

# Hasard, chaos et déterminisme : *les limites des prédictions*

Mise à jour : 11/04/2012

Chacun de nous a des définitions du hasard, du chaos et du déterminisme. J'ai pris la liberté de modifier et compléter ces définitions par souci de rigueur et pour les rendre cohérentes entre elles. Le but de ce texte est de bien cerner les limites de ce qu'on peut prédire lors d'une évolution.

Dans la définition du déterminisme, je conjecture des restrictions de la contrainte de stabilité des lois d'évolution et de la nécessité des causes, conjecture lourde de conséquences.

Ce texte sert de 2<sup>e</sup> introduction au livre [\[1\]](#), à lire après la 1<sup>ère</sup>, [\[0\]](#).

## Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Prédiction d'évolutions physiques</b> .....  | <b>3</b>  |
| 1.1.1 Définition et promesses du déterminisme philosophique .....                                      | 3         |
| 1.1.2 Le déterminisme philosophique est contredit par des faits .....                                  | 4         |
| <b>1.2 Postulat de causalité</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>1.3 Principe d'homogénéité</b> .....  | <b>5</b>  |
| 1.3.1 Seul l'esprit humain peut ignorer le principe d'homogénéité .....                                | 7         |
| 1.3.2 Déterminisme et principe d'homogénéité .....   | 7         |
| 1.3.3 Domaine de vérité d'une science et principe d'homogénéité .....                                  | 7         |
| <b>1.4 Le déterminisme scientifique</b> .....  | <b>8</b>  |
| 1.4.1 Règle de stabilité .....   | 8         |
| 1.4.1.1 Importance de la vitesse et de l'amplitude d'une évolution .....                               | 8         |
| 1.4.2 Définition du déterminisme scientifique .....  | 9         |
| 1.4.2.1 Déterminisme des évolutions régies par des équations différentielles ....                      | 9         |
| 1.4.2.2 Déterminisme des algorithmes et des programmes d'ordinateur .....                              | 9         |
| 1.4.3 Déterminisme scientifique et obstacles à la prédiction .....                                     | 10        |
| 1.4.3.1 L'ignorance .....  | 10        |
| 1.4.3.2 L'imprécision .....  | 11        |
| 1.4.3.3 La complexité .....  | 14        |
| 1.4.3.4 Le hasard dans l'évolution selon une loi de la nature .....                                    | 17        |
| <b>1.5 Le hasard</b> .....   | <b>17</b> |
| 1.5.1 Définitions du hasard .....  | 17        |
| 1.5.1.1 Définition par conformité à une loi de distribution statistique .....                          | 18        |
| 1.5.1.2 Définition de René Thom .....  | 18        |
| 1.5.1.3 Définition par rencontre de chaînes de causalité indépendantes -<br>Hasard par ignorance ..... | 19        |
| 1.5.1.3.1 Impossibilité d'existence de chaînes de causalité indépendantes                              | 19        |
| 1.5.1.3.2 Rencontre imprévisible de chaînes de causalité distinctes                                    | 20        |
| 1.5.1.4 Définition par la quantité d'information .....   | 20        |
| 1.5.2 Des nombres, suites et ensembles sont-ils aléatoires ? .....                                     | 21        |
| 1.5.3 Hasard postulé et hasard prouvé .....  | 21        |
| 1.5.4 Différences entre hasard et fluctuations quantiques .....  | 23        |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 1.5.5   | Hasard et niveau de détail d'une prédiction.....   | 23 |
| 1.5.6   | Premières conclusions sur le hasard et la prédictibilité.....                            | 24 |
| 1.5.7   | Différences entre hasard, indétermination et incertitude en mécanique<br>quantique ..... | 24 |
| 1.5.8   | Résumé des conclusions sur le hasard dans l'évolution naturelle.....                     | 25 |
| 1.5.9   | Evolutions attribuées à tort au hasard .....   | 26 |
| 1.5.9.1 | Le hasard pour raisons psychologiques .....  | 26 |
| 1.5.9.2 | Le hasard par raison de contingence – Principe d'identité .....                          | 26 |
| 1.5.10  | Conséquences multiples d'une situation donnée - Décohérence .....                        | 28 |
| 1.5.11  | Il faut admettre les dualités de comportement .....                                      | 29 |
| 1.6     | Chaos.....   | 29 |
| 1.6.1   | Définition .....   | 30 |
| 1.6.2   | Conditions d'apparition d'une évolution chaotique – Série de Fourier.....                | 30 |
| 1.6.3   | Fluctuations faussement aléatoires d'un phénomène apériodique .....                      | 31 |
| 1.6.4   | Domaines où on connaît des évolutions chaotiques .....                                   | 35 |
| 1.7     | Turbulence .....   | 35 |
| 1.8     | Le déterminisme étendu.....  | 36 |
| 1.8.1   | Propriétés des lois de l'Univers .....   | 36 |
| 1.8.2   | Définition constructive du déterminisme étendu .....                                     | 37 |
| 1.8.2.1 | Validité de cette approche .....   | 38 |
| 1.8.3   | Universalité et unicité du déterminisme étendu .....                                     | 39 |
| 1.9     | Restriction du postulat de causalité .....   | 39 |
| 1.9.1   | Limites de la règle de stabilité du déterminisme .....                                   | 39 |
| 1.9.2   | Stabilité des lois d'évolution et situations nouvelles .....                             | 40 |
| 1.9.3   | Restriction du postulat de causalité.....  | 41 |
| 1.9.4   | Exemples d'apparitions .....   | 41 |
| 1.9.5   | Conséquences philosophiques .....  | 42 |
| 1.10    | Déterminisme étendu : un principe et un objectif .....                                   | 42 |
| 1.10.1  | Apports du déterminisme étendu aux prédictions d'évolution physique .....                | 42 |
| 2.      | Imprédictibilité de la pensée humaine .....  | 45 |
| 2.1     | La barrière de complexité .....  | 46 |
| 2.2     | Imprédictibilité des décisions économiques et boursières .....                           | 46 |
| 3.      | Références.....  | 47 |
| 4.      | Résumé des cas d'imprédictibilité.....   | 55 |

# 1. Prédiction d'évolutions physiques

Avant d'agir, l'homme a besoin de *comprendre* la situation, ainsi que de *prévoir* son évolution et les conséquences d'une éventuelle action. Après le cas simple d'une situation où n'interviennent que des lois physiques de la nature, nous aborderons la prédictibilité des raisonnements humains.

En matière d'évolution :

- *comprendre* une situation nécessite la connaissance du passé et de l'évolution depuis ce passé, pour situer l'état actuel par rapport à eux ;
- *prévoir* nécessite la connaissance des lois d'évolution qui s'appliquent à l'état actuel.

Le principe dont l'application permet la compréhension d'une situation physique et la prédiction de son évolution est *le déterminisme*. A part le déterminisme humain, hors sujet pour ce texte, je distingue trois formes de déterminisme :

- Le déterminisme philosophique ;
- Le déterminisme scientifique ;
- Le déterminisme étendu.

## 1.1.1 Définition et promesses du déterminisme philosophique

La définition traditionnelle du déterminisme philosophique a été publiée par Laplace en 1814 dans *l'Essai philosophique sur les probabilités*, où on lit pages 3 et 4 :

*"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 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."*

Le déterminisme philosophique affirme donc :

- Que l'avenir est complètement déterminé par le présent ;
- Qu'il est complètement prévisible connaissant parfaitement le présent ;
- Qu'une connaissance parfaite d'une situation présente permet de reconstituer en pensée tout le passé qui y a conduit ;
- Qu'il existe, pour toute situation présente, une chaîne de causalité unique commençant infiniment loin dans le passé et se poursuivant infiniment loin dans l'avenir.

### 1.1.2 Le déterminisme philosophique est contredit par des faits

Le déterminisme philosophique, qui nous promet la possibilité de prévoir tout l'avenir et de retrouver mentalement tout le passé, est contredit par de nombreux phénomènes de la nature cités dans le livre [1]. Comme il suffit d'un seul contre-exemple pour contredire une affirmation sans nuance, en voici un.

#### Décomposition radioactive (fission nucléaire)

*Un échantillon d'uranium 238 voit ses atomes se décomposer spontanément, sans aucune cause autre que le temps qui passe ; un atome d'uranium se transforme alors en un atome d'hélium et un atome de thorium. Le nombre d'atomes qui se décomposent par unité de temps suit une loi connue, qui prévoit que 50 % des atomes d'un échantillon de taille quelconque se décomposeront en un temps fixe T appelé « demi-vie de l'uranium 238 », puis la moitié *du reste* (c'est-à-dire  $\frac{1}{4}$ ) dans le même temps T, puis la moitié du reste ( $\frac{1}{8}$ ) dans le même temps T, etc.*

La décomposition radioactive naturelle, c'est-à-dire spontanée, s'explique par l'instabilité de l'énergie de liaison des neutrons et protons du noyau d'un atome radioactif. Ce phénomène est inexplicable dans le cadre de la physique macroscopique, mais il s'explique en mécanique quantique sous le nom *d'effet tunnel* : l'énergie d'excitation d'un noyau peut parfois dépasser l'énergie potentielle appelée « barrière de fission » de l'élément, entraînant une déformation si grande du noyau que celui-ci se décompose.

Contrairement à la promesse de prédiction de l'avenir du déterminisme philosophique, on ne peut savoir *quels* atomes se décomposeront pendant un intervalle de temps donné, ni à *quel instant* un atome particulier se décomposera, ni *quel est le premier* atome qui se décomposera, ni *quand* cela se produira. A l'échelle macroscopique, la décomposition radioactive suit une loi statistique, valable pour une population d'atomes mais ne permettant pas de prévoir l'évolution d'un atome donné. A l'échelle atomique, la stabilité d'un noyau dépend d'une énergie de liaison instable, qui varie sans cause externe à l'atome et ne permet de prévoir l'évolution de celui-ci (et son éventuelle décomposition) que de manière probabiliste. Le déterminisme philosophique de Laplace excluant les variations spontanées et imprévisibles ne s'applique donc pas aux décompositions radioactives naturelles.

En outre, lorsqu'un échantillon contient des atomes résultant d'une décomposition, on ne peut savoir à *quel instant* chacun d'eux s'est décomposé, ce qui contredit le déterminisme philosophique au sens reconstitution du passé.

Le déterminisme philosophique ne peut donc tenir ses promesses ni concernant la prédiction de l'avenir, ni concernant la reconstitution mentale du passé : c'est donc un principe faux dans le cas de la décomposition radioactive. Et comme, d'après le *rationalisme critique* expliqué dans le livre [1], il suffit d'un seul contre-exemple pour qu'une affirmation soit fausse, *nous considérons le déterminisme philosophique comme erroné* bien que la définition ci-dessus figure dans certains dictionnaires philosophiques.

Nous allons donc reprendre le problème de compréhension du présent et prédiction de l'avenir sur une base moins ambitieuse, en repartant de la causalité à la base du déterminisme philosophique et en abandonnant provisoirement sa promesse de prédiction et de reconstitution.

## 1.2 Postulat de causalité

Depuis qu'il existe, l'homme a remarqué certains enchaînements : une même situation *S* est toujours suivie du phénomène *P*. Par une démarche naturelle d'induction, il en a déduit un postulat général : « *Les mêmes causes produisent toujours les mêmes conséquences* ». Et en réfléchissant aux conditions qui régissaient les enchaînements observés, il en a déduit le postulat de causalité que j'énonce comme suit sous forme de condition nécessaire et suffisante.

### Définition du postulat de causalité

- Condition nécessaire : Toute situation a nécessairement une cause qui l'a précédée et dont elle résulte ; rien ne peut exister sans avoir été créé auparavant.

Donc, si je constate un phénomène ou une situation, je suis sûr qu'il ou elle a une cause dans le passé, mais je renonce pour le moment à pouvoir reconstituer mentalement ce passé en déduisant cette cause de sa conséquence observée, comme le promet le déterminisme philosophique.

- Condition suffisante : il suffit que la cause existe au départ pour que la conséquence ait lieu (c'est une certitude).

Notons que *cette conséquence est un phénomène d'évolution, pas une situation finale* : nous renonçons ainsi à la promesse de prédiction du résultat de l'évolution, en ne conservant que le postulat du déclenchement de celle-ci.

Exemple : je tiens une pierre dans ma main ;

- Elle tombe parce que je l'ai lâchée, condition nécessaire ;
- Si je la lâche elle tombe, condition suffisante.

*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* une conséquence (phénomène ou situation), en remontant le temps jusqu'à sa cause ;
- La condition suffisante permet *de prévoir* une conséquence, en suivant le temps depuis sa cause : l'évolution est déclenchée à coup sûr.

Certains philosophes appellent la causalité ci-dessus *cause efficace*. Dans ce texte il ne sera jamais question de cause finale, cause matérielle ou cause formelle.

Avant de poursuivre notre propos sur le hasard, le chaos et le déterminisme, nous avons besoin d'évoquer le principe d'homogénéité.

## 1.3 Principe d'homogénéité

Ce principe de logique est dû à Aristote, qui l'a énoncé sous forme d'interdit : "*On n'a pas le droit de conclure d'un genre à un autre*". Il voulait dire qu'une relation logique ne peut exister qu'entre deux objets du même genre. Exemples :

- Relation de physique : une relation ne peut exister qu'entre grandeurs de même type. Ainsi,  $A = B$  ;  $A \geq B$  et  $A \neq B$  ne sont possibles que si A et B sont tous deux des masses (ou des longueurs, etc.) Même condition pour l'addition  $A + B$ .

Attention aux pièges comme la comparaison de deux infinis du même type.

Exemple : les nombres entiers pairs forment un ensemble inclus dans celui des nombres entiers, mais comme le premier ne comprend pas les nombres impairs on aurait tendance à conclure qu'il comporte moins d'éléments que le second. En fait, puisqu'à chaque nombre pair on peut associer un nombre entier et un seul en le divisant par deux, et qu'à chaque nombre entier on peut associer un nombre pair et un seul en le multipliant par deux, l'existence de cette correspondance biunivoque fait que les deux ensembles ont le même nombre d'éléments. Eh oui !

Le paradoxe s'explique par le fait que chacun des deux ensembles a un nombre infini d'éléments. Mais comme l'infini n'est pas un nombre, chercher le plus grand de deux infinis n'a pas de sens s'ils sont de même « rang transfini ».

La notion de rang transfini, issue de la théorie des  $\aleph$  (aleph) de Cantor, nous entraînerait au-delà de l'objectif de ce livre. Disons simplement qu'il y a infiniment plus de nombres dans l'ensemble des nombres réels que dans celui des nombres entiers ; que l'ensemble des parties de l'ensemble des réels compte infiniment plus d'éléments (parties) qu'il n'y a de réels ; et qu'en considérant ainsi successivement des ensembles de parties de l'ensemble précédent on trouve une infinité d'ensembles, chacun avec infiniment plus d'éléments que le précédent.

- Relation de cause à effet : Les lois physiques d'évolution (déplacement ; transformation d'une forme d'énergie en une autre ou de matière en énergie ; échange de chaleur, etc.) sont des relations de *cause* (la situation initiale) à *effet* (l'évolution correspondante).
  - La cause et l'effet doivent appartenir au même domaine, étant en cela « du même genre ».
  - En outre, toute loi physique d'évolution doit respecter des contraintes de conservation : conservation de l'énergie, de la charge électrique, du moment cinétique, etc. Aucune relation contredisant une quelconque de ces contraintes de conservation n'est possible : c'est là une forme d'homogénéité.

On peut aussi énoncer le principe d'homogénéité sous la forme suivante : "*Une formule logique ne doit contenir que des éléments appartenant à un même ordre*". Le mot ordre (utilisé par Pascal) remplace ici le mot genre pour délimiter le domaine de validité logique d'une proposition. Pascal écrit dans les Pensées (308) :

*"De tous les corps ensemble on ne saurait en faire réussir une petite pensée. Cela est impossible et d'un autre ordre.*

*De tous les corps et esprits on n'en saurait tirer un mouvement de vraie charité, cela est impossible, et d'un autre ordre surnaturel."*

Pascal affirme que des objets de l'ordre des corps (objets physiques) ne peuvent générer la moindre pensée, et que même des corps et des esprits ensemble ne peuvent générer un mouvement de charité.

### 1.3.1 Seul l'esprit humain peut ignorer le principe d'homogénéité

Les affirmations de Pascal sont justifiées par une propriété fondamentale de l'homme : *l'esprit humain peut créer des relations d'un ordre vers un autre sans difficulté, sans la moindre impression d'erreur ; c'est un effet de son aptitude à associer n'importe quel concept à n'importe quel autre car son imagination est libre.*

Beaucoup de philosophes contestent à tort l'origine matérialiste de la pensée en tant qu'effet du fonctionnement du cerveau. Ils raisonnent comme ceci : puisque ce fonctionnement (matériel) est d'un genre différent de la pensée (abstraite), la pensée ne peut provenir seulement de causes matérielles, en raison du principe d'homogénéité.

