évolution ou une règle dont le résultat ne dépend que des données ou circonstances initiales parce qu'il est soumis à des lois.

Cette définition réserve le qualificatif « déterministe » à un changement, en ne citant pas un état. Or beaucoup de gens définissent à tort un résultat d'évolution comme une *valeur de variable* ou *l'état du système* qui a évolué, définitions incorrectes car nous verrons que *le déterminisme n'entraîne pas toujours la prédictibilité d'un tel résultat*.

Retenons donc que le résultat causal déterministe de circonstances initiales ne peut être qu'une *évolution selon une loi*.

Sont déterministes, par exemple : un programme d'ordinateur ; la loi physique de la chute des corps ; la loi d'Ohm décrivant la différence de potentiel aux bornes d'une résistance parcourue par un courant électrique.

Déterminisme : une doctrine philosophique

Le qualificatif de déterministe s'applique aux évolutions naturelles de systèmes, régies selon des lois dans le cadre d'une doctrine philosophique, le *déterminisme*. Qualifier un système de déterministe c'est affirmer que son évolution est régie par des lois, et seulement par des lois (sans effet du hasard ou d'une transcendance).

3. Nécessité d'un déterminisme statistique

Le phénomène de décomposition radioactive fait apparaître le besoin d'un nouveau type de déterminisme, que nous qualifierons de *statistique*. Il s'agit bien d'un déterminisme et non de hasard : cette décomposition n'est pas imprévisible, elle est bien régie par des lois.

Ces lois ne sont pas au niveau d'un atome, mais à celui d'une population : la nature remplace le niveau de précision atome-par-atome que nous souhaiterions par un niveau plus global. La période de demi-vie de l'élément ^{238}U résulte de lois d'évolution physique précises et déterministes décrites par un outil mathématique appelé *Mécanique quantique*, dont les prédictions ont une interprétation statistique bien que leur équation soit déterministe au sens traditionnel.

On connaît aujourd'hui beaucoup de phénomènes d'évolution dont les lois donnent des prédictions statistiques. Elles décrivent des états de système dont certaines variables sont elles-mêmes de type stochastique : leurs valeurs sont distribuées selon une loi statistique précise, elles ne sont pas au hasard. Ces lois donnent des résultats entachés d'une imprécision chiffrée qui ne sont pas n'importe quoi.

1.2.1 Evolution vers une superposition d'états

Les philosophes conçoivent en général l'évolution d'un système comme une chaîne de causalité unique : chaque état a un seul prédécesseur et un seul successeur. C'est pourquoi le dictionnaire philosophique [B152] donne du déterminisme la définition suivante :

"Doctrinophilosophique suivant laquelle tous les événements de l'univers, et en particulier les actions humaines, sont liés d'une façon telle que les choses étant ce qu'elles sont à un moment quelconque du temps, il n'y ait pour chacun des moments antérieurs ou ultérieurs, qu'un état et un seul qui soit compatible avec le premier."

Cette définition est correcte concernant l'unicité de l'état antérieur d'un état donné S , mais pas concernant l'état ultérieur : en physique atomique, l'état S peut évoluer vers plusieurs états simultanément, dits *superposés*. L'équation d'évolution a alors plusieurs solutions, chacune assortie d'une probabilité d'apparition lors d'un grand nombre d'essais identiques.

Exemple : la Mécanique quantique montre que dans une molécule d'ammoniac NH_3 l'atome d'azote N peut se trouver au-dessus ou au-dessous du plan des trois atomes d'hydrogène H ; l'équation aura donc deux solutions en même temps, de même probabilité.

Le déterminisme statistique doit donc prendre en compte ce phénomène de superposition pour régir aussi les lois du niveau atomique.

Ce qu'on peut voir d'une superposition d'états

La superposition d'états existe bien dans certaines expériences de physique atomique en tant que résultat d'évolution, mais l'homme ne peut jamais la voir physiquement. Toute tentative humaine de voir ou de mesurer implique un échange d'énergie qui perturbe suffisamment une superposition de niveau atomique pour la décomposer en ne retenant qu'un seul des états qui la composaient, état qui devient visible.

Cette perturbation n'est pas décrite par la loi d'évolution qui a produit la superposition, son résultat ne peut donc être prédit par elle ; en général elle ne peut pas être décrite du tout, car elle met en jeu une énergie de niveau macroscopique infiniment plus grande que les énergies en jeu dans l'expérience d'origine. Le choix de l'état visible qu'elle produit parmi les états superposés n'est donc pas prévisible, car la violente perturbation de la mesure ne peut être décrite avec précision. Cette imprédictibilité a été à tort attribuée à la loi d'évolution, qu'on a de ce fait qualifiée de non-déterministe, alors que le déterminisme ne peut évidemment concerner que des évolutions que l'on peut décrire fidèlement.

