

1. Déterminisme, hasard et chaos : généralités

Ce chapitre n'est qu'une introduction ; ses notions sont approfondies plus bas. Les personnes surprises par certaines affirmations en trouveront les explications et justifications nécessaires soit plus loin dans le texte, soit dans un paragraphe de la table des matières ou du vocabulaire.

1.1 Caractères déterministe, au hasard et stochastique

D'après le *Dictionnaire de l'Académie* [B60] :

Le déterminisme est un principe scientifique d'après lequel tout phénomène est régi par une (ou plusieurs) loi(s) nécessaire(s) telle(s) que les mêmes causes entraînent les mêmes effets, dans les mêmes conditions ou circonstances.

Autre énoncé

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.

La plupart des gens définissent à tort un résultat comme une *valeur de variable* ou *l'état du système* qui a évolué, définitions incorrectes car nous verrons que le déterminisme n'entraîne pas la prédictibilité. Le résultat des circonstances initiales ne peut être qu'une *évolution selon une loi*.

Sont déterministes, par exemple :

- Une opération de calcul ;
- Un programme d'ordinateur ;
- La loi physique de la chute des corps ;
- L'ordre des éléments d'un ensemble muni d'une relation d'ordre ;
- Une expérience de physique produisant une molécule avec plusieurs états en superposition, comme la molécule d'ammoniac décrite dans le paragraphe *La contingence des situations du passé, appréciation spéculative*.

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).

Conséquences :

- *Reproductibilité due à l'existence de lois*
Une opération déterministe est reproductible : en recommençant avec les mêmes conditions initiales elle produit toujours le même résultat. Nous verrons toutefois que ce résultat est parfois un ensemble, pas une valeur unique.
- *Les évolutions dissipatives ne sont pas déterministes*
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 par nature déterministes, nous en verrons des exemples ; ils ne pourront donc qu'être approximatifs pour les systèmes dissipatifs.

- *Déterminisme et prévisibilité*
Etant conforme à des lois, ce qui est déterministe est prévisible, mais en principe seulement, nous verrons cela plus bas.
- *Déterminisme et unicité du résultat prévu*
La définition du déterminisme ne promet nullement un résultat (état) unique pour une évolution régie par une loi déterministe. Certains philosophes ou scientifiques croient à tort le contraire [B148], [B154].
- *Quelque chose est ou n'est pas déterministe*
Rien ne peut être partiellement déterministe, presque déterministe, etc., parce que les lois déterministes dont l'homme parle concernent des objets non vivants et qu'il les a définies sans exception ni compromis.

Les opposés de *déterministe* pour une variable : *au hasard* et *stochastique*

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 déterminisme 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).

1.2 Premières définitions du déterminisme

1.2.1 Définition d'un phénomène

Un phénomène est un fait objectif, observé ou observable, susceptible de se reproduire. C'est une réalité extérieure perçue ou perceptible par l'homme, qui peut la comprendre et la décrire.

En langage courant, le mot phénomène désigne :

- Tantôt *une situation* (l'état d'un système à un instant donné) ;
- Tantôt *une évolution* dans le temps et/ou l'espace, tous deux observables et susceptibles de se reproduire ; exemple : le phénomène des marées.

1.2.2 Les divers types de déterminisme

Il y a plusieurs types de déterminisme. Comme il nous faudra du temps pour approfondir les détails à leur propos, voici des définitions succinctes provisoires de ces divers types que nous approfondirons tout au long de ce texte.

1.2.2.1 Définition générique du déterminisme

Le déterminisme est une doctrine d'après laquelle les phénomènes naturels (états instantanés et évolutions) sont soumis à des lois nécessaires de causalité, lois qui sont déterministes. La doctrine postule que :

- Tout phénomène naturel est intelligible : rien n'empêche l'homme de le comprendre, de le décrire et d'en énoncer des lois.
- Tout phénomène naturel s'explique par une cause naturelle, sans recourir à une intervention ou une volonté, divines ou extérieures à l'Univers.

1.2.2.2 Déterminisme philosophique

Doctrine théorique selon laquelle la connaissance parfaite de l'état d'un système à un instant donné permettrait d'en déduire tous ses états futurs et de reconstituer par la pensée la succession de ses états passés.