Ils se trompent : *la pensée est la perception humaine du fonctionnement du cerveau lorsque celui-ci interprète ses connexions de neurones. C'est cette interprétation qui transforme un état matériel de neurones en abstractions ; elle constitue la seule mise en relation entre concepts de genres différents qui ne viole pas le principe d'homogénéité.* En reliant des abstractions, l'esprit humain peut créer n'importe quelle relation, même fantaisiste ou absurde ; il suffit que certains groupes de neurones (des « [cliques](#) ») créent, modifient ou suppriment diverses connexions entre neurones.

Voir [le modèle « logiciel à couches »](#) de la pensée.

### 1.3.2 Déterminisme et principe d'homogénéité

Le déterminisme ne s'applique qu'aux situations matérielles.

- L'évolution d'une situation (d'un état) physique ne peut aboutir qu'à une autre situation (état) physique.
- Comme toutes les situations physiques sont délimitées par notre Univers, aucune situation de notre Univers ne peut avoir une conséquence externe à l'Univers, aucune ne peut être causée par quelque chose d'extérieur à l'Univers.
- Seul l'esprit d'un homme peut imaginer un franchissement des frontières de l'Univers, mais il restera pure spéculation.
- Même si un jour une théorie sur d'autres univers affirme des choses vérifiables dans le nôtre, elle ne prouve pas que ces univers existent, car cette existence ne peut être ni vérifiée ni infirmée expérimentalement.

Remarque : les considérations d'homogénéité précédentes concernent la *nature* des objets mis en relation, mais la notion d'homogénéité concerne aussi la *structure* d'objets. Exemple : si la charpente d'une grange est entièrement métallique on la considère comme homogène, alors que si elle allie métal et bois elle est hétérogène.

### 1.3.3 Domaine de vérité d'une science et principe d'homogénéité

*Un intérêt majeur de la règle du respect de l'homogénéité est la délimitation du domaine de vérité d'une science : on peut avoir la certitude qu'une affirmation est vraie ou qu'elle est fautive à l'intérieur d'un domaine homogène, alors que dans un domaine hétérogène ou homogène mal défini cette certitude est impossible.*

Husserl écrit : "L'empire de la vérité s'articule objectivement en domaines ; c'est d'après ces unités objectives que les recherches doivent s'orienter et se grouper en sciences."

Kant écrit : "On n'étend pas, mais on défigure les sciences quand on fait chevaucher leurs frontières." Cette affirmation provient du caractère axiomatique [1-z10] des sciences exactes, dont chacune a des axiomes et règles de déduction propres qu'on ne doit pas mélanger avec ceux d'une autre science.

La connaissance scientifique n'a commencé à progresser que lorsque l'humanité a réussi à la séparer des considérations philosophiques, morales et religieuses [212].

## 1.4 Le déterminisme scientifique

Pour mieux comprendre et prévoir, la pensée rationnelle a besoin d'ajouter au postulat de causalité ci-dessus une règle de stabilité dans le temps et l'espace, c'est-à-dire de reproductibilité.

### 1.4.1 Règle de stabilité

Règle : Les mêmes causes produisent toujours les mêmes effets (reproductibilité). Les lois physiques dont l'application est déclenchée par une cause donnée sont *stables*, elles sont les mêmes en tous lieux et à tout instant.

Conséquence de la stabilité : une situation stable n'a jamais évolué et n'évoluera jamais ! Pour prendre en compte, alors, une évolution à partir d'un instant  $t$  il faut changer la définition du système observé. En fait, *l'écoulement du temps ne se manifeste que lorsque quelque chose évolue* ; si rien n'évolue tout se passe comme si le temps s'arrêtait. La règle de stabilité n'a rien d'anodin : elle a pour conséquence la première loi du mouvement de Newton, la loi d'inertie :

*"Un corps immobile ou se déplaçant en ligne droite à vitesse constante restera immobile ou gardera le même vecteur vitesse tant qu'une force n'agit pas sur lui."*

Au point de vue déterminisme, un mouvement linéaire uniforme est une situation stable, qui ne changera pas tant qu'une force n'agira pas sur le corps. Et une situation stable est sa propre cause et sa propre conséquence.

Grâce à la règle de stabilité on peut *induire une loi physique de la nature* d'un ensemble d'enchaînements cause-conséquence constatés : si j'ai vu plusieurs fois le même enchaînement, je postule que la même cause produit toujours la même conséquence. On peut alors regrouper le postulat de causalité et la règle de stabilité en un principe qui régit toutes les lois de la nature décrivant une évolution dans le temps, *le postulat de déterminisme scientifique* énoncé ci-dessous.

#### 1.4.1.1 Importance de la vitesse et de l'amplitude d'une évolution

En pratique, la stabilité d'une loi physique d'évolution est soumise à des incertitudes, comme toute variable physique : ses paramètres sont entachés d'erreurs.

- Une loi d'évolution décrit celle-ci à partir d'une situation initiale en appliquant des règles de calcul. Mais un paramètre des données initiales, des règles de calcul et de l'heure de l'instant initial n'est connu avec une précision parfaite que lorsqu'il est une unité internationale, définie arbitrairement, comme la vitesse de la lumière  $c$  ; tous les autres paramètres sont entachés d'erreurs : *la prédiction d'une évolution est donc entachée d'erreurs.*

- Un système est stable lorsque ses variations sont trop petites et/ou trop lentes pour être observées. Un système qui paraît stable en ce moment a peut-être évolué de manière perceptible dans le passé, mais de plus en plus lentement ou avec de moins en moins d'amplitude jusqu'à paraître stable en ce moment ; et peut-être évoluera-t-il de plus en plus vite ou de plus en plus fort à l'avenir.

#### 1.4.2 Définition du déterminisme scientifique

Le déterminisme scientifique est un postulat qui régit l'évolution dans le temps d'une situation sous l'effet des lois de la nature conformément au postulat de causalité et à la règle de stabilité.

Par rapport au déterminisme philosophique, le déterminisme scientifique :

- Prédit qu'une situation évoluera certainement sous l'action d'une loi naturelle, pas qu'on en connaîtra les paramètres futurs ;
- N'affirme pas la possibilité de reconstituer mentalement le passé.

##### 1.4.2.1 Déterminisme des évolutions régies par des équations différentielles

Dans de nombreux phénomènes physiques, l'évolution d'un système est modélisée par une équation différentielle ou un système d'équations différentielles comprenant des dérivations par rapport au temps. Lorsque c'est le cas, *la connaissance des conditions initiales permet de déterminer toute l'évolution ultérieure de ses variables*, soit parce qu'on peut exprimer celles-ci comme fonctions du temps, soit parce qu'on peut calculer les valeurs successives de ces variables de proche en proche. L'évolution du système est alors déterministe au sens scientifique traditionnel et on peut même parler de *déterminisme mathématique*.

Exemples souvent cités : les équations différentielles de la dynamique (2<sup>ème</sup> loi de Newton) et de Schrödinger [\[1-w\]](#).

##### 1.4.2.2 Déterminisme des algorithmes et des programmes d'ordinateur

Un algorithme est écrit dans le cadre d'une axiomatique [\[1-z10\]](#) et un programme est écrit avec un langage informatique. Chacune des règles de déduction de l'axiomatique et chacune des instructions du programme respecte les conditions du postulat de causalité et de la règle de stabilité : l'algorithme et le programme étant donc des suites de processus déterministes sont globalement déterministes.

Pourtant, *leur résultat n'est pas prédictible à la seule vue de leur texte*. En particulier, *on ne peut savoir s'ils produisent les résultats attendus qu'en déroulant l'algorithme par la pensée et en exécutant le programme*. On ne peut pas, non plus, savoir si la progression vers ce résultat est rapide ou non : un programme peut se mettre à boucler, repassant indéfiniment sur la même séquence d'instructions, et un algorithme peut converger très lentement ou même ne pas converger du tout ; si l'exécution d'un programme doit durer 100 ans aucun homme ne l'attendra.

Il existe donc des processus déterministes :

- dont le résultat est imprévisible avant leur déroulement ;
- dont le déroulement peut durer si longtemps qu'on ne peut se permettre de l'attendre pour avoir le résultat.

Nous voyons donc, sur cet exemple, que *le déterminisme d'un processus n'entraîne pas nécessairement la prédictibilité de son résultat*. Approfondissons ce problème.

### 1.4.3 Déterminisme scientifique et obstacles à la prédiction

#### Résultat d'une évolution physique

Le résultat d'une évolution physique est un *état* caractérisé par les valeurs d'un certain nombre de variables. Chacune de ces variables a un ensemble de définition. Exemples d'ensembles de définition :

- Une longueur est un nombre réel positif ;
- Une énergie électromagnétique échangée à l'aide de photons de fréquence  $\nu$  est un multiple entier de  $h\nu$ , où  $h$  est la constante de Planck [\[1-i\]](#) ;
- En mécanique quantique, une mesure ne peut donner comme résultat qu'une valeur propre de l'observable du dispositif de mesure.

Prédire un résultat d'évolution d'une variable consiste à prédire quel élément de son ensemble de définition résultera de l'application de la loi d'évolution, c'est-à-dire quel élément de cet ensemble elle choisira.

#### Déterminisme et prédictibilité

*Le déterminisme d'une loi de la nature n'entraîne ni la prédictibilité de ses résultats, ni leur précision. Voici pourquoi.*

Dans les définitions du postulat de causalité et du déterminisme scientifique nous avons renoncé à prédire un résultat d'évolution. Mais comme nous savons que toute situation non stable est une cause qui déclenche l'application d'une loi de la nature, le problème de prédire un résultat d'évolution devient celui de prédire le résultat de l'application d'une telle loi.

#### Les conséquences du postulat matérialiste [\[1-e\]](#) sur la prédictibilité

Selon le matérialisme, la nature n'a pas de conscience comme un homme. Ses lois ignorent la notion de valeur et n'ont aucune finalité. On peut aussi éliminer l'intervention dans notre Univers du surnaturel : son résultat serait par essence imprévisible et toute loi d'évolution basée sur lui serait infalsifiable ; son existence même est considérée comme impossible. Si nous admettions la possibilité qu'une intervention surnaturelle déclenche, empêche ou modifie le déroulement d'une évolution naturelle, nous renoncerions en même temps à prévoir rationnellement son résultat. Nous excluons aussi toute intervention provenant de l'intérieur de l'Univers mais n'obéissant à aucune loi de la nature, en nous réservant de préciser [plus bas](#) la notion de hasard et sa portée.

Voici quatre types de raisons qui empêchent de prédire le résultat d'une loi déterministe d'évolution : l'ignorance, l'imprécision, la complexité et le hasard.

#### 1.4.3.1 L'ignorance

Pour prédire le résultat d'une loi il faut d'abord la connaître. Il y a beaucoup de phénomènes que la science ne sait ni expliquer, ni même décrire. Et malgré Internet

qui, de nos jours, permet de trouver beaucoup de renseignements et de poser des questions à beaucoup de gens, une personne donnée a nécessairement des lacunes. De toute manière, la méconnaissance d'un phénomène ne nous autorise pas à l'attribuer au hasard, c'est-à-dire à affirmer que la nature fait n'importe quoi. Nous supposons donc ci-dessous que toute tentative de prédiction est faite dans un contexte où les lois d'évolution sont connues.

#### 1.4.3.2 L'imprécision

Le postulat de causalité et le déterminisme scientifique ne promettant pas la prédictibilité d'un résultat, ils ne promettent pas à fortiori sa précision lorsqu'on a pu le prévoir ; pourtant la précision est une préoccupation humaine. Voici des cas où la précision du résultat (calculé ou mesuré) de l'application d'une loi d'évolution peut être jugée insuffisante par l'homme.

##### Imprécision des paramètres d'une loi d'évolution

Une loi d'évolution a une formulation mathématique et des paramètres. Si ceux-ci sont connus avec une précision insuffisante, le résultat calculé sera lui-même entaché d'imprécision. C'est le cas, notamment, lorsqu'une loi d'évolution fait des hypothèses simplificatrices (exemple : [\[2\]](#)).

##### Imprécision ou non-convergence des calculs

Si le calcul d'une formule ou d'une solution d'équation est insuffisamment précis, le résultat peut être lui-même imprécis. Il arrive aussi que l'algorithme du modèle mathématique du phénomène ne puisse fournir son résultat, par exemple parce qu'il converge trop lentement. Il peut enfin arriver que le modèle mathématique d'un processus déterministe ait un cas où le calcul de certaines évolutions est impossible, le livre en cite un concernant une propagation d'onde [\[1-a\]](#).

##### Sensibilité du modèle d'évolution aux conditions initiales

Il peut arriver qu'une variation minime, physiquement non maîtrisable, de ses données initiales, produise une variation considérable et imprévisible du résultat d'un phénomène dont la loi d'évolution a pourtant une forme précise et une évolution calculable. C'est le cas, par exemple, pour la direction dans laquelle va chuter un crayon posé verticalement sur sa pointe et qu'on vient de lâcher. C'est le cas, aussi, des « systèmes dissipatifs à évolution aperiodique sur un attracteur étrange dans un espace des phases (définition : [\[1-c\]](#)) ayant au moins 3 dimensions » (explication : [\[1-b\]](#))

Il y a là un phénomène mathématique *d'amplification d'effet* : l'évolution parfaitement déterministe, précise et calculable à partir d'un ensemble d'états initiaux extrêmement proches, peut aboutir, après un certain temps, à des états finaux très différents. Ce type d'évolution est appelé « [chaos déterministe](#) ». On peut, dans ce cas-là, démontrer l'impossibilité de prévoir avec une précision suffisante l'évolution et son état final après un temps donné : *il ne peut exister d'algorithme de calcul prévisionnel de cet état final qui soit stable par rapport aux données initiales*. Il ne peut même pas exister d'intervalle statistique de confiance encadrant une variable de l'état final. Le déterminisme n'est pas en cause en tant que principe, mais une prédiction précise d'état final demande une précision infinie dans la connaissance et la reproductibilité de l'état initial et des paramètres d'évolution, précision physiquement inaccessible.

Cette impossibilité traduit un refus de la nature de satisfaire notre désir de prévoir avec précision l'évolution de certains systèmes.

Exemples. Ce phénomène se produit dans certains écoulements turbulents et dans l'évolution génétique des espèces, avec apparition de solutions regroupées autour de points particuliers de l'espace des phases [1-c] appelés attracteurs étranges [1-d]. En pratique, cette amplification d'effet réduit beaucoup l'horizon de prévisibilité.

Toutefois, si on connaît en plus des conditions initiales le début de l'évolution, pendant un court instant, l'imprécision sur la suite de l'évolution est souvent moindre.

#### Instabilité dans le temps d'une loi d'évolution

Même s'ils sont bien connus à un instant donné, certains paramètres d'une loi d'évolution peuvent être instables dans le temps, entraînant l'impossibilité de prédire une évolution trop longtemps à l'avance. C'est le cas, par exemple, pour une loi d'évolution qui bifurque (se transforme en deux autres lois) du fait d'un paramètre qui franchit ou non une valeur critique [1-z16] à cause d'un autre phénomène.

#### Imprécision due à la mécanique quantique

En physique quantique, la précision sur l'état d'un système est limitée par la représentation par fonctions d'ondes de la mécanique quantique [1-z18]. Exemples :

- La position et la vitesse d'un corpuscule en mouvement dans un champ de force électromagnétique ne peuvent être déterminées avec une incertitude meilleure que la moitié de la largeur du paquet d'ondes de matière [1-z14] qui l'accompagne. Quelle que soit la petitesse du temps de pose d'une photographie instantanée (théorique) du corpuscule, celui-ci apparaîtra toujours flou.  
Pire, même : plus la détermination de la position est précise, plus celle de la vitesse est imprécise, et réciproquement : c'est le « principe d'incertitude de Heisenberg » [1-l].
- Un résultat de mécanique quantique est inséparable des conditions expérimentales. La mécanique quantique prédit *la fréquence statistique d'apparition* de chaque valeur qu'on peut mesurer dans une expérience donnée, dont la reproductibilité des résultats n'est que statistique.
- En mécanique quantique, non seulement toute mesure perturbe le système mesuré, mais en l'absence de mesure ou avant la mesure la variable mesurée n'a aucune probabilité d'avoir quelque valeur que ce soit : c'est la mesure qui « crée » la valeur d'une variable, et en son absence cette valeur n'existe pas.  
Il y a là une énorme différence avec la physique macroscopique, où la position d'un corps existe qu'on la mesure ou non, et où une mesure ne perturbe pas nécessairement l'objet mesuré.
- L'évolution qu'est l'établissement ou la rupture d'une liaison chimique entre atomes, molécules, ou atome et molécule est régie par l'équation de Schrödinger [1-w] et le principe d'exclusion de Pauli [1-z6]. Cette évolution se fait vers la structure la plus stable, celle de moindre énergie potentielle, comme le veut la thermodynamique. La mécanique quantique montre qu'il y a souvent plusieurs

résultats d'évolution possibles, chacun avec sa probabilité, entre lesquels la nature choisit au hasard.

Cette possibilité qu'une liaison chimique s'établisse ou se rompe avec une certaine probabilité a des conséquences importantes en biologie moléculaire, où elle peut être cause d'anomalies génétiques ou de variations d'expressions de gènes.