1.3 Les trois premiers niveaux de déterminisme

A ce point de l'exposé, nous avons identifié trois niveaux de déterminisme :

1. Le déterminisme philosophique, idéal mais illusoire ;
2. Le déterminisme scientifique, qui régirait toutes les lois de physique traditionnelle connues jusqu'en 1915, date de publication de la théorie de la Relativité générale. Ces lois sont basées sur les deux groupes de lois fondamentales :
 - Les lois de Newton, régissant ce qui est matière ;
 - Les lois de Maxwell, régissant ce qui est charge électrique.

La physique macroscopique sépare ces deux groupes de lois, car on ne peut convertir une charge électrique d'un signe donné en matière ou l'inverse. Le seul cas de conversion d'énergie en charges électriques est celui des photons de

haute énergie, qui se décomposent en une paire particule-antiparticule dont les deux membres ont des charges égales de signes opposés – et ce cas relève du déterminisme statistique.

La Relativité générale, construite à partir des lois de Newton et de Maxwell, relève elle aussi du déterminisme scientifique. C'est aussi le cas de la Thermodynamique, ensemble d'outils régissant globalement des populations de particules.

3. Le déterminisme statistique, sur-ensemble du déterminisme scientifique, qui régit aussi les lois des systèmes dynamiques (chaos) et de la physique atomique.

Ces dernières sont décrites par les outils mathématiques de la Mécanique quantique, de l'Electrodynamique quantique et de la Chromodynamique quantique. La Mécanique quantique, à la base des deux autres, est reliée aux lois de la physique macroscopique par le *Principe de correspondance* qui fournit des règles de passage.

Lois d'évolution et lois descriptives

Les lois d'évolution du déterminisme statistique (donc aussi celles du déterminisme scientifique) décrivent des variations de variables en fonction des valeurs des mêmes variables ou d'autres ; leur expression mathématique utilise donc des *équations différentielles*.

Toutefois, conformément à la définition précédente de l'adjectif déterministe, nous ajouterons à l'ensemble des lois physiques d'évolution les lois descriptives comme les lois d'optique. Ces dernières ne décrivent pas une évolution, mais un trajet de rayons lumineux ; elles peuvent être qualifiées de déterministes car tout trajet est fonction des conditions initiales (le système optique) et respecte des lois.

1.4 Lois conditionnelles

La physique moderne comprend aussi des lois faisant intervenir des conditions. En voici des exemples.

- Le Principe d'incertitude de Heisenberg limite la précision des évaluations simultanées des variables de certains couples, comme {position et vitesse} ou {énergie et durée} : si, lors d'une expérience, l'erreur sur une des variables diminue, l'erreur sur l'autre augmente, le produit de ces erreurs ayant un minimum. Ce principe s'interprète aussi comme une indétermination ou une instabilité.
- Le Principe d'exclusion de Pauli est une contrainte d'existence des états quantiques à laquelle sont soumis tous les *fermions* (exemples : les électrons, les protons et les neutrons).

Ainsi, dans un atome il ne peut y avoir qu'un seul électron dans un état quantique (orbite, spin, etc.) donné. Mais plusieurs *bosons*, particules comme le photon qui ne respectent pas ce principe, peuvent être dans le même état quantique, notamment au même endroit dans l'espace.

- Les invariances, comme la conservation de l'énergie d'un système fermé ou celle de sa charge électrique.

On peut citer aussi la *symétrie* CPT, où une loi d'évolution de particules se conserve lorsqu'on remplace simultanément le signe de leur charge électrique par son opposé (C), leur position par sa symétrique par rapport à un plan (P) et le sens de variation du temps par le sens opposé (T).

- Les lois de stabilité ou décomposition de noyaux atomiques ou de molécules.
- Les lois de fusion de noyaux et de synthèse de molécules.
- Les lois d'hystérésis.
- Les lois de transition de phase (comme le changement d'état de l'eau en glace ou en vapeur).
- Les synthèses de plusieurs lois. Le mouvement d'un bouchon flottant à la surface de l'eau d'un torrent dépend simultanément des lois de Mécanique des fluides de l'eau et des lois de Newton. La nature fait constamment et instantanément la synthèse de toutes les lois qui s'appliquent à un système donné, quel qu'il soit.

Or la seule manière d'exprimer tous les ensembles de conditions physiques possibles est d'utiliser un algorithme comprenant le nombre d'étapes de raisonnement nécessaires, avec des conditions de la forme :

« Si <condition> Alors <loi à appliquer avec ses paramètres, ou à interrompre> ».

On doit donc postuler :

- Que le déterminisme des lois naturelles peut toujours décrire les conditions de début ou fin d'exécution d'une loi, c'est-à-dire l'algorithme correspondant ;
- Que toutes les lois physiques que l'homme peut définir sont soumises à des conditions de lancement ou arrêt descriptibles par des algorithmes.