1.2.2.3 Déterminisme scientifique

Doctrine selon laquelle toute évolution naturelle a pour condition nécessaire et suffisante une situation initiale et une loi d'évolution stable. Cette doctrine convient à la physique de Newton et de Maxwell (dite "classique"), ainsi qu'à la Relativité (restreinte de 1905 et générale de 1915).

Le déterminisme scientifique a donc pour fondement l'ensemble indissociable du *postulat de causalité* et de la *règle de stabilité*, décrits aux paragraphes :

- *Postulat de causalité et lois d'interruption* ;
- *Règle de stabilité (universalité, reproductibilité, invariance)*.

1.2.2.4 Déterminisme statistique

Doctrine qui comprend le déterminisme scientifique et précise que les lois d'évolution peuvent être de type statistique, avec des variables stochastiques. Cette doctrine convient aussi à la physique quantique et aux phénomènes chaotiques, mais elle ne

rend pas compte de l'indétermination due au principe d'incertitude de Heisenberg, des fluctuations quantiques et des instabilités des noyaux atomiques.

1.2.2.5 Déterminisme étendu

Doctrines qui comprennent le déterminisme statistique et rendent compte du principe d'incertitude de Heisenberg, des fluctuations quantiques, des instabilités des noyaux atomiques et des phénomènes d'hystérésis ; mais au-delà de ces phénomènes particuliers, elle fournit un modèle théorique de la manière dont la nature peut « décider » des évolutions dans les circonstances les plus complexes.

Pour ce faire, elle classe les lois de la nature en deux types : les *lois d'évolution* et les *lois d'interruption* ; ces dernières régissent les déclenchements et arrêts des évolutions de phénomènes, avec toute la puissance descriptive d'une logique informatique. Le principe d'incertitude de Heisenberg, les fluctuations quantiques, et les instabilités nucléaires et les phénomènes d'hystérésis deviennent ainsi des conditions de loi d'interruption.

Le déterminisme étendu régit toutes les lois de la nature, en précisant des limites à la prédictibilité de résultats d'évolution.

1.2.2.6 Déterminisme humain

Doctrines des processus décisionnels humains.

Origines des valeurs et critères d'appréciation

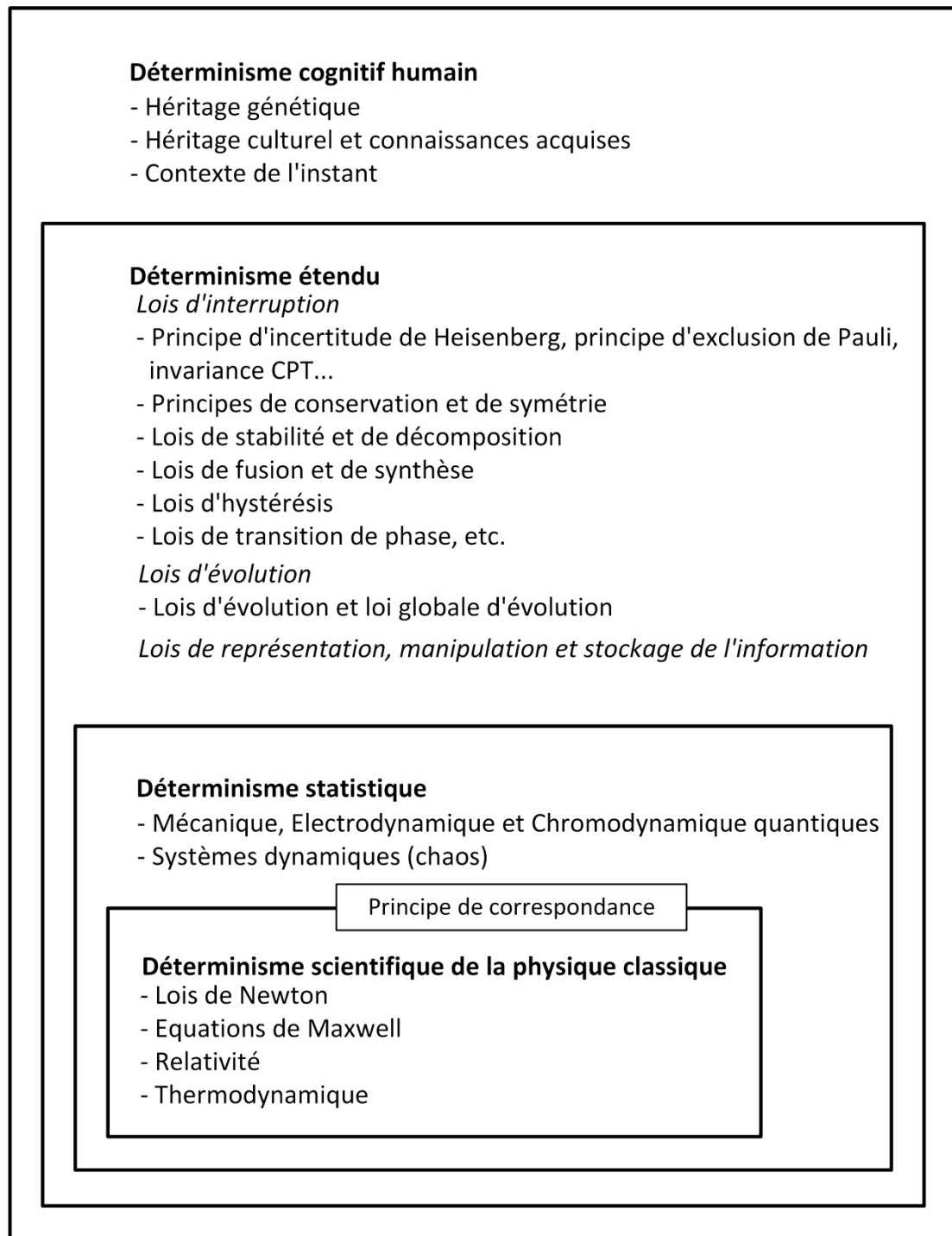
- Héritage génétique ;
- Héritage culturel et les connaissances acquises ;
- Contexte de l'instant : matériel, personnel et social.