On a montré expérimentalement dans les années 1920 qu'en favorisant les perturbations accidentelles de l'énergie de liaison moléculaire du génome de l'orge au moyen de rayons X on provoquait de multiples mutations artificielles. On a ainsi obtenu des plantes de couleur blanche, jaune pâle ou à bandes de couleurs alternées. Depuis cette date, des mutations artificielles sont déclenchées dans de nombreux pays, pour obtenir des espèces nouvelles de plantes ayant des propriétés intéressantes. On a ainsi obtenu des espèces plus résistantes et d'autres donnant de meilleurs rendements.

- Le refus de précision de la nature peut se manifester par des *fluctuations quantiques*. Exemple : en un point de l'espace vide entre atomes ou même entre galaxies, *l'énergie peut brusquement varier sans cause autre que le fait que la nature refuse qu'elle soit définie avec une valeur stable*. Cette variation d'énergie  $\Delta E$  peut être d'autant plus grande que sa durée  $\Delta t$  sera brève. En moyenne, toutefois, l'énergie au point de fluctuation reste constante : si la nature a "emprunté" une énergie  $\Delta E$  au vide environnant, elle la restitue en totalité  $\Delta t$  secondes après.
- Ce phénomène d'instabilité, *qui impose une extension du postulat de causalité*, n'a rien de négligeable : on lui attribue, peu après le Big Bang [1-z20] du début de l'Univers, la formation de variations de densité d'énergie à l'origine de la matière des galaxies ! Du point de vue prédictibilité, on ne peut prévoir ni *où* une fluctuation se produira, ni *quand*, ni *avec quelle variation d'énergie  $\Delta E$* .

#### Imprécision par évolutions multiples simultanées à partir d'un même état initial

A l'échelle atomique, la nature permet des superpositions de solutions d'équation.

- C'est ainsi qu'*un atome peut parcourir plusieurs trajectoires à la fois*, produisant des franges d'interférence avec lui-même lorsqu'il passe à travers deux fentes parallèles distantes de milliers de diamètres atomiques.
- C'est ainsi qu'*une molécule peut être dans plusieurs états à la fois*. Exemple : La mécanique quantique prévoit qu'une molécule d'ammoniac  $\text{NH}_3$ , en forme de tétraèdre, peut avoir son sommet, l'atome d'azote, d'un côté ou de l'autre du plan de ses 3 atomes d'hydrogène ; et elle peut faire passer ce triangle d'atomes (léger) d'un côté à l'autre du sommet azote (lourd) spontanément, par *effet tunnel* (effet statistique de présence sans cause physique de type force), ou par absorption de l'énergie d'un photon. Le triangle peut osciller entre les deux positions symétriques avec une fréquence dans le domaine des ondes centimétriques. Cette prédiction de la mécanique quantique est confirmée par l'observation de cette fréquence en radioastronomie, en absorption comme en émission d'ondes, par des molécules d'ammoniac de l'espace interstellaire.

Lorsqu'une expérience détermine l'état de la molécule  $\text{NH}_3$ , la nature choisit *au hasard* celui des deux états symétriques qu'elle révélera à l'homme. Notons que dans ce cas l'état révélé n'est pas quelconque, c'est un élément d'un ensemble

parfaitement prédéfini de solutions appelé *spectre des valeurs propres* du dispositif de mesure : *le hasard naturel est alors limité au choix d'une des valeurs du spectre, valeurs toutes connues avec précision*. Dans le cas de la molécule d'ammoniac précédente, la nature choisit entre 2 solutions, chacune caractérisée par une certaine énergie et une forme géométrique.

Ce phénomène est général en mécanique quantique : lorsqu'une expérience mesure une grandeur qui a plusieurs valeurs superposées, *il en choisit une au hasard sans que l'expérimentateur puisse prédire laquelle*. Toutefois, les valeurs possibles parmi lesquelles l'expérience choisit appartiennent à un ensemble connu à l'avance : l'ensemble des valeurs propres de l'appareil de mesure ; en répétant l'expérience un grand nombre de fois, les diverses valeurs propres "sortiront" avec une probabilité (ou une densité de probabilité) connue à l'avance. (Voir postulats 3 et 4 de la mécanique quantique [1-f].) Du point de vue déterminisme, *le hasard se limite au choix d'une valeur appartenant à un ensemble prédéterminé et affectée d'une probabilité (ou une densité de probabilité) également prédéterminée*.

- Le refus de la nature de satisfaire le besoin de l'homme de distinguer deux photons à trajectoires différentes atteint un sommet avec le phénomène de *non-séparabilité*. Dans une expérience [1-g], deux photons qui ont la propriété d'ensemble d'avoir des polarisations en sens opposé (photons dits *intriqués* ou *corrélés*) restent un ensemble indivisible du fait de cette propriété même quand ils se sont éloignés l'un de l'autre de 144 km : on constate que les propriétés de l'un et de l'autre restent corrélées comme dans l'ensemble de départ, qui conserve son unité tout en se déformant même si on agit sur l'un des photons.

En somme, *toute mesure faite au point A sur une particule peut instantanément influencer une mesure en un point B, même très distant, sur une autre particule si les deux particules ont interagi avant* ; et après la mesure, l'interaction qui a corrélié les particules a disparu de manière irréversible.

#### Imprécision par étalement d'un paquet d'ondes

Les ondes de matière accompagnant le déplacement d'un corpuscule se rattrapent et se chevauchent, et le paquet d'ondes [1-z14] s'étale tout en se déplaçant. Cet étalement fait croître progressivement l'indétermination sur la position du corpuscule.

En somme, en physique quantique, beaucoup d'exigences humaines concernant la prédiction d'un résultat, son unicité, sa précision ou sa stabilité sont refusées par la nature.

#### Incertitude relativiste sur la relation de causalité entre deux événements

Il y a une propriété de l'espace-temps liée à la vitesse de la lumière, propriété qui fait réfléchir à la définition même de la causalité qui fait passer d'un événement à un autre. Dans certains cas précis, deux événements A et B peuvent être vus par certains observateurs dans l'ordre A puis B, et par d'autres observateurs dans l'ordre B puis A ! Les premiers auront connaissance de A avant B et en tireront des prédictions différentes des seconds, qui verront apparaître B avant A [1-z15].

#### 1.4.3.3 La complexité

L'effet global d'un grand nombre de phénomènes parfaitement déterministes peut être imprévisible, même si chacun est simple et à résultat prévisible.

Exemple : considérons une petite enceinte fermée qui contient un nombre immense de molécules identiques de liquide ou de gaz. Le seul fait que ces molécules aient une température supérieure au zéro absolu fait qu'elles s'agitent sans cesse, l'énergie cinétique associée à leur vitesse provenant de la température. Cette agitation, appelée *mouvement brownien* [1-h], les fait rebondir les unes sur les autres et sur les parois, les lois des chocs élastiques correspondantes étant parfaitement connues et déterministes, sans intervention du hasard. Mais il est impossible de connaître la position et la vitesse à l'instant  $t$  d'une molécule donnée, car :

- Elle a subi trop de rebonds contre d'autres molécules en mouvement et contre les parois de l'enceinte pour que les calculs soient à la portée d'un ordinateur, même très puissant ;
- A l'échelle atomique, chaque rebond de molécule est affecté par sa forme irrégulière, la rugosité locale de la paroi, et l'imprécision sur la position d'un choc due à la largeur du paquet d'ondes [1-z14] accompagnant chaque molécule. La loi des chocs élastiques est donc difficile à appliquer, les conditions initiales de chaque choc étant entachées d'erreurs non négligeables et aucune approche statistique n'étant possible.

Cette impossibilité de connaître le mouvement précis d'une molécule donnée est très générale : la combinaison d'un grand nombre de phénomènes déterministes à évolution individuelle prévisible produit une évolution imprévisible, que ces phénomènes soient ou non du même type. Par *combinaison* il faut entendre ici :

- soit *une succession de phénomènes de même type* comme les chocs élastiques d'une molécule donnée ;
- soit *la simultanéité de phénomènes déterministes différents* qui agissent indépendamment ou interagissent pour produire un effet global ;
- soit *l'instabilité d'un phénomène* qui change de loi d'évolution selon un paramètre critique soumis à *un autre* phénomène d'évolution lors d'une bifurcation [1-z16].

En résumé, *la complexité d'un phénomène à composantes déterministes produit en général une évolution imprévisible*, et encore plus imprévisible si on prend en compte les imprécisions dues à la mécanique quantique.

*Il faut pourtant se garder d'attribuer au hasard une évolution qui n'est imprévisible que parce que la complexité du phénomène d'origine rend impossible la prédiction de son résultat.* Nous verrons [ci-dessous](#) que le hasard caractérise un choix d'élément, alors que l'imprévisibilité caractérise une inexistence d'algorithme à résultats utilisables.

L'imprévisibilité par excès de complexité, qui n'existe pas en théorie parce que les lois d'évolution sont déterministes, sévit hélas en pratique. Elle n'affecte pas la nature, qui jamais n'hésite ou ne prévoit l'avenir, mais elle empêche l'homme de prédire ce qu'elle va faire. Et l'imprévisibilité est d'autant plus grande que le nombre de phénomènes successifs ou simultanés est grand, que leur diversité est grande, que leurs interactions sont nombreuses et que l'imprécision quantique intervient.

Les interactions entre phénomènes ont un effet sur leur déterminisme lui-même. Une évolution dont le résultat impacte les conditions initiales d'une autre évolution joue

sur la reproductibilité de cette évolution, ce qui handicape encore plus la prédiction de son résultat.

*C'est pourquoi les phénomènes les plus complexes (ceux des êtres vivants, du psychisme de l'homme et de sa société) ont beau ne comporter (au niveau biologie moléculaire) que des évolutions physiques déterministes, leurs résultats sont en général si imprévisibles que l'homme a l'impression que la nature fait n'importe quoi.*

### La limite des modèles statistiques

L'économiste Prix Nobel Von Hayek distinguait deux types de domaines complexes.

- Dans les domaines « à complexité non organisée », les difficultés de compréhension et de modélisation du comportement dues à la complexité peuvent être contournées grâce à des variables statistiques. C'est le cas, par exemple, en mécanique statistique, où le comportement d'un volume de gaz comportant un nombre immense de molécules animées de mouvements browniens peut être modélisé statistiquement à l'aide de moyennes de variables comme la température absolue, la pression et l'énergie d'une molécule. Les lois d'évolution de ces variables statistiques sont déterministes. Exemple : la loi des gaz parfaits  $pv=nRT$ .
- Dans les domaines « à complexité organisée », les divers éléments d'un système ont, en plus de propriétés individuelles et de fréquences d'apparition, des interactions complexes et de types différents qu'on ne peut déterminer quantitativement ou modéliser statistiquement. C'est le cas, par exemple, des marchés d'une économie, où interviennent de nombreux acteurs interdépendants et où les hypothèses économiques traditionnelles de rationalité et de concurrence pure et parfaite sont loin d'être satisfaites. Dans ce cas, on ne pourra jamais connaître exhaustivement toutes les variables décrivant les divers agents économiques et leurs interactions, et on ne pourra donc pas – même avec un ordinateur puissant – modéliser le marché et prévoir son évolution avec précision [7].

C'est pourquoi l'économie communiste de l'ex-URSS n'a jamais pu avoir une planification centralisée de la production et de la consommation qui fonctionne. L'organisme administratif de planification n'a jamais pu connaître les détails précis de ce qu'il était vraiment possible de produire et de transporter, ce qui était effectivement produit, où et à quelle date, etc. Ce qu'il a pu savoir était toujours fragmentaire et très en retard sur la réalité. Il ne pouvait tenir compte d'aléas climatiques locaux impactant l'agriculture ou les transports. Bref, il n'a jamais pu disposer d'informations suffisantes pour piloter la production, le transport et la consommation, d'où des pénuries et des gaspillages énormes.

En fait, la totalité des informations nécessaires pour déterminer l'évolution d'un marché à partir d'une situation donnée n'est disponible que pour le marché lui-même, pas pour un être humain ou une organisation humaine. Et comme le comportement humain est souvent imprévisible parce que soumis à des émotions irrationnelles et des anticipations, *l'évolution d'un marché à partir d'une situation donnée est non déterministe*. Hayek a montré qu'on ne pouvait alors établir que des lois *qualitatives* décrivant des relations entre variables économiques et permettant de prévoir des *tendances* d'évolution ; en aucun cas on ne pouvait prévoir le comportement d'un

agent économique donné ou la survenance d'un événement particulier comme la date d'éclatement d'une bulle spéculative ou un effondrement boursier [7].

#### 1.4.3.4 Le hasard dans l'évolution selon une loi de la nature

Par manque de rigueur, beaucoup de gens opposent évolution déterministe (considérée comme prédictible) et évolution au hasard (considérée comme imprédictible). En précisant la notion de déterminisme scientifique [nous avons déjà vu](#) que le résultat d'une évolution déterministe n'était pas toujours prédictible. Nous allons à présent préciser la notion de hasard.

Je ne veux pas attribuer au hasard une évolution naturelle que je ne peux décrire ou prédire, ou que personne ne sait décrire ou prédire : ce serait attribuer à la nature un hasard résultant de l'ignorance humaine. Je ne veux attribuer une évolution naturelle au hasard que si c'est là une caractéristique objective (indépendante de l'homme) et dont l'imprédictibilité est soit démontrée, soit explicitement postulée.

Remarque : hasard ou pas, la nature ne peut pas violer ses propres lois, par exemple de conservation de l'énergie, de la charge électrique, de la quantité d'information (probabilité totale) en mécanique quantique, etc.

Nous allons maintenant étudier en détail le hasard.

## 1.5 Le hasard

### 1.5.1 Définitions du hasard

J'observe que nous considérons comme aléatoires des suites ou des distributions de nombres qui diffèrent selon les circonstances.

- Nous attendons d'un dé, d'une roulette de casino et d'une machine à boules de tirage de loto qu'ils produisent des nombres équiprobables.
- Nous pensons que la distribution des résultats d'une même expérience entachés d'erreurs expérimentales répartit ces résultats selon la loi de Gauss, appelée d'ailleurs aussi loi *normale*.
- Dans d'autres cas, nous nous attendons à des distributions selon d'autres lois statistiques, comme la loi de Poisson ou la loi binomiale...

A moins de se contenter d'une prédictibilité statistique, un résultat d'évolution au hasard est imprédictible.

Compte tenu de la variété de cas où nous pensons qu'une valeur est due au hasard, il me semble qu'un consensus existe pour considérer comme aléatoire une variable dont *les valeurs isolées sont imprévisibles et les suites de valeurs sont dépourvues de régularité*. Si c'est bien le cas, *il n'existe pas de raisonnement capable de prédire une valeur au hasard* (par exemple la valeur propre d'une observable choisie par la nature dans une expérience de [décohérence](#) en physique quantique) ; *il n'existe pas, non plus, d'algorithme capable de générer une suite de nombres dont le caractère aléatoire soit certain* : un tel caractère devra toujours être postulé. De toute manière,

la conformité du modèle statistique associé arbitrairement à une distribution de valeurs devra être estimée (par calcul) en probabilité.

#### 1.5.1.1 Définition par conformité à une loi de distribution statistique

On peut qualifier une variable d'aléatoire si la fréquence d'apparition de chacune de ses valeurs suit une loi statistique, dont on peut calculer le(s) paramètre(s) et leur intervalle de confiance à X %. On parlera, par exemple, de distribution de probabilités conforme à la loi de Poisson, parce qu'on aura testé la conformité de ce modèle avec les couples (valeur, fréquence d'apparition) disponibles. Mais même si cette conformité est vérifiée avec une forte probabilité, elle ne sera pas certaine.

#### 1.5.1.2 Définition de René Thom

Le mathématicien René Thom a défini le hasard dans [4] comme suit :

*"Est aléatoire un processus qui ne peut être simulé par aucun mécanisme, ni décrit par aucun formalisme".*

René Thom définit donc comme aléatoire tout processus inaccessible aux automatismes et aux déductions rationnelles.

- Si, dans cette définition, René Thom avait en tête des mécanismes naturels (et non d'origine humaine), selon lui *un processus naturel ne peut être aléatoire* car c'est un ensemble de mécanismes de la nature qui se simulent évidemment eux-mêmes. Dans ce cas, *René Thom postule l'absence de hasard dans tous les processus naturels*. Il exclut donc la physique quantique du champ des processus naturels, puisque le 4<sup>ème</sup> postulat de la mécanique quantique (accepté par tous les scientifiques) définit les probabilités d'apparition des diverses valeurs propres d'une observable.

Cette exclusion de René Thom contredit le principe de correspondance [1-m] qui unifie les résultats des lois de la physique macroscopique et celles de la physique quantique. Le postulat d'absence de hasard dans la nature de René Thom ne me paraît donc pas justifié dans le cas de la physique quantique ; par contre, je crois comme lui à l'absence de hasard dans tout le reste de la physique, en dehors des erreurs expérimentales, bien entendu ; j'explique pourquoi dans ce texte.