Lois d'évolution et lois d'interruption

Compte tenu de ces postulats, toutes les lois physiques possibles appartiennent à l'une des deux catégories suivantes :

- *les lois d'évolution*, comprenant les lois descriptives, les lois de décomposition ou de fusion et, de manière générale, toutes les lois physiques où intervient un échange d'énergie ;
- *les lois conditionnelles* comme le principe d'incertitude de Heisenberg, sans échange d'énergie, qu'on appellera désormais *lois d'interruption*.

Ces lois sont complémentaires : une loi d'évolution ne se conçoit pas sans loi d'interruption qui en déclenche ou interrompt l'application ; et une loi d'interruption n'existe que pour régir des lois d'évolution.

1.4.1 Evolutions non déterministes

Voir d'abord *Système conservatif ou dissipatif – Force conservative ou dissipative*.

Dans la nature beaucoup d'évolutions sont *dissipatives*, c'est-à-dire accompagnées de frottements et/ou d'échanges d'énergie divers impossibles à connaître avec précision ; de telles évolutions ne peuvent être déterministes, parce qu'on ne connaît pas avec précision leurs conditions de déroulement.

Le caractère déterministe s'applique donc aux évolutions de systèmes fermés, qualifiés de *conservatifs* car leur énergie se conserve pendant l'évolution.

- Le mouvement des planètes est donc conservatif, la vie physiologique d'un être vivant est dissipative.
- A l'échelle atomique, la décohérence d'un système en superposition d'états est nécessairement dissipative et irréversible. Son résultat est un choix, par nature imprédictible, d'un des états superposés. (Voir *Définition du déterminisme statistique*.)
- Les modèles mathématiques de systèmes sont déterministes par souci de simplicité, nous en verrons des exemples ; ils ne pourront donc qu'être approximatifs pour les systèmes dissipatifs.

1.5 Déterminisme étendu

Le déterminisme régissant toutes les lois ci-dessus, d'évolution ou d'interruption, sera appelé *déterminisme étendu*. Par construction, il régit toutes les lois naturelles que l'homme peut définir. Nous reviendrons en détail sur ce sujet ultérieurement.

1.6 Hasard

Le qualificatif « déterministe » a pour opposé « au hasard ». Relève du hasard toute situation ou évolution qui n'est régie par aucune règle (selon le contexte où on l'applique : d'existence, ou de structure, ou de dimension, etc.).

Comme toute affirmation, cette absence de règle devrait être démontrable : l'ignorance de l'existence d'une règle par une personne ne justifie pas qu'elle qualifie le système de « au hasard ». Mais comme il est impossible de démontrer que cette existence contredirait une certitude établie, on doit toujours postuler le hasard en assumant son caractère hypothétique.

Au hasard

Une variable est au hasard quand sa valeur ne relève d'aucune loi statistique, d'aucune possibilité de prédiction d'une valeur future connaissant une ou des valeurs passées. Cette variable n'est connue, en plus de son type (numérique, binaire...) que par un domaine d'existence comme un intervalle ou un ensemble de valeurs discrètes.

Stochastique

Stochastique signifie « qui relève d'une probabilité », comme le résultat d'un lancer de dé. Une variable est stochastique lorsque ses valeurs sont distribuées selon une loi de probabilité comme la Loi normale, la Loi de Poisson, la Loi Binomiale ou la Loi uniforme (dont les valeurs sont équiprobables, comme celles d'un lancer de dé).