Mécanismes psychiques

- Conscience et conscience de soi ;
- Le cerveau, organe interpréteur ;
- Subconscient et inconscient ;
- Affects et mécanismes psychologiques ;
- L'entendement et la raison ne sont que des outils au service des affects.

1.2.2.7 Niveaux de déterminisme

Voici le Classement par niveaux des divers types de déterminisme selon Daniel Martin :



1.2.2.8 Lois d'évolution et lois d'interruption de la nature

On peut classer les lois de changement de la nature en deux types sur lesquels nous reviendrons avec beaucoup de détails plus bas, au chapitre 2 *Déterminisme : étude détaillée*, paragraphe *Lois d'interruption et lois d'évolution*.

- Les lois d'évolution décrivent toutes les règles de changement d'un système physique relevant d'un des types de déterminisme ci-dessus.

- Les lois d'interruption décrivent les règles qui régissent le début et la fin d'une loi d'évolution, et les règles de limitation et de synthèse applicables aux systèmes les plus complexes où plusieurs lois d'évolution s'appliquent simultanément.

1.3 Philosophie du déterminisme

1.3.1 Raisons d'être 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* d'une éventuelle évolution ou action. 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-similitude, 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 son 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 ;
 - les interactions de ce système avec son environnement.

1.3.1.1 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

- 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.
- 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*.
- Nous verrons que le déterminisme entraîne la prévisibilité, mais pas la prédictibilité ; cela se produira en physique quantique et pour les phénomènes chaotiques.

1.3.2 Le déterminisme étendu régit toutes les lois physiques

Le déterminisme n'est pas un *principe de logique*, bien qu'on ne puisse le déduire de principes supérieurs, car il ne s'applique qu'à des évolutions de la nature et des opérations humaines ; c'est un *postulat*, parce que certaines lois déterministes sont construites par induction en généralisant des constatations expérimentales, et d'autres lois sont imaginées en tant que modèles de phénomènes (exemples : *Modèle standard des particules élémentaires* ; *Théorie de Grande unification*).

Une évolution *déterministe* est décrite par une loi permettant la prévision des états futurs connaissant l'état présent. Exemple : le mouvement d'un électron dans un champ électrique est régi par une loi d'évolution déterministe appelée *équation de Schrödinger* (sur laquelle nous reviendrons).