- Si, dans cette définition, René Thom pensait à des mécanismes fabriqués par l'homme ou des logiciels générateurs de « nombres aléatoires », alors il ne tenait pas compte du fait que des dispositifs comme un dé, une roulette de casino et une machine à boules de loto sont considérés comme de bons simulateurs de hasard ; il ne tenait pas compte de la qualité *pratique* reconnue aux générateurs de nombres aléatoires.

En outre, l'absence de régularité de la suite des décimales d'un nombre irrationnel – que l'on sait générer par algorithme – fait de nombres extraits d'une telle suite un exemple de suite aléatoire.

*En postulant plus bas le déterminisme étendu, je restreins les processus aléatoires de la nature à des opérations de choix d'un des éléments d'un ensemble prédéterminé. Or le choix au hasard d'un élément dans un ensemble fini où ils sont équiprobables peut être simulé de manière satisfaisante, par exemple, avec une*

machine à boules de loterie ; et en jouant sur le nombre de boules de chaque numéro de la machine on pourrait même simuler n'importe quelle distribution statistique donnée. Mais on ne peut décrire un tel choix par un algorithme, processus donnant des résultats prédictibles même lorsque c'est un générateur de nombres aléatoires (l'ordre des nombres générés est toujours le même pour un logiciel donné). La définition à deux critères du caractère aléatoire d'un processus de René Thom est donc à prendre dans son esprit, pas à la lettre.

#### 1.5.1.3 Définition par rencontre de chaînes de causalité indépendantes - Hasard par ignorance

Deux chaînes de causalité déterministes issues d'origines indépendantes peuvent se rencontrer, créant alors une situation nouvelle qui n'était prévisible dans le déroulement d'aucune des deux chaînes prise isolément.

Exemple : un jour de tempête, une tuile tombe d'un toit au moment précis où un homme passait par là, et elle le blesse. Si on considère la chaîne de causalité tempête-tuile indépendante de celle de l'homme, leur rencontre est imprévisible.

Une personne qui n'avait pas prévu cette rencontre peut l'attribuer de manière erronée au hasard. Mais une définition plus large du système, prenant en compte l'ensemble des deux phénomènes, élimine le hasard : toutes les conditions étaient réunies pour que la tuile blesse l'homme. L'étonnement d'un homme ou la rareté d'un phénomène ne justifient pas qu'on attribue au hasard le résultat global de processus qui respectent tous les lois déterministes de la nature (la seule loi naturelle où il se produit une évolution au hasard est la décohérence, phénomène de mécanique quantique).

Cet exemple montre qu'une prévision basée sur le déterminisme doit prendre en compte *tous* les paramètres susceptibles d'intervenir dans l'évolution à prévoir. Refuser de prendre en compte la situation d'ensemble, c'est se complaire dans l'ignorance et accepter le risque de prédictions fausses.

J'ai vu beaucoup de cas où des gens attribuaient au hasard un phénomène qu'ils ne comprenaient pas ou n'avaient pas prévu, pour pouvoir d'abord expliquer pourquoi ils n'avaient pu le comprendre, et trouver ensuite une raison de ne pas chercher une explication ; ce cas fréquent d'attribution au hasard est un « hasard par ignorance ».

##### 1.5.1.3.1 Impossibilité d'existence de chaînes de causalité indépendantes

Si nous admettons, comme tous les astrophysiciens, que l'Univers est né et a commencé son expansion à partir d'une région infiniment petite, en un instant initial appelé Big Bang [1-z20], il n'y avait en cet instant-là qu'une situation unique (les atomes n'étaient pas encore formés), cause première [1-z22] de toute l'histoire ultérieure de l'Univers. Toutes les évolutions physiques ont commencé à ce moment-là. L'Univers a donc une unité d'existence et d'évolution depuis cet instant-là, et si notre pensée y distingue, à un autre moment, des sous-situations séparées, celles-ci sont pures abstractions humaines, conséquences déterministes d'une même cause première, le Big Bang.

Des chaînes de causalité particulières, issues de sous-situations particulières par évolutions déterministes, ne peuvent être indépendantes puisqu'elles ont même

origine. C'est notre esprit qui les considère parfois comme indépendantes, pour permettre ou simplifier certains raisonnements.

Voir aussi le paragraphe "[Restriction du postulat de causalité](#)".

#### 1.5.1.3.2 Rencontre imprévisible de chaînes de causalité distinctes

En considérant arbitrairement comme distinctes deux situations  $S_1$  et  $S_2$  à des instants qui précèdent l'instant actuel  $t$ , l'évolution de chacune de ces situations peut être une chaîne de situations reliées par des évolutions. Mais il faut tenir compte de la possibilité de multiples évolutions à partir d'une situation donnée, parce qu'une décohérence peut se produire avec un résultat (élément de l'ensemble déterministe des valeurs propres du dispositif qui évolue) aléatoire : en toute rigueur, l'évolution à partir d'une situation donnée n'est pas une chaîne, mais une arborescence dont la branche parcourue lors d'une décohérence est choisie au hasard par la nature. Si nous pouvons prédire qu'il y aura une décohérence et l'ensemble de ses résultats possibles, nous ne pouvons prédire celui que nous observerons.

Il peut aussi se produire qu'une évolution ait un point de départ si sensible aux conditions de l'instant initial  $t_0$  que, malgré son déterminisme parfait, son résultat à l'instant ultérieur  $t$  qui nous intéresse soit imprévisible. Ce résultat peut aussi être trop imprécis à l'instant  $t$ , même si nous essayons de le calculer connaissant la manière dont l'évolution a débuté pendant sa première fraction de seconde. Nous verrons cela en parlant de [chaos déterministe](#). Le résultat d'une évolution chaotique est imprévisible comme celui d'une décohérence, mais pour des raisons différentes : hasard dans le cas de la décohérence, calcul et mesures imprécis dans le cas de la sensibilité aux conditions initiales.

L'existence de ces deux cas d'évolution imprévisible entraîne l'impossibilité de prévoir le résultat de la rencontre de deux arborescences de causalité qui contiennent au moins une évolution imprévisible. Mais il faut savoir qu'à l'échelle macroscopique on n'observe pas de décohérence parce qu'on n'observe pas de superposition quantique, et que toutes les évolutions ne sont pas chaotiques. A l'échelle humaine, donc, les seules rencontres imprévisibles de chaînes de causalité sont celles où l'une au moins a subi une évolution chaotique. Et comme ce type d'évolution ne doit rien au hasard (son imprédictibilité est due à une impossibilité de mesurer et calculer avec une précision infinie), on peut dire qu'**à l'échelle macroscopique il n'y a pas de rencontre de chaînes de causalité qui soit entachée de hasard, même quand son résultat est imprévisible.**

#### 1.5.1.4 Définition par la quantité d'information

On peut aussi définir comme aléatoire *un nombre dont l'écriture est plus concise (en nombre de signes, par exemple) que le texte de tout algorithme capable de le générer* ; un tel nombre a donc une écriture incompressible. Et en admettant qu'il est absurde d'écrire en un langage informatique un algorithme plus long que le nombre que son exécution générerait, il n'existe pas d'algorithme intéressant capable de générer un nombre aléatoire, ce qui justifie la définition de René Thom.

Le problème de cette définition est d'ordre pratique : étant donné un nombre et un algorithme qui le génère, comment être certain que cet algorithme est le plus concis ? C'est impossible !

A part le cas où il est défini par conformité à un modèle statistique, le hasard qui régit une évolution ne peut être défini que de manière négative : le caractère inexplicable qu'il implique ne peut être défini que par une impossibilité de déduction ou de caractérisation algorithmique.

### 1.5.2 Des nombres, suites et ensembles sont-ils aléatoires ?

On ne peut le savoir :

- Il n'existe pas d'algorithme capable, étant donné un nombre, de déterminer si on peut ou non le générer par un programme plus concis que lui.
- Il n'existe pas, non plus, d'algorithme capable de déterminer si *une suite* donnée de nombres est aléatoire. On peut en étudier le [spectre de Fourier](#) et le coefficient d'auto-corrélation [\[1-v\]](#), mais cela ne donnera qu'une idée d'éventuelles périodicités, pas une preuve rigoureuse d'origine aléatoire ou non.
- Enfin, étant donné un ensemble de n-uples de nombres, on peut étudier leur éventuelle conformité à un modèle statistique, mais sans jamais avoir de certitude : un tel modèle est toujours probable (avec une probabilité calculée pour chacun de ses paramètres), jamais certain.

#### Nombres normaux de Borel

Pour préciser la notion de suite *aléatoire* de chiffres d'un nombre, c'est-à-dire l'absence de régularité, le mathématicien Emile Borel a défini la notion de *nombre normal* comme suit dans [\[8\]](#). Un nombre est dit *normal dans une base b* si :

- Chacun des  $b$  chiffres possibles apparaît, dans le développement du nombre selon cette base, avec la même fréquence  $1/b$  ;
- Chacun des  $b^2$  groupes de 2 chiffres successifs possibles apparaît, dans le développement du nombre selon cette base, avec la même fréquence  $1/b^2$  ;
- Chacun des  $b^3$  groupes de 3 chiffres successifs possibles apparaît, dans le développement du nombre selon cette base, avec la même fréquence  $1/b^3$  ;
- Etc.

Un nombre est dit *absolument normal* s'il est normal dans toute base  $b$ .

Emile Borel a démontré en 1909 que *presque tous* les nombres réels sont absolument normaux (« presque tous » a un sens précis en mathématiques : dans n'importe quel intervalle donné, la probabilité de trouver un réel non absolument normal est infiniment faible, alors que la probabilité de trouver un réel absolument normal est aussi proche de 1 que l'on voudra ; cela vient de ce que l'ensemble des nombres non absolument normaux de l'intervalle est de mesure nulle). Mais bien que les constatations sur de longues suites de décimales montrent que "racine de 2",  $\pi$  et  $e$  sont normaux en base 10, *nous ne connaissons pas de démonstration de cette propriété.*

### 1.5.3 Hasard postulé et hasard prouvé

Le déroulement ou le résultat d'une évolution régie par une loi physique de la nature ne peut être entaché que de deux sortes de hasard, le hasard *postulé* et le hasard

*prouvé*. Pour préciser les conditions d'application du hasard, nous allons utiliser cette dichotomie.

### Le hasard postulé

Le hasard postulé intervient lorsqu'il existe un consensus de la communauté scientifique postulant le caractère imprévisible du choix de l'élément, et où il n'existe pas de contre-exemple prouvant que ce choix peut être prédit.

C'est ainsi que tous les physiciens postulent un choix au hasard d'une valeur propre d'opérateur dans chaque évolution par décohérence : ils admettent alors les postulats 3 et 4 de la mécanique quantique [1-f]. *A ma connaissance, il n'y a pas en physique d'autre cas d'évolution où la communauté scientifique postule un choix au hasard de résultat.*

L'évolution par décohérence n'existe, à ma connaissance, que dans des expériences de physique quantique. C'est un cas intéressant où le résultat, une valeur propre, fait partie d'un ensemble dont tous les éléments sont prédictibles au départ de l'expérience, chacun avec une probabilité connue. La prédictibilité du résultat est alors limitée à cet ensemble, la nature refusant de choisir un résultat unique tant que l'évolution n'a pas détruit la cohérence, comme le fait une mesure, nécessairement brutale et irréversible.

Un autre phénomène de physique quantique, l'effet tunnel, produit des comportements analogues à la décohérence en permettant le choix au hasard d'une valeur propre parmi plusieurs valeurs propres possibles, correspondant à des états d'énergie stables entre lesquels un corpuscule peut passer ou même osciller. Dans cet exposé nous rattacherons l'effet tunnel à la décohérence parce qu'il conduit au même type de choix au hasard ; nous l'expliquerons par la suite.

Ne connaissant pas d'autre cas où on a postulé qu'une évolution naturelle produit un résultat au hasard, je dois supposer que c'est le seul au moins provisoirement.

### Le hasard prouvé

Pour une variable donnée affectée par une évolution naturelle donnée, un résultat au hasard est considéré comme prouvé lorsqu'il existe une démonstration de l'impossibilité de trouver un algorithme de prédiction.

Une éventuelle démonstration ayant nécessairement été faite dans le cadre d'une axiomatique [1-z10], elle a une valeur théorique qui doit, si possible, être validée par une expérience. Et là il y a une difficulté : *on ne peut pas prouver qu'une valeur est choisie au hasard, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de raison logique de ce choix.*

Si une répétition d'expériences identiques pour une variable donnée produit des résultats distribués, et que la distribution ne résulte pas d'erreurs expérimentales, le caractère aléatoire doit être postulé ; on peut alors, par exemple, tenter de voir s'il suit une certaine loi stochastique, avec des tests conformes à la théorie des probabilités. Mais on n'aura pas une démonstration axiomatique d'évolution au hasard, il ne s'agira pas de hasard prouvé.

*Il n'y a pas, non plus, de critère pour prouver qu'une suite de valeurs ne présentant pas de régularité évidente est une suite aléatoire.*

*Le déterminisme scientifique est incompatible avec un hasard prouvé. Si un résultat d'évolution n'est pas reproductible et que cette évolution n'est pas une [décohérence](#), il n'y a que deux possibilités : ou [la règle de stabilité des lois de la nature](#) est en défaut, ou il y a une erreur dans la réalisation de l'expérience ou la mesure d'un paramètre.*

Cas particulier intéressant d'« erreur expérimentale » : l'évolution sensible aux conditions initiales [ci-dessus](#), où le calcul de l'évolution est possible mais son résultat est inutilisable. Le hasard qui affecte le résultat n'est pas dû, dans ce cas, à la loi d'évolution, qui reste déterministe au sens traditionnel et à résultat calculable avec une précision arbitraire. Il est dû aux erreurs expérimentales inévitables, amplifiées par le modèle mathématique de la loi d'évolution.

*Conclusion : en postulant le déterminisme scientifique et sa règle de stabilité, une loi d'évolution autre que la [décohérence](#) ne peut avoir de résultat relevant d'un hasard prouvé ; et dans le cas de la [décohérence](#), le caractère stochastique est postulé.*

**A part les phénomènes de physique quantique, où la nature choisit au hasard un résultat dans un ensemble prédéterminé dont chaque élément est associé à une probabilité, la nature n'a pas d'évolution au hasard.**

#### **1.5.4 Différences entre hasard et fluctuations quantiques**

Quand une évolution se termine par un choix au hasard postulé de la valeur d'une variable, celle-ci est *unique* et *stable* : une seule variable est concernée par un ensemble prédictible de valeurs propres ; et une fois choisie, sa valeur ne change plus avant une autre évolution éventuelle.

Lors d'une fluctuation quantique, deux variables sont affectées : le temps (l'instant) et l'énergie empruntée à un champ du vide. En outre, la fluctuation d'énergie produit une particule de matière et une particule d'antimatière qui s'attirent et s'annihilent en restituant l'énergie empruntée : l'évolution s'annule par retour à la situation initiale.

(Le seul contre-exemple connu est celui de la théorie « d'évaporation » des trous noirs [\[1-k\]](#), évolution réelle où l'annihilation est incertaine parce qu'il y a des particules qui peuvent retomber dans le trou noir.)

Une fluctuation quantique n'est donc pas une évolution au hasard. Elle ne résulte pas d'un choix d'élément d'ensemble, mais d'une instabilité de l'énergie qui n'a de valeur définie à aucun instant, conformément au principe d'incertitude de Heisenberg [\[1-l\]](#).

#### **1.5.5 Hasard et niveau de détail d'une prédiction**

On peut interpréter le choix au hasard de la nature lors d'une [décohérence](#) comme une impossibilité de prédire la valeur choisie à un niveau plus fin que l'ensemble des valeurs propres. Ce choix lui-même constitue *une évolution de type particulier, qui ne se manifeste qu'au niveau microscopique, en mécanique quantique.*

Une limite inférieure de niveau de prédiction intervient aussi dans la décomposition radioactive d'un échantillon d'uranium 238, où le déterminisme régit la proportion de décompositions par unité de temps, pas le choix d'un atome particulier qui se décomposera ou l'instant de sa décomposition. Nous n'avons pas de loi qui prédit

quel atome se décomposera, ou à quel moment un atome donné se décomposera. Nous pouvons postuler un choix au hasard de l'atome dans l'ensemble des atomes de l'échantillon, ou un choix au hasard de l'instant de décomposition d'un atome donné dans le futur (choix vague !). Mais de tels postulats évidents ne nous apportent rien, en attribuant au hasard soit un refus de précision de la nature dont le déterminisme s'applique au niveau de tout l'échantillon, soit notre ignorance d'une loi de choix ; *postuler le hasard par ignorance est stérile*.

La notion de niveau de prédiction intervient également lorsque l'on distingue le niveau atomique (où les prédictions viennent de la mécanique quantique) et le niveau macroscopique (où elles viennent des lois de la physique macroscopique). En appliquant une loi de physique macroscopique on ne peut prévoir quel atome évoluera d'une certaine façon, et l'application de la mécanique quantique au domaine macroscopique est en général impossible par excès de complexité. Non que les lois de ces deux niveaux se contredisent : à la frontière entre eux elles doivent permettre les mêmes prédictions, d'après le *principe de correspondance* [1-m]. Il faut comprendre qu'une loi a un domaine de prédiction dont on ne doit pas sortir.