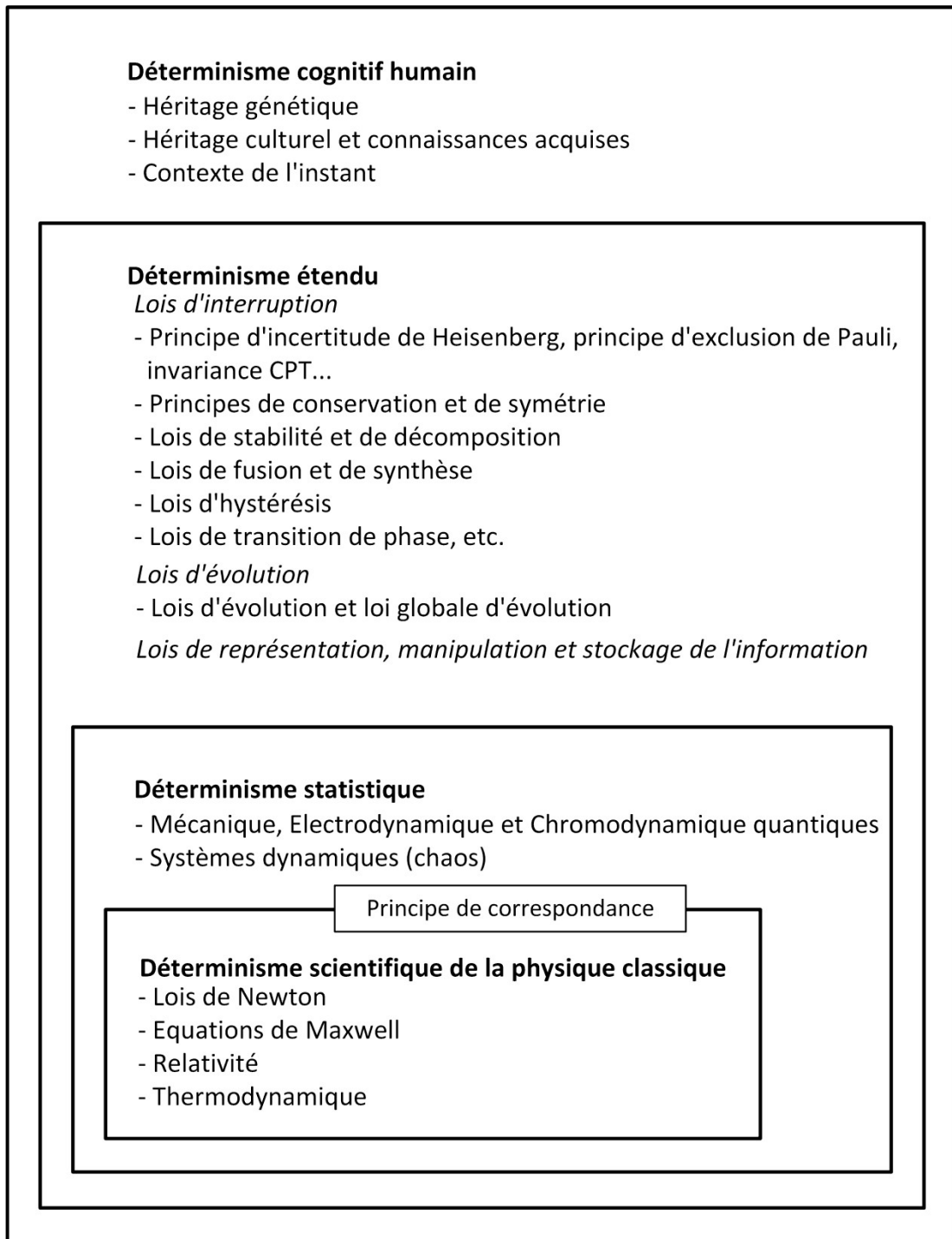
Différence entre stochastique et déterministe

Dans les mêmes circonstances initiales, un processus stochastique donne des valeurs distinctes, distribuées selon sa loi de probabilité. Un processus déterministe reproduit une même valeur (à l'échelle macroscopique), ou un même ensemble de valeurs superposées si son résultat n'est pas unique (à l'échelle atomique).

Le hasard est étudié en détail plus bas : voir *Hasard*.

1.7 Ensemble des niveaux de déterminisme

Voici le classement par niveaux des divers types de déterminisme :



1.8 Utilité du déterminisme : compréhension, prévision, prédiction

Avant d'agir, l'homme a besoin de *comprendre* la situation, ainsi que de *prévoir* son évolution et de *prédire les conséquences exactes* de cette évolution. Compréhension et prévision de l'évolution naturelle d'un système sont régies par un principe

philosophique : le déterminisme ; croire qu'il en est ainsi, c'est adopter la doctrine du déterminisme.

- *Comprendre* la situation d'un système, c'est décrire :
 - son état actuel dans son environnement ;
 - son évolution passée, prélude à une compréhension causale du phénomène et une réponse à la question : était-elle inévitable ?
- *Prévoir l'évolution d'un système*, c'est :
 - décrire qualitativement cette évolution :
 - ✓ déroulement, variables et domaine de définition ;
 - ✓ est-elle bornée ou diverge-t-elle (va-t-elle à l'infini) ;
 - ✓ diagramme des bifurcations ;
 - ✓ a-t-elle un résultat unique ou y a-t-il un ensemble de résultats (et si oui, quelle est la structure de cet ensemble - par exemple une distribution statistique de valeurs) ?
 - ✓ a-t-elle des symétries, une auto-similarité, des propriétés statistiques ?
 - ✓ a-t-elle des solutions sensibles aux conditions initiales ?
 - ✓ si elle est bornée va-t-elle vers une forme limite, par exemple asymptotique à une courbe (voir *Systèmes dissipatifs par frottements*) ou oscille-t-elle indéfiniment ? ;
 - ✓ répond-elle aux conditions d'universalité ? (voir *Diagramme des bifurcations - Universalité - Constante de Feigenbaum*) ;
 - ✓ Si elle ne va pas vers une forme limite, est-elle au moins stable ou est-elle chaotique ?
 - décrire quantitativement cette évolution par une loi physique, qu'il faut donc connaître.
- *Prédire les conséquences* de l'évolution future d'un système, c'est :
 - décrire les états futurs du système, avec la précision attendue de leurs valeurs ;
si cette précision n'est valable qu'à un horizon limité – comme c'est le cas pour le déplacement d'une particule atomique dont le paquet d'ondes s'étale progressivement, ou pour un système dynamique chaotique – chiffrer cet horizon ;
 - évaluer les interactions de ce système avec son environnement.

1.8.1 Différence entre prévoir et prédire

Dans ce texte :

- *Prévoir* une évolution, c'est conjecturer qu'elle se produira par application d'une loi physique connue ; l'évolution est supposée possible, mais non certaine : elle peut n'être qu'une conjecture. Exemple : je tiens une pierre à la main ; si je la lâche, je prévois qu'elle tombera d'un mouvement uniformément accéléré.
Prévoir c'est aussi décrire qualitativement l'évolution (comme ci-dessus).
- *Prédire* une situation, c'est annoncer le résultat de l'évolution prévue, et en décrire les détails. Exemple : je prédis que la pierre tombera à la position précise x (à Δx près) à l'instant t (à Δt près).
 - En physique classique, la prédiction porte sur une situation unique, précise ;

- En Mécanique quantique, la prédiction porte sur un ensemble de valeurs, chacune associée à une probabilité ou une densité de probabilité : la Mécanique quantique substitue une probabilité à la certitude du déterminisme scientifique.

Conséquences déterministes

1. Le comportement évolutif d'un système déterministe est prévisible par définition ; mais il peut :
 - ne pas être prédictible, par exemple s'il est chaotique : nous verrons cela à propos du *Chaos* ;
 - n'être prédictible qu'en tant qu'élément indéterminé d'un ensemble prédictible, s'il est à l'échelle atomique où les lois d'évolution sont celles (statistiques) de la Mécanique quantique.

2. La loi d'évolution d'une situation donnée ne dépend pas du système d'axes de référence (le référentiel).

On peut *prévoir* la même évolution selon cette loi dans tout référentiel. Mais *prédire* les résultats numériques de cette loi dépend du mouvement relatif de l'observateur-prédicteur par rapport au référentiel où l'évolution a lieu. Nous verrons cela à propos de la *Relativité restreinte*.

3. Le déterminisme entraîne la prévisibilité, mais pas la prédictibilité.

Cela se produira en physique quantique et pour les phénomènes chaotiques.

1.8.2 Le caractère déterministe ne doit pas être jugé à l'aide de situations

Le principe du déterminisme a vocation à régir toutes les lois de la nature. Les philosophes ont souvent l'habitude de juger le caractère déterministe d'une telle loi d'après le résultat de son application, par exemple en vérifiant qu'il ne dépend pas de causes autres que la situation initiale.

Or un résultat est une notion humaine définie par des conditions arbitraires : « à la fin de », « à tel endroit », etc. En jugeant le caractère déterministe d'une évolution naturelle d'après son résultat on applique des critères humains, à validité limitée aux conditions arbitraires (instant, lieu, valeur d'une variable...) définissant ce résultat. Mais pour être objectif, le résultat d'une loi d'évolution ne doit pas dépendre de critères arbitraires. C'est pourquoi dans la condition « ...est déterministe parce que son *résultat* ne dépend que... » le mot « résultat » doit être remplacée par « évolution » : la dépendance aux seules conditions initiales doit être vérifiée pendant toute l'évolution, pas seulement dans des circonstances arbitraires.

Le caractère ininterrompu de la cause d'une évolution doit se traduire par l'ininterrompabilité de l'application de sa loi. On ne peut étudier et juger cette application à des instants distincts, et la loi doit s'appliquer continuellement tant que les hypothèses initiales restent vraies.

Critique des raisonnements par chaînes de causalité

Cette remarque implique une critique du modèle d'évolution causale de philosophes comme Kant, qui ne raisonnent qu'avec des chaînes de causalité faites de situations successives distinctes dans le temps. Leurs raisonnements souffrent alors de

problèmes de commencement et de fin du temps. Ils souffrent aussi de problèmes de causalité, dus à l'incompatibilité logique entre la continuité de l'évolution et la discontinuité des instants de jugement. La situation infiniment lointaine dans le passé ou l'avenir n'existe pas (de même que l'infini n'est pas un nombre). Des questions comme « le monde a-t-il un commencement, une fin ? » et « y a-t-il une cause première, une fin ultime ? » doivent donc s'étudier comme une fonction continue du temps lorsque celui-ci tend vers l'infini du passé ou du futur, en prenant en compte les possibilités de convergence et de divergence à distance finie ou à l'infini. Les études de phénomènes continus par raisonnement philosophique à étapes purement logiques butent sur des impossibilités comme le *Paradoxe d'Achille et de la tortue* (voir ce titre).

1.9 Postulat du déterminisme scientifique

Enoncé :

L'évolution dans le temps d'un système physique est régie par deux postulats : le postulat de causalité et la règle de stabilité.

1.9.1 Définition du postulat de causalité

Le postulat de causalité est une condition nécessaire et suffisante.

Condition nécessaire

Tout phénomène (situation ou évolution constatées) a nécessairement dans l'Univers une cause efficace (situation ayant déclenché une évolution) qui l'a précédé et dont il résulte.