Certaines personnes attribuent à tort au hasard le résultat imprédictible d'une évolution entre un point situé avant une bifurcation [1-z16] dans l'espace des phases [1-c] et un point après cette bifurcation. La bifurcation se produit lorsqu'un paramètre de la loi d'évolution franchit une valeur critique, franchissement qui entraîne le choix d'une nouvelle loi au point de bifurcation ; aucun hasard n'intervient dans ce choix.

Le fait qu'on étudie des gaz ou des liquides à l'aide des méthodes et théorèmes de la mécanique *statistique* ne vient pas d'une évolution *aléatoire* des molécules de ces fluides, qui se déplacent selon des lois de mouvement et de choc élastique déterministes (et d'ailleurs symétriques par renversement du sens du temps) ; c'est parce qu'on ne s'intéresse qu'à des propriétés macroscopiques de ces fluides (température, pression, entropie, turbulence, etc.).

#### 1.5.6 Premières conclusions sur le hasard et la prédictibilité

*Je pense donc qu'il faut cesser de croire au hasard en tant que principe de comportement imprévisible de la nature. Ce n'est pas parce que je ne sais pas expliquer un phénomène ou prévoir son évolution que je peux invoquer le hasard. L'attribuer au hasard est aussi peu justifié que l'attribuer à Dieu, et faire du hasard un refuge pour mon ignorance ne serait pas rationnel.*

Une variable affectée par une loi d'évolution ne peut ni échapper à son ensemble de définition, ni évoluer en violant une loi de la physique.

La nature limite ce que l'homme peut prévoir, mais elle n'est jamais fantaisiste : dans une situation donnée elle réagit toujours de la même façon (stabilité) et obéit toujours à des lois de conservation (de l'énergie, du moment cinétique, etc.).

#### 1.5.7 Différences entre hasard, indétermination et incertitude en mécanique quantique

Il n'y a pas de *hasard* dans la position, la vitesse ou l'énergie d'un corpuscule de mécanique quantique, il y a de *l'indétermination*, c'est-à-dire un refus de la nature de nous accorder la possibilité de précision infinie qui satisferait notre esprit ; ce refus

est dû à la nature ondulatoire de chaque corpuscule. *Il ne faut donc pas confondre hasard (qui caractérise un choix d'élément) et indétermination (qui caractérise une précision limitée, un flou par superposition).*

En pensant à la « probabilité de position » d'un corpuscule qui se déplace, on risque de se le représenter comme un objet matériel qui a une dimension précise et des chances de se trouver ici plutôt que là, représentation inexacte. Cette dimension n'est pas précise, et il vaut mieux penser à un corpuscule de forme vague, sorte de nuage dont une infinité de réalisations sont superposées dans le paquet d'ondes [1-z14] qui accompagne son déplacement, infinité qui lui donnerait un aspect flou si on pouvait en faire une photo instantanée.

*L'imprévisibilité associée aux fluctuations ponctuelles d'énergie n'est pas, non plus, due au hasard. C'est une conséquence du principe d'incertitude de Heisenberg, qui fait que pendant un court intervalle de temps  $\Delta t$  une énergie n'est pas définie à mieux que  $\Delta E$  près, où  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar$  (quantité qui est une constante de l'Univers). Les fluctuations quantiques manifestent seulement un refus de stabilité de la nature, refus qui ne dure qu'un court instant et ne change pas l'énergie moyenne au point considéré. Il faut accepter ces fluctuations comme on accepte l'imprécision sur la position d'un corpuscule en mouvement, situé « partout » dans son paquet d'ondes : dans aucun de ces cas la nature n'agit au hasard en faisant n'importe quoi.*

### Une erreur fréquente

Il ne faut pas confondre *la propriété naturelle et objective* d'une évolution qu'est le hasard, l'indétermination ou la non-définition par incertitude de Heisenberg, avec sa *conséquence humaine*, l'imprédictibilité de son résultat. Trop de gens parlent d'une « évolution au hasard » dans tous les cas où ils ne peuvent en prévoir le résultat, décrivant ainsi une propriété d'une transformation naturelle au moyen de sa prédictibilité par l'homme.

### **1.5.8 Résumé des conclusions sur le hasard dans l'évolution naturelle**

- Le hasard affecte *la prédictibilité* des conséquences, pas les conséquences (lois d'évolution ou situations) elles-mêmes ; la prédictibilité est un besoin humain ignoré par la nature.
- Le hasard ne se manifeste que par le choix, par la nature, d'un élément dans un ensemble prédéfini de *valeurs propres de l'opérateur associé à une grandeur mesurable*, ensemble où chaque valeur a une probabilité prédéfinie.

*A ma connaissance, ce choix ne se produit que dans un seul type d'évolution naturelle, la décohérence, phénomène de physique quantique.*

- Un choix au hasard de la nature ne viole jamais une de ses lois ; il ne viole jamais, notamment, la thermodynamique ou la conservation de l'énergie+masse.
- Ne pas confondre *hasard* (imprévisibilité d'un choix), *indétermination* (refus de précision) et *incertitude quantique* (instabilité, non-définition).
- Plus généralement, il faut séparer déterminisme et prédictibilité, le premier n'entraînant pas toujours la seconde.

Il y a des lois d'évolution parfaitement déterministes (échappant à tout hasard), à résultat calculable à tout instant  $t$  postérieur à un instant initial  $t_0$ , qui pourtant

interdisent en pratique la prédiction de ce résultat à cause d'une sensibilité énorme, non bornée, aux conditions initiales. Dans ce cas d'imprécision on parle de [chaos déterministe](#).

- Ne pas opposer déterminisme et hasard : une évolution déterministe peut avoir un résultat aussi imprédictible que l'évolution au hasard qu'est la décohérence.

[Voir en fin de texte la table résumant les cas d'imprédictibilité.](#)

### 1.5.9 Evolutions attribuées à tort au hasard

Je me suis permis de limiter le hasard des évolutions naturelles à l'évolution particulière de physique quantique appelée [décohérence](#) parce que j'ai précisé [ci-dessus](#) des limitations de prédictibilité dues à l'ignorance, l'imprécision ou la complexité. Je considère donc comme erronées des attributions au hasard d'évolutions qu'on ne comprend pas (ignorance), dont on ne peut prédire le résultat avec autant de précision qu'on voudrait (imprécision) ou dont le déroulement est trop complexe pour pouvoir être modélisé par un algorithme prédictif.

#### 1.5.9.1 [Le hasard pour raisons psychologiques](#)

J'ai maintes fois constaté qu'une personne attribue des évolutions incomprises au hasard pour des raisons purement psychologiques :

- *Le besoin humain de cohérence* rend pénible la non-compréhension d'un phénomène, c'est-à-dire l'impossibilité de le relier à des faits ou phénomènes connus par des relations de causalité, certaines ou au moins probabilistes.

L'esprit humain aime mieux, alors, *inventer* des relations de causalité, en raisonnant par analogie ou induction, ou même en faisant confiance à son intuition, plutôt qu'admettre son ignorance ; *il n'est même pas capable de s'en empêcher*. Il faut à un homme un sérieux entraînement à la rigueur pour admettre son ignorance, mettre en cause son intuition et vivre l'esprit en paix sans comprendre.

- *Le besoin humain de non-culpabilité, de rejet de responsabilité* : je prétends qu'un phénomène relève du hasard parce que je ne sais pas l'expliquer et qu'admettre mon ignorance me rabaisserait, aux yeux des autres comme aux miens.

#### 1.5.9.2 [Le hasard par raison de contingence – Principe d'identité](#)

Beaucoup de gens, y compris des scientifiques, oublient le *principe d'identité*.

##### [Le principe d'identité : énoncé et conséquences](#)

Le principe philosophique d'identité s'énonce : « *Ce qui est, est ; ce qui n'est pas, n'est pas.* » Une chose est ou n'est pas. Si elle est, elle est identique à elle-même, pas à autre chose. Le monde ne saurait être autre que ce qu'il est, c'est le seul possible. On peut toujours *imaginer* un monde différent, mais ce sera une imagination, c'est-à-dire une abstraction, quelque chose d'irréel, dénué de preuve.

A un instant donné l'Univers est ce qu'il est, avec ses lois physiques et les valeurs précises de leurs constantes. Toute considération de situation en cet instant autre que la situation actuelle est possible, mais seulement en tant que pure spéculation ; c'est le cas notamment pour le *principe anthropique* (voir définition et critique [\[5\]](#)) et

pour une partie de la métaphysique. Enfin, toute considération à un instant du passé de situation autre que ce qu'elle fut à cet instant-là est aussi spéculative.

Application aux ensembles, aux descriptions et aux comparaisons :

- Un ensemble ne peut être une partie non exhaustive de lui-même.  
Un objet matériel de l'Univers - ou l'Univers tout entier - ne peut être une partie non exhaustive de lui-même.  
Une description matérielle *complète* (texte, par exemple) d'un objet matériel ne peut pas faire partie de cet objet car elle se contiendrait elle-même ; l'Univers ne peut contenir de description complète de lui-même, une telle description se contenant elle-même.
- « L'essence » d'un être ou d'un objet constitue sa description complète, avec toutes ses propriétés. C'est une abstraction, comme toute description. Une même essence (même description) peut décrire un objet imaginaire, non encore créé, ou un objet réel, ou plusieurs objets identiques.  
L'essence peut exister, en tant que description abstraite, pour un objet qui existe réellement ou non. Mais elle ne peut comprendre parmi ses propriétés l'existence réelle de l'objet, qui est une information séparée. Donc ce n'est pas parce que j'imagine la description détaillée et précise d'un couteau que celui-ci existe ; il existera, par exemple, si je le fabrique.
- Conséquences du [principe d'homogénéité](#) :  
Il ne peut exister aucune causalité reliant une abstraction et une réalité matérielle, parce qu'ils appartiennent à des domaines disjoints ; une causalité n'est possible qu'entre deux éléments du même domaine. Une idée d'un esprit humain n'est cause d'aucune réalité matérielle et une telle réalité n'est cause d'aucune idée. Voici quelques évidences.  
Une idée n'est cause ou conséquence que par l'intermédiaire d'un esprit humain, ou de Dieu pour les croyants.  
Une réalité ne peut être cause d'une idée que dans un esprit qui pense.
- Une comparaison d'un concept ou d'une représentation ne se conçoit qu'avec un concept *distinct* ou une représentation *distincte*, car une comparaison à soi-même ne peut produire qu'un jugement d'identité sans intérêt.  
Donc un jugement concernant un objet ou un événement *réel* (qui résulte nécessairement d'une comparaison) ne peut jamais être absolu ; il ne peut concerner une comparaison de l'objet ou de l'événement avec lui-même, mais seulement avec un objet ou un événement distinct.  
Dans ce qui précède, le terme « distinct » veut dire « qui n'est pas confondu avec ». Mais deux objets distincts qu'on compare doivent être comparables selon le point de vue considéré : on ne peut comparer un chien et une plante au point de vue forme d'être vivant, mais on peut les comparer au point de vue hauteur ([principe d'homogénéité](#)).
- Une axiomatique [\[1-z10\]](#) ne peut inclure ses propres critères de jugement *global*, qui impliquent la comparaison avec quelque chose d'externe ; par contre, elle peut contenir des règles permettant certains jugements de cohérence ou

l'établissement de relations (d'implication, d'ordre, etc.) entre deux ou plus de ses propositions. L'adéquation d'une axiomatique (*système formel*) à un ensemble de lois physiques qu'elle modéliserait ne peut donc se juger sans comparaison de ses résultats à quelque chose d'externe à l'axiomatique, comparaison qui implique *une sémantique*.

- D'après [ce qui précède](#), la *cause première* d'un phénomène ou d'un objet (création, première apparition) ne peut être qu'externe à ce phénomène ou cet objet. Un objet ne peut se créer lui-même, il doit résulter d'un phénomène extérieur ; car pour se créer lui-même, il devrait exister avant et pendant cette création, ce qui est impossible ; par contre, un objet créé peut se transformer ensuite sans intervention extérieure. En conséquence, *la notion de cause première dépourvue de cause est logiquement absurde*.

Si on admet Dieu en tant que cause première de l'Univers au moment où Il l'a créé, Dieu existait déjà et l'a créé sans utiliser quoi que ce soit de l'Univers, soit à partir de rien, soit en transformant une partie de Lui-même et/ou de quelque chose d'autre.

### Le hasard par raison de contingence

Oubliant le principe d'identité, beaucoup de gens considèrent qu'un événement du passé ou du présent *dont l'existence est certaine* aurait pu ne pas se produire ou avait une certaine probabilité de ne pas se produire. C'est là une faute de logique, une spéculation pure. On se trompe donc en croyant comme Platon que le possible précède le réel et le structure ; au contraire, c'est le réel et son déterminisme qui définissent ce qui est possible.

#### **1.5.10 Conséquences multiples d'une situation donnée - Décohérence**

Nous venons de voir qu'à part l'ignorance il y a trois types de raisons qui empêchent ou limitent la prédiction des conséquences d'une situation : l'imprécision, la complexité et le choix au hasard en mécanique quantique. L'existence de ce choix oblige d'ores et déjà à préciser le postulat de causalité : dans la phrase « *si la cause existe au départ, la conséquence a lieu* » il faut entendre par conséquence d'une situation la possibilité d'une *multiplicité de conséquences superposées au sens des fonctions d'onde* [\[1-z18\]](#).

Imprécision, complexité et choix au hasard sont dus à la nature même des lois de l'Univers, qu'il n'est pas question d'ignorer.

Allons au fond des choses. Nous avons vu plus haut, à propos du hasard, que dans certaines situations la nature réagissait de manière multiple :

- *Soit en déclenchant plusieurs lois d'évolution à la fois, dont chacune a un déroulement indépendant et un résultat unique.*

C'est le cas en physique quantique lorsque la trajectoire d'un corpuscule entre un point de départ A et un point d'arrivée B est en fait une infinité de trajectoires simultanées, empruntant des chemins différents avec des vecteurs vitesse fonctions différentes du temps, mais qui se terminent tous en B en même temps.

C'est aussi le cas lorsque la trajectoire d'un corpuscule est définie à chaque instant par un paquet d'ondes [\[1-z14\]](#) superposées, ondes de matière décrivant des amplitudes de probabilité de présence qui s'ajoutent en amplitude et en

phase. Vu à un instant donné le corpuscule paraît alors flou, comme s'il était composé d'une infinité de corpuscules superposés avec un décalage.

Mais, à son échelle macroscopique, *l'homme ne voit jamais plusieurs conséquences à la fois, il ne peut voir que leur résultat, nécessairement unique* ; et dans le cas d'un corpuscule accompagné d'un paquet d'ondes, ce résultat à un instant donné est une position floue et une vitesse imprécise.

- Soit en déclenchant une seule loi d'évolution donnant des résultats multiples superposés, c'est-à-dire existant en même temps.

Cette superposition d'états simultanés n'est pérenne qu'à l'échelle atomique. A l'échelle macroscopique, l'interaction entre la superposition microscopique et l'environnement macroscopique (par exemple lors d'une mesure physique) met fin à la superposition et choisit de révéler à l'échelle macroscopique *un seul* des états superposés, choisi au hasard ; le passage de l'état superposé à l'état unique est appelé « décohérence » et il est irréversible. Compléments sur la décohérence : voir [\[1-j\]](#).

### 1.5.11 Il faut admettre les dualités de comportement

La mécanique quantique, outil mathématique de la physique quantique, permet aussi d'expliquer pourquoi certains corpuscules apparaissent tantôt comme de petits objets matériels, tantôt comme des ondes capables de provoquer des phénomènes d'interférences. Dans le cas des photons (de masse nulle), les ondes sont électromagnétiques, dans le cas des corpuscules de masse non nulle (électrons, protons, atomes, etc.) il s'agit d'ondes de probabilité.

L'explication de cette dualité repose sur le « principe de complémentarité », découvert en 1928 par Niels Bohr. Selon ce principe, le comportement de phénomènes comme les électrons ou la lumière est tantôt corpusculaire, tantôt ondulatoire, *selon l'expérience* ; il y a donc une dualité onde-particule. On ne peut observer à la fois un comportement corpusculaire et un comportement ondulatoire, ces deux comportements s'excluant mutuellement et constituant des *descriptions complémentaires* des phénomènes auxquels ils s'appliquent [\[1-m\]](#).

De son côté, la Relativité montre que l'énergie et la matière sont deux formes complémentaires d'un même système ou d'une même région de l'espace, formes qui peuvent se transformer l'une dans l'autre selon l'équation d'Einstein  $e=mc^2$ . Elle montre aussi que la gravitation peut être interprétée comme un champ de force ou comme une courbure de l'espace-temps due à la présence d'une masse.

La physique moderne nous oblige donc à considérer que la nature peut présenter deux aspects très différents à la fois, aspects qui se complètent lorsqu'on veut comprendre ou prédire certaines évolutions.

## 1.6 Chaos

Par manque de rigueur, on considère souvent un phénomène naturel chaotique comme régi par le hasard. Nous allons voir qu'en précisant les évolutions chaotiques il n'en est rien.

### 1.6.1 Définition

Je ne connais pas de définition précise du mot « chaos » en matière d'évolution. Les divers textes sur la dynamique des systèmes dont j'ai connaissance s'accordent pour qualifier de chaotique une évolution déterministe au sens mathématique :

- Qui est non linéaire : l'effet d'une variation d'un paramètre n'est pas proportionnel à cette variation ;
- Qui est si sensible aux conditions initiales qu'on ne peut en prévoir le déroulement à long terme *avant* son début, mais seulement un instant *après*, quand elle est « lancée » ;
- Ou dont la connaissance pendant un temps aussi long qu'on veut avant son début ne permet pas de prévoir le déroulement ultérieur à long terme, ce déroulement étant apériodique ;
- Ou dont la courbe d'évolution dans l'espace des phases [1-c] :
  - N'est ni réduite à un point, comme celle d'un système qui n'évolue pas ;
  - Ni convergente vers un attracteur ponctuel [1-d], comme un système dissipatif qui perd de l'énergie (définition de « dissipatif » : [1-z8]) ;
  - Ni fermée, comme celle d'un pendule simple, système périodique conservatif (définition de « conservatif » : [1-z8]) ;
  - Ni inscrite sur un tore, comme celle des systèmes quasi périodiques [1-n] ;
  - Converge (lorsque le système est dissipatif) vers un attracteur étrange [1-b], courbe à structure fractale où toute évolution qui commence reste confinée mais ne peut être prédite avant son départ, du fait de sa sensibilité aux conditions initiales.

Exemple de phénomène chaotique : le "problème des 3 corps" [1-o].

#### Remarques sur la prédictibilité des phénomènes chaotiques – Chaos déterministe

- *La définition d'une évolution chaotique ne fait pas intervenir le hasard* : on parle souvent de « chaos déterministe ». Un phénomène chaotique reste à tout moment régi par une loi déterministe à évolution calculable, même s'il peut aussi, comme tout phénomène, changer de loi d'évolution sous l'influence d'un paramètre qui change.
- Un phénomène chaotique est apériodique, mais la réciproque n'est pas toujours vraie. Un phénomène apériodique :
  - A une évolution prévisible à long terme si on connaît toutes les fréquences d'amplitude non négligeable de sa [décomposition en série de Fourier](#) ;
  - N'a la sensibilité aux conditions initiales d'un phénomène chaotique que lorsqu'il est dissipatif, sur l'attracteur étrange vers lequel il converge.

### 1.6.2 Conditions d'apparition d'une évolution chaotique – Série de Fourier

Toute évolution dans le temps d'une variable peut être décomposée en série de Fourier, somme  $f(t)$  d'un nombre fini ou infini de fonctions sinusoïdales de fréquences multiples d'une fréquence de base, chacune avec son amplitude et sa phase :

$$f(t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + a_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + a_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots$$

Cet ensemble des fréquences composantes est appelé *spectre de Fourier*.

Exemple de représentation graphique d'un phénomène apériodique somme de fonctions périodiques [1-p].

Chaque évolution périodique est un comportement ordonné, prévisible. Mais la composition de plusieurs fonctions périodiques de fréquence, amplitude et phase différentes peut être apériodique si les périodes des phénomènes composants sont incommensurables entre elles (c'est-à-dire si leurs rapports deux à deux sont toujours irrationnels) comme dans l'exemple du graphique [1-p]. Voici trois cas d'évolution vers un régime chaotique de systèmes dynamiques à *petit nombre de degrés de liberté*.

- Un régime périodique pendant un long intervalle de temps peut se déstabiliser brusquement, devenir chaotique pendant un moment, puis redevenir périodique, avant de se déstabiliser de nouveau au bout d'un temps qui n'est pas nécessairement égal au précédent. Une telle évolution « par bouffées » a été observée dans certains cas de convection thermique et de réaction chimique évolutive.
- Un régime périodique peut évoluer par des doublements successifs de sa période sous l'effet d'un paramètre de contrôle, jusqu'à atteindre un point d'accumulation où la période est infinie et où commence l'évolution chaotique. On rencontre ce type d'évolution en dynamique des populations.
- Un régime périodique peut devenir quasi périodique sous l'effet d'un paramètre de contrôle. L'évolution correspond alors à 2 fréquences, puis peut-être à 3, etc. Si ces fréquences sont indépendantes et incommensurables (l'une au moins n'étant une fraction exacte d'aucune autre), le régime peut devenir chaotique.

Dans un système dynamique à nombre de degrés de liberté plus important, le chaos peut être à la fois *temporel* (comme les cas que nous avons vus jusqu'à présent) et *spatial* (le comportement différant d'un point du système à un autre, le système ayant des régions ordonnées et des régions désordonnées).

Conclusion : *une évolution déterministe peut passer d'un régime stable et prévisible à un régime chaotique, imprévisible en pratique, sous l'influence de divers paramètres, sans cesser d'être déterministe* (et décrite par des équations différentielles ou des équations à dérivées partielles).

### 1.6.3 Fluctuations faussement aléatoires d'un phénomène apériodique

Certains auteurs ont attribué à tort au hasard des effets considérables, voire catastrophiques, dus aux fluctuations d'un phénomène apériodique ou chaotique. Voici des exemples de ce qui peut arriver.

#### Fluctuations périodiques dont les amplitudes s'ajoutent

Un phénomène apériodique peut comporter, dans sa décomposition en série de Fourier, une composante de période très longue et d'amplitude non négligeable. Il peut alors arriver, même si c'est rare, que cette amplitude s'ajoute à d'autres amplitudes de phénomènes composants pour donner une amplitude totale considérable, susceptible de provoquer une catastrophe. Il peut aussi arriver qu'un

nombre élevé de phénomènes composants ajoutent leurs amplitudes à des instants précis, même si ces instants sont rares.

Des « vagues scélérates » océaniques peuvent atteindre des hauteurs de plusieurs dizaines de mètres, par empilement d'oscillations verticales d'eau qui se déplacent à des vitesses différentes et arrivent à se rattraper. Ces vagues endommagent gravement même de très gros bateaux. Elles sont rares, imprévisibles et commencent à faire l'objet d'une surveillance internationale par satellite pour avertir les navires menacés.

Le hasard n'est pour rien dans de telles fluctuations. Tous les phénomènes périodiques composant un phénomène apériodique ont une évolution calculable, donc prévisible. L'attribution au hasard vient de l'ignorance des auteurs, ignorance due en partie à la rareté des phénomènes d'amplification catastrophique, rareté qui gêne leur étude scientifique. Encore une fois, *la nature ne connaît le hasard que lors du choix d'un élément dans l'ensemble des valeurs de la solution du modèle mathématique d'évolution*, valeurs toutes prédéterminées et à probabilités connues.

#### Amplification d'une fluctuation par franchissement de valeur critique

Une fluctuation exceptionnelle mais d'amplitude intrinsèquement modeste (comme une fluctuation moléculaire) peut entraîner une évolution d'ampleur spectaculaire lorsqu'elle fait franchir une valeur critique à un paramètre, mettant alors en jeu une énergie importante et changeant une loi d'évolution par bifurcation dans l'espace des phases [1-z16]. Exemples :

- Un lac à l'eau très pure qui devrait être gelé est en surfusion à une température largement inférieure à zéro degré C. Sa surface est très calme, il n'y a pas de vent. Si on y lance un caillou minuscule l'eau peut geler instantanément, avec une énergie de solidification des millions de fois plus importante que l'énergie apportée par la chute du petit caillou.
- Un rocher de plusieurs milliers de tonnes est en équilibre instable à flanc de montagne. Le gel peut déstabiliser une petite pierre située au-dessus, et cette pierre en tombant va desceller le rocher qui va tomber à son tour, avec un échange d'énergie potentielle en énergie cinétique infiniment supérieur à celui de la petite pierre.

Une variable macroscopique qui fluctue du fait d'évolutions microscopiques peut donc subir :

- Soit une évolution masquée par les incertitudes sur les autres paramètres macroscopiques.
- Soit une évolution amplifiée par une sensibilité à des conditions initiales et/ou une bifurcation entraînant un changement de loi d'évolution ; des bifurcations en cascade peuvent alors changer un système stable en système chaotique, comme c'est le cas pour certaines formes de turbulence.

Dans ce cas comme le précédent, le hasard n'est pour rien : les conditions (énergie, instabilité) du déclenchement du phénomène spectaculaire existaient au départ, avec un paramètre à valeur critique dépendant d'un phénomène fluctuant plus modeste.

### Fluctuations d'énergie dues au principe d'incertitude de Heisenberg

La mécanique quantique montre qu'au voisinage de tout point de l'Univers l'énergie n'est pas définie et stable, mais qu'elle a une plage de variation qui dépend de la largeur de l'intervalle de temps où on l'observe : l'énergie peut varier d'autant plus que l'intervalle de temps est réduit. Bien entendu, le principe de conservation de l'énergie reste respecté *en moyenne* : un « emprunt » momentané d'énergie à l'espace environnant est restitué l'instant d'après. Ce phénomène a été évoqué [plus haut](#) et l'est plus en détail dans [\[1-q\]](#). [Nous avons vu](#) que ce n'est pas une évolution aléatoire.

### Fluctuations de variables macroscopiques dues à des variations microscopiques

Pour présenter et analyser ce phénomène nous allons raisonner sur un exemple.

La complexité du mouvement brownien [\[1-h\]](#) de molécules de gaz dans une enceinte fermée, due au nombre de molécules (des milliards) et au nombre de chocs par seconde subis par chacune (des milliers), rend illusoire toute prédiction déterministe du mouvement d'une molécule donnée connaissant sa position et son vecteur vitesse à l'instant initial, bien que les lois des mouvements et des chocs élastiques de la molécule soient déterministes au sens traditionnel. En outre, le sort d'une molécule particulière étant de peu d'intérêt (!) on a pris l'habitude de considérer des grandeurs statistiques caractérisant l'ensemble du gaz de l'enceinte : vitesse moyenne d'une molécule, température et entropie du gaz de l'enceinte, etc.

Bien que, pour une enceinte isolée, le 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique affirme que son entropie ne peut que croître jusqu'au « désordre maximum », sa valeur instantanée fluctue constamment un peu autour de ce maximum, du fait du mouvement brownien des molécules. On peut donc se demander si cette fluctuation d'entropie (c'est-à-dire d'organisation-désorganisation) n'est pas un exemple de hasard dans la nature, comme le croît notamment Prigogine.

En fait, il n'en est rien.

L'entropie n'existe pas dans la nature : c'est une abstraction commode pour modéliser l'état d'organisation d'un ensemble de molécules. Ses fluctuations n'existent que parce qu'on fait des calculs probabilistes sur des populations de molécules, ce ne sont pas des réalités physiques comme une variation de l'énergie totale, impossible pour un système isolé.

Les travaux d'Ehrenfest sur des systèmes isolés, à l'équilibre thermodynamique, constitués d'un grand nombre  $N$  de molécules indépendantes, montrent que le système s'écarte sans cesse de l'équilibre et y revient. Ces travaux modélisent l'état d'organisation du système et la diffusion de molécules par les transitions d'état d'un processus markovien, modèle *théorique arbitraire* qui montre (si on lui fait confiance) que l'entropie peut décroître en dessous de son maximum selon une loi de probabilité binomiale en  $2^{-N}$ .

Mais les calculs numériques et l'expérimentation ont montré que le temps nécessaire pour qu'une décroissance non négligeable de l'entropie se produise (c'est-à-dire pour que le système s'organise davantage) sont supérieurs à l'âge de l'Univers. Considérons, par exemple, le cas - très favorable à la décroissance d'entropie - d'un système constitué de  $N=100$  molécules seulement subissant 1 million de transitions

par seconde (10 000 en moyenne par molécule). Pour passer d'un état d'équilibre, où les  $N$  molécules sont réparties aléatoirement dans une enceinte, à un état plus organisé où elles sont toutes dans une moitié prédéfinie de l'enceinte, il faut alors environ  $10^{15}$  ans, soit environ 70 000 fois l'âge de l'Univers. *Les expériences ont confirmé qu'un système macroscopique isolé ne voit jamais son entropie décroître de manière mesurable.*

L'irréversibilité d'une évolution macroscopique d'un fluide (prévue par la thermodynamique et qui semble contredire l'évolution réversible prévue molécule par molécule) s'explique théoriquement par le fait que la probabilité pour que toutes ses molécules reviennent à leur position de départ après un certain temps est fantastiquement faible. (En fait, cette explication probabiliste n'est pas certaine : *comme toute explication probabiliste, elle est postulée.* Heureusement, l'irréversibilité macroscopique n'a jamais été démentie expérimentalement, personne n'ayant jamais constaté un événement aussi improbable qu'une tasse de café où on a fait fondre du sucre et qui se sépare spontanément en café sans sucre et sucre hors de la tasse !)

Conclusions :

- Il n'y a pas de hasard dans un phénomène macroscopique résultant de phénomènes déterministes à l'échelle atomique. Le hasard auquel croient certains est un hasard par ignorance due à l'impossibilité de mesurer et calculer les évolutions élémentaires.
- Les fluctuations ponctuelles d'une variable statistique comme l'entropie, regroupant des milliards de réalisations d'une variable à l'échelle moléculaire, ont une amplitude dont la probabilité varie exponentiellement en raison inverse du nombre de ces dernières. Elle décroît donc si vite qu'aucune mesure ne peut en détecter un effet à une échelle accessible aux expériences.

### Amplification génétique et évolution du vivant vers la complexité

Nous venons de voir que des fluctuations d'entropie d'origine microscopique ne peuvent avoir d'effet macroscopique. Mais ce que ces fluctuations ne peuvent faire en physique est possible dans un être vivant, en deux étapes d'amplification :

- Des accidents de réplication du génome [1-r] sont inévitables du fait des solutions multiples de la mécanique quantique, chacune associée à une probabilité d'apparition. C'est ainsi que des liaisons chimiques peuvent s'établir ou non, modifiant ainsi un gène de 3 milliards de bases ou son expression ; il suffit parfois qu'un minuscule radical  $\text{CH}_3$  de 4 atomes soit lié ou non pour faire une différence [1-s].

Un tel accident de réplication peut ne pas avoir d'effet ; il peut aussi produire un être non viable ou souffrant d'une infériorité par rapport à d'autres espèces qui le fera éliminer par la sélection naturelle. Mais il produit parfois un être parfaitement adapté, qui pourra avoir une descendance.

- Du point de vue thermodynamique, la complexification (organisation de plus en plus poussée) est possible pour des êtres vivants, car ceux-ci sont des systèmes dissipatifs loin de l'équilibre et le 2<sup>ème</sup> principe ne s'applique pas [1-t].

#### 1.6.4 Domaines où on connaît des évolutions chaotiques

Les évolutions chaotiques d'un système peuvent intervenir dans de nombreux domaines. Exemples :

- En physiologie, le fonctionnement synchrone des cellules musculaires du cœur peut se désynchroniser, provoquant une arythmie accompagnée d'une tachycardie que l'on soigne par défibrillation et avec des médicaments comme le Cordarone ou le Sotalex.
- En dynamique des populations animales, la densité d'une population dépend de facteurs internes comme la résistance aux agressions de l'environnement, la fécondité ou les habitudes de vie, et de facteurs externes comme les ressources alimentaires, les prédateurs, etc. Les interactions de tous ces facteurs sont complexes et mal connues. Des modèles mathématiques simplifiés montrent qu'une densité de population peut être stable, ou varier de manière périodique ou même chaotique (exemple : [\[1-u\]](#)).
- Les propriétés optiques d'un milieu sont affectées par des variations de sa température, de sa densité ou de sa concentration en particules opaques. De telles variations affectent la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu, donc son indice de réfraction, et déclenchent des phénomènes d'absorption ou de diffusion à certaines longueurs d'onde. Si ces variations sont chaotiques, les images vues à travers le milieu (par exemple en astronomie) peuvent être fortement perturbées ; c'est ainsi que les mouvements atmosphériques, l'humidité et la pollution brouillent la vision des télescopes.
- La [turbulence](#) d'un fluide accroît souvent ses échanges de chaleur ou ses réactions chimiques avec les parois. Nous avons plus froid, par exemple, dans un vent en rafales que dans un air calme à la même température. Les poils sur la peau de certains animaux diminuent les échanges de température et d'humidité en diminuant la turbulence des mouvements d'air. La peau des requins a des écailles dont la taille, la forme et la rugosité diminuent fortement les frottements lorsqu'il nage, augmentant ainsi considérablement l'efficacité de ses efforts.

#### 1.7 Turbulence

Un phénomène physique turbulent :

- A un comportement de chaos déterministe, donc ne devant rien au hasard. Il apparaît dans la plupart des systèmes non linéaires par franchissement de bifurcations [\[1-z16\]](#) successives dans l'espace des phases.
- Est irrégulier à petite échelle (au sens dimension ou durée), mais plus régulier à grande échelle, les comportements aux diverses échelles étant interdépendants. Cette différence de comportement entre échelles caractérise la non-linéarité.
- N'a ni régularité, ni mémoire des états passés, ce qui en rend l'évolution imprédictible malgré le caractère déterministe des équations différentielles de son modèle mathématique (qui sont parfois des équations aux dérivées partielles non linéaires). En pratique, l'intégration même numérique de ces équations différentielles peut être si difficile qu'on recourt à des approximations statistiques ou à une étude purement expérimentale.