Conséquences :

- Tout ce qui existe, a existé ou existera dans l'Univers a une chaîne de causalité remontant au Big Bang, commencement de l'Univers ;
- Aucune intervention transcendante (extérieure à l'Univers) n'est possible : aucune n'a créé, ne créera ou ne modifiera quelque chose dans l'Univers, parce que l'Univers étant en expansion plus rapide que la lumière cette intervention se propagerait plus vite que c , ce que la Relativité interdit.

Aucune cause de l'Univers ne peut agir à l'extérieur – si cet extérieur existe (même raison : la Relativité).

Condition suffisante

Il suffit que la cause efficace (situation) existe dans l'Univers pour que la conséquence (évolution) y ait lieu immédiatement : c'est une certitude.

Exemple : je tiens une pierre dans ma main ;

- Si elle tombe, c'est que je l'ai lâchée : condition nécessaire ;
- Si je la lâche elle tombe, condition suffisante : la cause (lâcher la pierre) est alors aussi appelée *cause efficace*.

La condition suffisante d'évolution ne suffit pas pour que celle-ci ait un caractère déterministe : il faut en plus qu'elle soit régie par une loi, c'est-à-dire qu'elle respecte la *Règle de stabilité* suivante.

Remarque importante : la définition du postulat de causalité ne promet qu'une évolution conforme à une loi stable ; elle ne promet aucune prédictibilité de résultat.

1.9.2 Conséquences déterministes du postulat de causalité

Dans certains cas favorables, le postulat de causalité répond aux besoins de la pensée rationnelle de comprendre et de prévoir :

- La condition nécessaire permet *d'expliquer* au moins en partie une constatation (évolution ou situation), en remontant le temps jusqu'à sa cause :
« si la pierre tombe, c'est que je l'ai lâchée » ;
- La condition suffisante permet *de prévoir* une conséquence, en suivant le temps vers l'avenir depuis sa cause : l'évolution immédiate est déclenchée à coup sûr :
« si je lâche la pierre, elle tombe (c'est certain) ».

Le postulat de causalité fait partie des principes de l'entendement

Kant écrit, page 647 de la *Critique* : "Si ce sont des principes de l'entendement (par exemple, celui de la causalité)..."

Ce postulat est utilisé si spontanément qu'on fait parfois l'erreur de considérer la causalité comme un principe de la Logique. Or il n'y a de causalité que pour les phénomènes physiques comprenant un échange d'énergie (on parle aussi de cause efficace, ou efficiente ou suffisante) ; les causes matérielle, finale et formelle d'Aristote ne sont pas soumises à une loi naturelle de causalité.

1.9.3 Règle de stabilité (universalité, reproductibilité, invariance)

Énoncé :

La même cause produira le même effet, partout et toujours.

Cette règle postule que pour toute situation identique à une situation donnée S_0 , qui entraîne une évolution ayant pour conséquence une situation S :

- *La même loi d'évolution de la nature* produira une situation identique à S au bout d'un certain temps ;
- Cette loi étant *unique*, une cause donnée entraînera toujours la même évolution ;
- Cette loi *ne varie pas*, le même énoncé s'appliquant :
 - dans tout l'espace, lorsqu'on y considère des points d'application successifs distincts,
 - dans le présent, le passé et l'avenir.

Conséquence

Si deux systèmes fermés sont identiques, ils le resteront en subissant la même évolution, quel que soit leur éloignement dans l'espace ou le temps.

1.9.4 Tout changement de cause suffisante est régi par une loi d'interruption

Une évolution se poursuit, régie par la même loi d'évolution, tant qu'une loi d'interruption n'intervient pas pour déclencher l'application d'une autre loi d'évolution.

▪ *Exemple d'évolution 1*

Quand on chauffe de l'eau liquide à pression constante :

- sa température croît tant qu'elle n'a pas atteint le point d'ébullition ;
- la poursuite du chauffage entraîne une ébullition à température constante qu'il reste du liquide ;
- elle entraîne ensuite une élévation de température de la vapeur.

Il y a dans cette expérience 3 lois d'évolution différentes séparées par 2 lois d'interruption ; ainsi, il y a 3 chaleurs spécifiques (en joules/kg et par degré) : celle de l'eau liquide, celle de la vaporisation et celle de la vapeur.

▪ *Exemple d'évolution 2*

A l'échelle atomique, lorsqu'une évolution décrite par l'équation de Schrödinger a produit une *superposition cohérente d'états*, celle-ci persiste jusqu'à ce qu'une intervention extérieure ayant la violence d'un phénomène de l'échelle macroscopique (comme une mesure ou un choc thermique) vienne la perturber ; la superposition est alors détruite (on dit qu'il y a *décohérence*) et l'évolution du système perturbé se poursuit avec un seul des états précédemment superposés.