L'évolution d'un système devient turbulente du fait de valeurs de certains paramètres qui franchissent un seuil critique ; la loi d'évolution bifurque alors dans l'espace des phases. Le diagramme des phases d'un fluide turbulent présente des bifurcations successives correspondant à des valeurs critiques des paramètres de bifurcation [1-z16]. L'étude générale des bifurcations relève de la *théorie des bifurcations*. Les conditions d'établissement, de maintien et de disparition des états entre deux bifurcations successives relève de la *théorie de la stabilité*. Ces deux théories sont déterministes, dénuées de hasard.

Les facteurs qui facilitent l'établissement d'un écoulement turbulent d'un fluide sont un nombre de Reynolds grand [1-z17], un nombre élevé de degrés de liberté et la non-linéarité du système d'équations différentielles de son modèle.

Animations montrant de la turbulence : voir [3].

## 1.8 Le déterminisme étendu

Certaines lois d'évolution de la nature ont parfois des résultats imprévisibles, nous l'avons vu. Nous savons aussi qu'en mécanique quantique il existe une évolution particulière irréversible, la *décohérence*, où la nature choisit au hasard un élément d'un ensemble prédéterminé. Nous savons enfin qu'il existe des évolutions produisant plusieurs résultats simultanément, en superposition.

Les résultats d'évolutions physiques sont prédictibles parfois au niveau le plus fin ; parfois à un niveau plus élevé ; parfois au niveau d'un ensemble de valeurs propres et parfois avec une limite de précision ; parfois ils sont imprédictibles comme les fluctuations quantiques, instables par sensibilité aux conditions initiales, ou incalculables.

Le déterminisme philosophique promettait de prédire toutes les évolutions, avec leurs résultats, à un horizon arbitrairement lointain ; il promettait aussi la reconstitution en pensée du passé.

Le déterminisme scientifique a permis plus de conformité aux lois de la nature en réduisant les promesses de prédiction à celles du postulat de causalité et en ne promettant plus de reconstituer le passé.

Pour prendre en compte les progrès scientifiques comme la mécanique quantique avec sa quantification et son choix au hasard, la relativité avec son espace-temps et sa causalité dépendant de l'observateur, les phénomènes chaotiques avec leur sensibilité aux conditions initiales, ainsi que les contraintes dues à l'imprécision et à l'instabilité, nous avons besoin d'un principe de déterminisme adapté à toutes les évolutions de la nature, connues ou à découvrir. Un tel principe doit aussi être compatible avec le déterminisme scientifique, dont on ne peut nier la valeur. Nous allons en construire un par induction à partir de propriétés de l'Univers, et nous l'appellerons « déterminisme étendu ».

### 1.8.1 Propriétés des lois de l'Univers

*La nature que les lois physiques décrivent est uniforme.* Cette uniformité de l'Univers a des conséquences fondamentales, comme la conservation de la quantité de mouvement, du moment cinétique et de l'énergie. Voici des caractéristiques de cette uniformité.

- *L'espace est homogène et isotrope* : il a les mêmes propriétés en tout point et dans toutes les directions. (détails et justification : [\[1-x\]](#))
- *Les lois physiques sont stables (invariantes) dans le temps et l'espace.* [\[1-y\]](#)  
C'est l'origine de la [règle de stabilité](#) associée au postulat de causalité dans le déterminisme scientifique.
- *Les lois physiques de l'Univers sont cohérentes* (non contradictoires) ; elles se complètent sans jamais se contredire. Elles respectent les trois principes fondamentaux de la logique, formulés par induction à partir d'observations de la nature : principe de non-contradiction, principe du tiers exclu et principe d'identité. Nous savons, en plus, que certaines lois de la nature s'appliquent à un certain niveau de détail sans jamais contredire une loi d'un autre niveau.
- *La nature est complète* : elle a *toutes* les lois qu'il faut pour réagir à toutes les situations et expliquer tous les phénomènes ; c'est le *postulat de détermination complète* de Kant.

L'existence et la stabilité des lois de l'Univers nous suggèrent le postulat de causalité :

- D'une part, l'existence d'un état initial donné et l'action d'une loi donnée étant *toujours* suivies d'un état final qui ne dépend que de l'état initial et de la loi (ce qui constitue une condition *suffisante*) ;
- D'autre part, puisqu'on n'observe *jamais* un état final donné qui, ayant été précédé de l'état initial observé, n'a pas subi l'action de la loi d'évolution postulée (qui est donc *nécessaire* à la transition entre ces deux états), on peut postuler par induction que cette évolution est régie par un principe général, le [principe de causalité](#), qu'on peut résumer sous la forme :

*Tout ce qui existe et tout ce qui se produit dans l'Univers a une cause et obéit à des lois.*

Autre énoncé de cette condition nécessaire : une situation observée résulte nécessairement d'une évolution ou création, elle-même conséquence d'une situation précédente.

Ce postulat est légitime dans la mesure où il est vérifié par d'innombrables expériences et n'est contredit par aucune (voir la construction empirique d'une axiomatique [\[1-z\]](#)). D'après la définition de la vérité scientifique du rationalisme critique [\[1-z1\]](#) *ce postulat peut être considéré comme une loi de causalité jusqu'à preuve du contraire.*

Le fait que certains phénomènes soient inexplicables ne contredit pas ce postulat, il nous incite à faire des efforts de recherche pour les comprendre ; il nous incite aussi à rester vigilants pour le cas où la découverte d'un fait inexplicable dans le cadre d'une loi de calcul ou d'évolution censée l'expliquer, ou qui la contredit, nous oblige à modifier ou remplacer cette loi.

### **1.8.2 Définition constructive du déterminisme étendu**

Dans la suite de ce texte nous allons donc postuler l'uniformité, la stabilité, la cohérence et la complétude des lois physiques de l'Univers, et nous définirons le déterminisme *étendu* comme suit :

*Le déterminisme étendu est le principe qui régit l'évolution d'une cause à ses conséquences sous l'action de toute loi naturelle.*

Cet énoncé du principe de déterminisme étendu doit être compatible avec la définition du déterminisme scientifique donnée [précédemment](#) (condition nécessaire et suffisante et règle de stabilité), ainsi qu'avec [les obstacles à la prédiction](#) cités.

#### Définition constructive du déterminisme étendu

D'habitude, une définition décrit la signification d'un mot. Ne pouvant me contenter d'une telle définition *descriptive* pour le déterminisme étendu, j'utilise ci-dessous une définition *constructive* permettant une extension infinie de cette notion déduite de propriétés des lois de l'Univers.

#### Construction

Le déterminisme étendu comprend d'abord le déterminisme scientifique, défini [ci-dessus](#). Il comprend ensuite toutes les règles d'évolution des lois de la nature, incorporées comme suit.

- Nous prenons toutes les lois d'évolution de l'Univers, une par une, dans un ordre quelconque.
- Considérons une de ces lois. Si sa règle d'évolution fait déjà partie du déterminisme étendu, nous l'ignorons et passons à la suivante ; sinon nous incorporons cette règle d'évolution à la définition du déterminisme étendu.
- Chaque fois que nous incorporons la règle d'évolution d'une loi supplémentaire, nous vérifions sa cohérence avec les règles déjà incorporées, de manière à rester conforme à la nature, dont aucune règle d'évolution n'en contredit une autre. En principe, cette vérification est inutile si les énoncés des lois respectent bien la règle de cohérence des lois de l'Univers.

La définition du déterminisme étendu sera ainsi complétée progressivement, au fur et à mesure des découvertes scientifiques.

#### 1.8.2.1 Validité de cette approche

*Le déterminisme étendu défini comme ci-dessus constitue une axiomatique [1-z10]* dont les axiomes (règles de faits) sont les conditions initiales des diverses lois d'évolution et les règles de déduction (d'inférence) sont les règles d'évolution correspondantes, selon la sémantique suivante : si la situation répond à telle(s) condition(s), alors elle évolue selon telle règle - une règle correspondant à une seule loi d'évolution, sauf en physique quantique où plusieurs lois peuvent être déclenchées en parallèle.

La validité *théorique* de cette approche a été étudiée et justifiée par les logiciens qui ont montré comment on peut compléter une axiomatique au fur et à mesure qu'apparaissent des vérités ou des règles de déduction qu'on ne peut déduire des axiomes existants, mais que la sémantique du sujet impose de prendre en compte. Ce point est abordé dans [\[1-z2\]](#).

La validité *pratique* de cette approche résulte de son respect de la méthode scientifique, qui ajoute des lois nouvelles aux lois existantes ou les remplace, au fur et à mesure du progrès des connaissances. Concernant le déterminisme étendu, on ajoute de nouvelles règles d'évolution des causes aux conséquences au fur et à mesure que de nouvelles lois l'exigent, en excluant les redondances et les contradictions.

Par construction, le déterminisme étendu n'exclut ni le hasard ni l'imprécision, dont il fait des lois de comportement pour des cas précis.

Enfin, la définition constructive du déterminisme étendu n'en fait pas un système interprétatif [\[1-z3\]](#).

### **1.8.3 Universalité et unicité du déterminisme étendu**

*L'universalité* du déterminisme étendu résulte de sa définition constructive, qui prend bien en compte toutes les lois de l'Univers, toutes celles qui sont connues à un instant donné et toutes celles que l'on découvrira, au fur et à mesure de leur découverte.

*L'unicité* du déterminisme étendu résulte de son caractère exhaustif.

## **1.9 Restriction du postulat de causalité**

### **1.9.1 Limites de la règle de stabilité du déterminisme**

La [règle de stabilité](#) des lois du déterminisme scientifique, reprise dans le déterminisme étendu, n'a pas besoin d'être absolue. Son respect n'est nécessaire que pour assurer la cohérence des évolutions dans le temps et l'espace, ce qui exige :

- que l'évolution d'une situation *S* ne dépende que des valeurs initiales de ses variables, pas de l'instant de départ ;
- qu'elle soit la même pour deux situations *S* et *S'* déduites l'une de l'autre par un déplacement dans l'espace ;
- qu'une évolution commencée se poursuive avec la même loi pendant toute sa durée et dans tout l'espace concerné.

### Considérations relativistes

J'explique, en décrivant les propriétés relativistes de l'espace-temps dans l'annexe [\[1-z4\]](#) du livre [\[1\]](#), qu'un événement *A* ne peut être cause d'un événement *B* que si, dans le diagramme d'espace-temps, *B* est dans le cône de lumière de *A*, c'est-à-dire si la lumière partant du lieu de l'événement *A* et se propageant à sa vitesse habituelle  $c = 299\,792\,458$  m/s a le temps d'arriver au lieu de l'événement *B* avant la survenance de ce dernier.

Si *B* est hors du cône de lumière de *A* il ne peut avoir été causé ou influencé par *A*, et des lois physiques différentes pourraient s'appliquer aux lieux et instants de *A* et *B* sans conséquence sur la cohérence de l'Univers pour des observateurs en *A* et *B*. Par contre un autre observateur, *C*, capable de voir les deux événements *A* et *B* (donc situé dans leurs deux cônes de lumière) pourrait s'apercevoir d'une éventuelle

différence entre les lois de la nature s'appliquant en A et en B si cette différence n'était pas négligeable.

Donc, vue de notre Terre à notre époque, une éventuelle variation d'une loi de l'Univers peut être visible ou invisible, selon son emplacement et sa date dans l'espace-temps de l'Univers.

En outre, l'expansion de l'Univers est actuellement environ 1.8 fois plus rapide que la vitesse  $c$  de la lumière et n'affecte que l'espace entre amas de galaxies, car la force qui la produit est plus faible que la gravitation qui domine dans ces amas et empêche l'expansion. Un événement actuel situé assez loin de notre galaxie nous restera donc à jamais inconnu, sa lumière ne pouvant nous atteindre parce que moins rapide que l'expansion. Une éventuelle différence de loi physique entre le lieu et l'époque de cet événement et notre Terre à notre époque serait sans conséquence pour nous et indétectable.

#### La règle de stabilité n'a pas besoin d'être absolue

Une éventuelle différence entre lois de la nature peut rester invisible pour nous et notre déterminisme, soit pour des raisons relativistes, soit tout simplement si ses effets sont négligeables aux échelles (de temps, de longueur, d'énergie, etc.) où nous pouvons en être impactés. *La règle de stabilité n'a donc pas besoin d'être absolue.*

### **1.9.2 Stabilité des lois d'évolution et situations nouvelles**

#### Apparition d'une loi d'évolution

La règle de stabilité du déterminisme scientifique implique ceci : à l'apparition d'une situation donnée  $S$ , une certaine loi physique d'évolution  $L$  est appliquée automatiquement par la nature ; et si la même situation  $S$  réapparaît à un autre moment et/ou dans un autre lieu, c'est la même loi d'évolution  $L$  qui sera appliquée.

Mais nous n'avons nullement postulé que la loi  $L$  doit exister *avant* la première survenance de la situation  $S$ . Si elle existait avant, cette loi serait, au moins provisoirement, sans objet ; un spiritualiste pourrait en envisager l'existence, un matérialiste non. Pour l'homme, une loi physique est une abstraction destinée à décrire un phénomène ou son évolution, ou à calculer un résultat. Si l'homme imagine une loi s'appliquant à des situations qui ne se sont jamais produites et ne sont pas des conséquences futures certaines de situations existantes ou passées, comme il peut toujours le faire, cette loi restera pure spéculation jusqu'à ce que ses conditions d'application soient réunies, ce qui arrivera ou non. Donc :

- Nous limiterons la période d'application de la règle de stabilité d'une loi d'évolution au temps qui suit l'apparition de la première situation où elle s'applique.
- Une loi d'évolution d'une situation qui ne s'est jamais produite, et dont la survenance n'est pas certaine, est pure spéculation car elle est sans objet ; et son énoncé est infalsifiable.

### 1.9.3 Restriction du postulat de causalité

En affirmant qu'en l'absence de cause la conséquence n'a pas lieu, notre [postulat de causalité](#) exclut la possibilité de *situations « vraiment nouvelles »*, sans cause physique existante dans notre Univers : toute situation a une chaîne de causalité remontant jusqu'au Big Bang (l'apparition de l'Univers) ; c'est une conséquence déterministe de la situation initiale unique existant lors du Big Bang ; il ne peut exister de chaînes de causalité indépendantes.

Or la contrainte « pas de situation vraiment nouvelle » n'est en rien nécessaire à la stabilité des lois d'évolution dans le temps et l'espace. Celle-ci exige seulement qu'une fois apparue lors de son application à une situation *S*, une loi s'applique à l'identique à toute situation *S'* déduite de *S* par une translation dans le temps et/ou l'espace. *S'imposer qu'il n'y ait jamais de situation nouvelle dans l'Univers est un à priori inutile*. Nous allons donc, dans le reste de cette section, conjecturer que des situations vraiment nouvelles peuvent apparaître dans l'Univers, pour voir si cela permet une explication plausible de situations constatées sans en contredire d'autres ; nous appellerons *apparitions* de telles situations. Une apparition est nécessairement accompagnée de sa loi d'évolution, qui peut être nouvelle sans contredire de loi préexistante puisqu'elle s'applique à une situation nouvelle.

Affirmer qu'une situation est une apparition parce que nous n'en connaissons aucune cause et qu'elle n'a pas d'équivalent peut, évidemment, résulter d'une ignorance de notre part, et se trouver démenti ultérieurement ; ce n'est donc qu'une conjecture.

Voici quelques cas que l'on peut considérer comme des apparitions.

### 1.9.4 Exemples d'apparitions

#### Le Big Bang

Rien ne prouve que le Big Bang résulte d'une situation préexistante, par application de lois préexistantes. On peut conjecturer que les lois d'évolution de l'Univers sont nées avec lui, car leur existence antérieure est pure spéculation indémontrable et leur existence ultérieure une certitude.

Nous savons que, à l'instant du Big Bang, des lois fondamentales de notre Univers actuel ne s'appliquaient pas, notamment parce que des concepts de base comme le temps et l'espace étaient d'une autre nature qu'aujourd'hui (discontinue, quantifiée...) ; mais nous ne savons pas (ou pas encore) quelles lois s'appliquaient. Le Big Bang peut donc être considéré comme une apparition, la première.

#### L'inflation

La courte période dite *d'inflation*, peu après le Big Bang, a vu une expansion de l'Univers fantastiquement rapide, dilatation de l'espace des milliards de fois plus rapide que la vitesse de la lumière. Nous ne connaissons pas la cause précise de l'inflation. Nous pouvons seulement conjecturer qu'elle est due à une force immense du même type que l'énergie sombre actuelle, énergie présente dans tout l'espace et cause de la « gravitation négative » qui dilate l'Univers. Cette énergie a pu apparaître sans cause, pendant un temps très bref, comme les fluctuations quantiques d'énergie actuelles [\[1-q\]](#).