1.9.5 Limites du déterminisme scientifique

Nous avons vu que toutes les lois naturelles d'évolution ne peuvent pas être régies par le postulat de causalité ci-dessus, traditionnellement qualifié de « scientifique » et destiné à la physique macroscopique ; nous allons donc l'étendre plus bas :

- D'abord pour couvrir les lois de la physique atomique et les modèles itératifs d'évolution des systèmes dynamiques, sous le nom de *déterminisme statistique* ;
- Ensuite pour couvrir toutes les lois de la physique, sous le nom de *déterminisme étendu*.

Autres noms du déterminisme scientifique

- Kant a appelé ce principe *Principe de raison suffisante*.
- Schopenhauer l'a appelé *Principe de raison suffisante du devenir* dans [B11].

Le déterminisme scientifique est approfondi plus bas : voir *Déterminisme scientifique*.

1.10 Déterminisme statistique

1.10.1 Evolution vers un ensemble d'états superposés

Mais l'expérience nous a appris qu'à l'échelle atomique l'unicité d'un résultat d'évolution n'est pas certaine : l'évolution d'un système à partir d'une situation de départ peut s'interpréter comme *un ensemble d'évolutions simultanées*, produisant chacune un état final ; et ces états finaux existent (ou peuvent exister) tous en même temps : on les dit *superposés*.

Ce type d'évolution multiple à partir d'un état initial ne relève pas du déterminisme traditionnel, mais d'un déterminisme particulier : le *déterminisme statistique*.

Exemple : voir le sous-titre *Exemple de différence entre physique newtonienne et Mécanique quantique* au paragraphe *La Mécanique quantique, outil mathématique de l'échelle atomique*.

A l'échelle atomique on ne peut plus décrire un résultat physique unique, car sa description comprend des variables stochastiques ; et l'évolution d'une situation initiale produira *un ensemble* de résultats, chacun assorti d'une probabilité : la certitude déterministe est devenue statistique.

Einstein a proposé en 1904 une théorie sur les ondes électromagnétiques selon laquelle leur énergie existe et se propage sous forme de paquets indivisibles (quanta) appelés photons ; cette théorie s'opposait sur ce point-là à celle de Maxwell, admise à l'époque, pour qui une onde électromagnétique est continue. Une synthèse du modèle corpusculaire d'Einstein avec le modèle continu de Maxwell ne fut établie par Schrödinger et Heisenberg que dans les années 1920.

Selon la physique atomique actuelle, dont l'outil mathématique est la Mécanique quantique, le comportement d'un photon est imprévisible, mais le comportement moyen d'un grand nombre de photons est régi par les équations de Maxwell sous forme d'ondes continues.

Un ensemble de résultats d'évolution est parfois aussi *corrélé*

L'ensemble des solutions d'une équation d'évolution décrite par la Mécanique quantique est parfois aussi *corrélé* (on dit aussi *intriqué*), c'est-à-dire issu de la même situation initiale, décrit par la même fonction d'onde et respectant des conditions évidentes d'invariance connues à l'échelle macroscopique, comme la conservation de la matière-énergie et la conservation de la charge électrique. Nous en parlons au paragraphe *Déterminisme statistique*, sous-titre *Admettre les vérités mathématiques même contraires à notre intuition*.

Une nouvelle réalité multiple : la superposition d'états quantiques

Du point de vue philosophique, l'expérience nous conduit à accepter un nouveau concept de réalité physique, celui d'un objet existant sous forme d'un ensemble d'états réels ayant en commun les invariants de l'objet initial comme la masse et la charge électrique. La philosophie doit accepter et prendre en compte cette réalité dans ses réflexions sur le déterminisme, car elle correspond à une réalité physique.

Exemple de superposition d'états

Voir au paragraphe *La contingence des situations du passé, appréciation spéculative* l'exemple de la molécule d'ammoniac NH_3 .

1.10.2 Décohérence : passage d'une superposition cohérente à un de ses objets

Mais avant d'accepter cette forme d'existence multiple, l'homme a désiré la voir, la mesurer, et cela ne fut pas possible : à chaque tentative physique de mesure faite à l'échelle macroscopique, celle-ci interfère avec l'objet étudié car elle met en œuvre nécessairement une énergie : pour savoir qu'un photon existe, par exemple, il faut l'absorber sur une plaque photographique ou dans une cellule photoélectrique, donc le détruire.

Toute interférence avec un objet en superposition cohérente à l'échelle atomique détruit cette superposition en ne retenant qu'un des objets superposés, parce que

l'énergie de l'échelle macroscopique mise en œuvre pour voir l'objet superposé à l'échelle atomique est infiniment plus grande que les énergies mises en œuvre pour parvenir à la superposition et la conserver.

Une superposition d'états est toujours très fragile : la moindre perturbation la détruit ; l'ordinateur quantique de Rigetti, maintenu à une température de 1°K (-272° C) pour que sa mémoire en aluminium puisse être supraconductrice, ne peut garantir la durée des superpositions plus de 90 μ s (moins d'un dix-millième de seconde) du fait de l'agitation thermique [B153].

1.10.2.1.1 A l'échelle atomique toute mesure perturbe le système mesuré

Pour fournir un résultat visible, une mesure utilise un dispositif macroscopique. Or ce dispositif ne peut pas ne pas échanger de l'énergie (par exemple un photon) avec l'objet qu'il mesure, énergie qui fait donc nécessairement partie de l'expérience, qui doit donc être conçue pour en tenir compte.

1.10.2.1.2 Réduction de la fonction d'onde – Preuve physique de la décohérence

Pour bien comprendre ce paragraphe, lire d'abord :

- En annexe : *Application linéaire, opérateur linéaire, valeur propre, vecteur propre*
- Ci-dessous : *Fonction d'onde*.

Le passage d'une superposition cohérente à un de ses états, donc le choix d'un élément de l'ensemble des résultats superposés d'une évolution, réduit cette superposition d'états à un état unique visible à l'échelle macroscopique.

Cette réduction, appelée *décohérence*, réduit la fonction d'onde du système complet {objet en états superposés + dispositif de mesure} à celle d'une valeur propre particulière de l'observable du dispositif. Elle choisit l'un des objets superposés, lui attribue les paramètres globaux de l'objet initial comme la masse, et le laisse subsister à l'échelle macroscopique. Il est impossible de prévoir lequel des objets superposés sera choisi, car on ne peut décrire avec précision les paramètres de l'énorme perturbation macroscopique infligée à la superposition à l'état atomique par la décohérence, et *c'est cette mesure perturbante qui crée l'état observé à partir de la superposition*.

(Preuves expérimentales : [B52], [B156]).

Les lois physiques de l'échelle atomique sont donc régies par un déterminisme incorporant les possibilités de résultats d'évolution multiples, d'état d'objet en superposition cohérente, et de décohérence choisissant un des objets superposés : ce sera le *déterminisme statistique*.

1.10.2.1.3 C'est la mesure qui crée son résultat ; avant il n'existait pas

Il faut bien comprendre que l'évolution d'un système à l'échelle atomique crée un ensemble de résultats, pas un résultat particulier. De même qu'en mathématiques on ne confond pas un ensemble et un de ses éléments, en physique quantique une évolution crée un ensemble de résultats potentiels ; à la fin de cette évolution le résultat mesuré n'existe pas encore :

C'est la mesure qui crée le résultat, en le choisissant parmi les éléments de l'ensemble de résultats virtuels créé par l'évolution ;

contrairement à la physique macroscopique, aucune observable de physique quantique n'a une valeur indépendamment de sa mesure.

Mais qu'est-ce que ce processus de choix, quel est son mécanisme physique ?

Le déroulement physique du choix de l'élément de l'ensemble de résultats virtuels de l'évolution dépend du dispositif de mesure, il n'y a pas de règle générale. Mais dans tous les cas il fait intervenir de l'énergie, il n'est pas neutre ; et cette énergie est suffisante pour être cause d'un résultat visible à l'échelle macroscopique.

Exemple : un photon est détruit par son impact sur une cellule photoélectrique qui produit un signal électrique au résultat visible.

Dans tous les cas, la mesure amplifie l'énergie qu'elle échange avec le dispositif expérimental dont elle fait partie : sans cette amplification l'homme ne pourrait rien voir, ses sens n'étant pas assez sensibles. Or cette amplification met en jeu une énergie beaucoup plus importante que celle de l'échelle atomique, énergie qui ne fait pas partie de l'expérience, qui n'est pas intervenue dans l'évolution de celle-ci, dont la loi d'évolution ne peut donc tenir compte.

1.10.3 Définition du déterminisme statistique

Le déterminisme *scientifique* de Newton et Maxwell ne pouvant régir toutes les évolutions physiques, notamment celles de l'échelle atomique et des systèmes dynamiques (chaotiques), nous en avons défini une extension : le déterminisme *statistique*. C'est une doctrine selon laquelle l'évolution dans le temps d'une situation sous l'effet des lois de la nature est régie par le postulat de causalité et la règle de stabilité (comme le déterminisme scientifique), mais *l'application de ces lois peut donner des résultats à distribution stochastique* : la prédictibilité est statistique.

1.10.4 Lois d'évolution régies par le déterminisme statistique

Le déterminisme statistique est un sur-ensemble du déterminisme scientifique, en plus duquel il régit des lois d'évolution dont le résultat est un ensemble d'états :

- Dont les éléments sont prédictibles :
 - Chacun avec une probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles discrets ;
 - Chacun avec une densité de probabilité d'occurrence, dans le cas des ensembles continus (voir en annexe *Densité de probabilité*).
- Dont l'ensemble des éléments :
 - Soit coexistent en superposition cohérente qui peut subir une décohérence ; celle-ci choisit un des éléments de manière nécessairement imprédictible (comme pour l'ammoniac ; voir aussi *Théorie de la résonance chimique*).
 - Soit subissent un choix stochastique produisant un élément unique (comme dans le cas d'un lancer de dé).

Le déterminisme statistique est étudié de manière détaillée plus bas : voir *Déterminisme statistique*.