## Les fluctuations quantiques

Ce phénomène, que nous avons évoqué [plus haut](#), est une variation d'énergie sans cause autre que l'affirmation que « l'énergie du vide est instable », ce qui n'explique rien. Ce n'est pas une véritable évolution, car « l'emprunt » d'énergie  $\Delta E$  (matérialisé par l'apparition d'une paire particule+antiparticule) est restitué au plus tard  $\Delta t$  secondes après par fusion d'une particule et d'une antiparticule, en respectant la contrainte  $\Delta E \cdot \Delta t \leq \frac{1}{2} \hbar$  conformément au principe d'incertitude de Heisenberg [\[1-1\]](#). C'est donc une apparition.

Lorsque ce phénomène se produit au voisinage de l'horizon d'un trou noir, il peut arriver qu'une des deux particules retombe dans le trou noir tandis que l'autre s'en échappe ; la masse du trou noir diminue alors un peu et on dit qu'il « s'évapore » [\[1-k\]](#).

### **1.9.5 Conséquences philosophiques**

Restreindre la contrainte de stabilité en admettant la possibilité d'apparitions a d'importantes conséquences philosophiques. Exemples :

- Certaines chaînes de causalité peuvent apparaître *après* la naissance de l'Univers. L'opposition entre matérialisme scientifique (qui refuse les phénomènes sans cause interne à l'Univers) et spiritualisme (qui croit possibles des phénomènes dont la cause est externe à l'Univers, comme la volonté d'un Créateur) n'est plus aussi totale.
- Des situations et des phénomènes peuvent rester éternellement inexplicables, parce que ce sont des apparitions.
- L'ensemble des lois d'évolution de l'Univers peut s'enrichir progressivement. Certaines situations ou évolutions considérées comme impossibles avec les lois physiques actuelles peuvent ne plus l'être éternellement.
- Des lois de conservation comme la conservation de l'énergie peuvent être violées à l'occasion d'une apparition.

### **1.10 Déterminisme étendu : un principe et un objectif**

L'expression « *déterminisme étendu* » désigne à la fois *un principe* régissant les lois d'évolution de la nature et *un objectif* pour l'homme qui l'applique : prévoir le futur. Nous savons que le caractère déterministe n'entraîne pas toujours la prédictibilité ; c'est ainsi que l'action d'un grand nombre de processus déterministes simultanés ne change pas leur nature globale déterministe, mais rend inaccessible par excès de complexité l'objectif de prévoir le futur.

Le déterminisme étendu constitue un pont entre science et philosophie destiné à mieux comprendre ce qui est et mieux anticiper ce qui sera.

#### **1.10.1 Apports du déterminisme étendu aux prédictions d'évolution physique**

Que mes lecteurs soient ou non d'accord avec mes définitions du déterminisme scientifique, du déterminisme étendu, du hasard et du chaos n'est pas essentiel. Seule compte la connaissance des limites de la prédiction des évolutions physiques, avec ce qu'elle implique de culture scientifique.

Voici un résumé d'affirmations concernant la causalité et le déterminisme étendu des lois de la nature (détails : [\[1-z5\]](#)).

- *Une cause est une situation à un instant donné, avec tous ses paramètres.*

Cette définition n'est pas triviale. Considérons une situation de mécanique quantique avec superposition d'états qui évolue par décohérence pour devenir un état unique. On pourrait penser qu'il s'agit d'un cas où *plusieurs causes* (les états superposés) ont évolué vers *une conséquence unique*, ce qui constituerait une causalité différente de celle où une cause unique évolue vers un ensemble de conséquences. En fait, la superposition d'états constitue bien une situation à considérer *dans son ensemble*, donc une cause unique.
- *La conséquence d'une cause est tirée, automatiquement et immédiatement, par la nature sous forme d'un ensemble d'évolutions simultanées de certaines variables* (si aucune n'était affectée, il n'y aurait pas d'évolution).
  - Cet ensemble d'évolutions peut ne comprendre qu'une évolution unique ou plusieurs évolutions simultanées en superposition. Cette superposition prend fin par une *décohérence*, au bout d'un temps en général court, et d'autant plus court que le système considéré interagit fortement avec son environnement et que les états superposés sont différents, rendant ainsi la superposition instable.
  - La décohérence est [le seul cas](#) d'évolution dans la nature où le hasard intervient, si l'on considère les fluctuations quantiques comme étant des phénomènes sans cause préalable qui ne sont pas des évolutions, parce qu'ils reviennent toujours à l'état initial sauf dans le cas des trous noirs qui s'évaporent.
  - Une particule peut parcourir une infinité de trajectoires à la fois, solutions de l'équation de Schrödinger [\[1-w\]](#), autour d'une trajectoire la plus probable calculée en pondérant chacune des trajectoires individuelles avec sa probabilité.

Cas particulier intéressant : un ensemble de particules décrites par un état quantique [\[1-z18\]](#) global, comme une paire de photons corrélés, conservent certaines propriétés de cet état global même lorsque les particules s'éloignent les unes des autres. Si un événement affecte alors l'une des particules (exemple : l'absorption d'un photon de l'ensemble intriqué) ses conséquences sont propagées instantanément à toutes les autres particules « à une vitesse infinie » : on dit qu'il y a *non-séparabilité*.
- *Dans la nature, l'instabilité peut constituer une cause d'évolution.*
  - L'instabilité peut résulter d'une énergie cinétique due à la température, source de l'agitation incessante appelée *mouvement brownien*.
  - L'instabilité peut se manifester par des fluctuations énergétiques ; il s'agit alors d'une indétermination régie par le *principe d'incertitude*.
  - L'instabilité des systèmes non linéaires (par exemple les systèmes dissipatifs comme les êtres vivants, en déséquilibre thermodynamique), peut être source d'auto-organisation (comme l'évolution des espèces).
  - L'instabilité peut résulter de la nature même d'un système dynamique ; ses lois d'évolution peuvent changer en certains points de bifurcation [\[1-z16\]](#).

- *La nature ne connaît pas le concept humain de « résultat d'une évolution » ; et elle n'a pas de finalité (contrairement à la doctrine spiritualiste).*
- *Une cause donnée ne fait que déclencher un ensemble d'évolutions, dont elle ne garantit ni la durée, ni la prédictibilité des résultats, ni la précision de chaque résultat, qui sont des préoccupations strictement humaines.*
- *Chaque évolution déclenchée est gouvernée par une loi physique, selon le principe déterministe « les mêmes causes produisent les mêmes effets ».*
  - Dans le cas d'une bifurcation [1-z16], la loi choisie dépend d'un paramètre de contrôle qui a une valeur critique au point de bifurcation.
  - En cas d'évolution sensible aux conditions initiales, le résultat est imprédictible à long terme du fait d'une amplification mathématique d'inévitables imprécisions physiques.
- *La nature a toutes les lois qu'il faut pour réagir à toutes les situations. Elle n'improvise jamais de conséquence et n'en oublie jamais.*
- *Les lois physiques constituent un ensemble cohérent : leurs effets se complètent sans jamais se contredire.*

Exemple : les trajectoires éventuelles (de longueurs différentes) d'une particule unique qui les emprunte toutes à la fois sont parcourues à des vitesses telles que la particule arrive en une fois à une destination unique, pas à plusieurs dates dépendant des diverses trajectoires. Mais les différences de longueur des trajectoires peuvent produire des interférences.

- *La nature ignore les concepts d'échelle d'espace ou de temps, qui ne sont que des abstractions commodes de l'esprit humain : c'est le principe de correspondance [1-m].*
  - Une loi physique s'applique à toutes les échelles, mais ses effets peuvent être négligeables ou trop difficiles à calculer à certaines échelles.
  - Certains phénomènes sont modélisés par des structures géométriques dites *fractales*, qui ont la même forme quelle que soit l'échelle, c'est-à-dire « le grossissement ».
- *Les lois physiques respectent un certain nombre de symétries (invariances) résultant de l'uniformité de l'Univers (homogénéité du temps et de l'espace, isotropie), de la symétrie droite-gauche de l'espace, etc.*
- *La causalité et le déterminisme tiennent compte de la Relativité, de la Mécanique quantique, de l'Electrodynamique quantique et de la Chromodynamique quantique, dont les lois sont des lois de la nature.*
- *La causalité et le déterminisme s'appliquent aux situations et aux évolutions physiques de la nature, pas à la pensée humaine. Nous allons voir maintenant que celle-ci est non déterministe et imprévisible.*

## 2. Imprédictibilité de la pensée humaine

Nous avons vu [ci-dessus à propos de la complexité](#) que les phénomènes des êtres vivants, qu'ils soient physiologiques ou psychiques, reposent sur les phénomènes physiques des cellules, chacun déterministe et à évolution et résultat prévisibles.

Le déterminisme et la prédictibilité s'entendent ici au sens du déterminisme *étendu*, à cause du [caractère probabiliste de nombreuses liaisons chimiques intervenant en biologie](#).

Mais le nombre de ces phénomènes physiques et leurs innombrables interactions rendent les phénomènes du vivant d'une redoutable complexité. C'est cette complexité qui a expliqué pour nous [ci-dessus](#) l'imprévisibilité de la pensée humaine. Voyons quelques détails.

D'après une interprétation simpliste de la doctrine matérialiste, la pensée est un simple aspect de mécanismes des neurones : établissement et ruptures de connexions par synapses, et communications à travers ces synapses. Ces mécanismes sont eux-mêmes basés sur des réactions chimiques régies par le logiciel génétique, lui-même basé sur la biologie moléculaire, science exacte déterministe (au sens étendu) basée sur la physique quantique.

Mais ce logiciel génétique coordonne des milliers de réactions chimiques, qui dépendent d'innombrables paramètres appartenant à des domaines dont je ne peux citer que quelques-uns : perceptions remontant des sens et du corps vers le cerveau, santé du corps, informations mémorisées dans les neurones, etc. Ces milliers de réactions interdépendantes donnent aux mécanismes physiologiques de la pensée une immense complexité. C'est ainsi que, d'après les recherches récentes citées dans [\[1-z21\]](#) :

- les synapses des vertébrés contiennent environ 1000 protéines, mises en œuvre dans 13 mécanismes moléculaires, dont l'un est composé de 183 protéines différentes ;
- le cerveau humain compte environ 100 milliards de neurones reliés par 100 trillions de synapses.

Au-dessus de cette complexité physique, la pensée elle-même représente toute une « hiérarchie logicielle », avec ses mécanismes conscients ou non de mémorisation et recherche d'informations, de jugement de valeur de chaque pensée, d'enchaînement de pensées par analogie, induction, déduction et synthèse, etc.

Le subconscient entretient constamment des pensées qui échappent à tout contrôle de la conscience. Il y a, par exemple, la formation de valeurs de l'individu qui vont ensuite guider toute sa pensée et toutes ses actions en définissant les affects, et notamment tout ce qui est désiré et ce qui ne l'est pas. Il y a aussi un très grand nombre de vérités et d'opinions a priori, injustifiables logiquement mais accessibles à la conscience. La connaissance des processus subconscients progresse, mais elle est encore très embryonnaire. L'influence du subconscient est une des raisons de l'imprévisibilité humaine. Le paragraphe [\[1-z7\]](#) développe ce sujet.

*Le subconscient et la complexité fantastique des mécanismes de la pensée expliquent l'essentiel de son caractère généralement imprévisible, malgré une base physique déterministe.* Le nombre de mécanismes élémentaires interdépendants est tel que la condition de stabilité (reproductibilité) de la définition du déterminisme scientifique est rarement satisfaite ; par exemple, certains mécanismes qui dépendent d'autres ne se déclenchent même pas lorsque des résultats de ces autres mécanismes changent. Selon la quantité de neurotransmetteurs comme la dopamine et l'acétylcholine dans certaines zones du cerveau, les pensées sont très différentes. La mémoire à long terme, soumise elle aussi à un environnement chimique et à des stimulations qui varient avec les circonstances, peut oublier ou déformer les souvenirs. Le cerveau fabrique souvent des pensées par intuition ou analogie sans que l'individu soit conscient de leur élaboration, et certaines sont erronées ou indécidables tout en paraissant acceptables au mécanisme automatique de jugement de valeur.

*Voilà pourquoi le cheminement et les conclusions de la pensée humaine sont le plus souvent imprévisibles. Voilà pourquoi la pensée d'un individu est tellement soumise à ses affects que sa raison elle-même n'est qu'un outil à leur service, et que l'individu préfère souvent des décisions qu'il sait irrationnelles ou immorales à des décisions rationnelles ou morales.*

## **2.1 La barrière de complexité**

Depuis que l'homme primitif savait évaluer un danger en un instant, sans prendre le temps de réfléchir à ce qu'il devait faire, l'homme a dans ses gènes une fonction d'évaluation au premier coup d'œil. Cette fonction est si automatique qu'on ne peut la bloquer, et il faut l'effort d'un raisonnement délibéré pour en changer les conclusions.

Cet effort est d'autant plus important que la situation est complexe. L'homme doit alors trouver un compromis entre la qualité d'une décision et sa rapidité. L'habitude de juger au premier coup d'œil est si forte que, face à une situation complexe, l'homme adopte souvent la première idée qui lui vient, sans prendre le temps de faire le tour des paramètres et des contraintes du contexte. La plupart des citoyens, par exemple, votent pour un programme électoral qu'ils n'ont pas analysé en détail, voire dont ils n'ont lu que le nom du candidat.

## **2.2 Imprédictibilité des décisions économiques et boursières**

L'imprédictibilité des décisions humaines se manifeste de manière spectaculaire en économie et sur les marchés de titres, où *on peut montrer qu'aucun modèle mathématique, même statistique, ne peut permettre des prédictions fiables.* C'est pourquoi, par exemple, tant de fonds hautement spéculatifs (hedge funds) basés sur les modèles de mathématiciens de haut niveau (les quants) ont disparu lors de la crise de 2007-2008 [\[7\]](#).

**Daniel MARTIN**

### 3. Références

[0] Principes de logique : causalité, homogénéité, raison suffisante, etc.  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/CausalitePPS.pdf>

[1] Livre "Le déterminisme étendu pour mieux comprendre et prévoir  
*Un pont entre science et philosophie pour la pensée rationnelle*" (558 pages)  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.pdf>

[1-a] Exemple de calcul impossible d'une propagation d'onde déterministe :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#DttNonCalculable>

[1-b] Exemple d'attracteur étrange :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#AttracteurEtrange>

[1-c] Espace des phases :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#EspacePhases>

[1-d] Attracteur  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#AttracteurDefinition>

[1-e] Matérialisme et spiritualisme : définitions  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#DefinitionsMaterialismeSpiritualisme>

[1-f] Postulats 3 et 4 de la mécanique quantique :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Postulat3>

[1-g] Expérience de non-séparabilité :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R10>

[1-h] Mouvement brownien :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#TemperatureAbsolue>

[1-i] Constante de Planck :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#CteDePlanck>

[1-j] Superposition d'états et décohérence :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Decoherence>

[1-k] Evaporation des trous noirs :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Evaporation>

[1-l] Incertitudes sur les déterminations simultanées de 2 variables :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Heisenberg>

[1-m] Principes de correspondance et de complémentarité :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#PpeCorrespondance>

[1-n] Système à évolution quasi périodique :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#QuasiPeriodique>

[1-o] Exemple de phénomène chaotique : le problème des 3 corps :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#TroisCorps>

[1-p] Exemple de phénomène apériodique somme de fonctions périodiques :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#SerieFourier>

[1-q] Fluctuations quantiques :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Fluctuation>

[1-r] « Accidents » de la réplication du génome et évolution vers la complexité :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Accidents>

[1-s] Evolution due à une modification de l'expression de gènes :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#ExpressionGenes>

[1-t] L'évolution des espèces selon la théorie de Prigogine. Attracteurs étranges :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#ExplicationPrigogine>

[1-u] Dynamique des populations :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#SuiteLogistique>

[1-v] Déterminisme et prédictibilité des systèmes – Auto-corrélation :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Autocorrelation>

[1-w] Exemples d'équations différentielles :

- 2<sup>ème</sup> loi de Newton (loi fondamentale de la dynamique) :  
Le vecteur  $\frac{d\mathbf{p}}{dt}$ , dérivée par rapport au temps du vecteur quantité de mouvement  $\mathbf{p} = M\mathbf{v}$  d'un corps de masse  $M$  animé d'une vitesse de vecteur  $\mathbf{v}$ , est égal à la force de vecteur  $\mathbf{F}$  agissant sur le corps :  $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = M\mathbf{a}$ , où  $\mathbf{a}$  est le vecteur accélération du corps, dérivé de  $\mathbf{v}$ .
- Equation de Schrödinger (équation fondamentale de la mécanique quantique) :  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#EquationFondamentaleMQ>  
Cette équation est linéaire et ses solutions sont déterministes.

[1-x] L'espace est homogène et isotrope : détails et justification :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#HomogeneIsotrope>

[1-y] Les lois physiques sont stables (invariantes) dans le temps et l'espace :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#VitesseExpansion>

[1-z] Construction empirique d'une axiomatique :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R241>

[1-z1] Définition d'une vérité scientifique :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#DefinitionVeriteScientifique>

[1-z2] Théorème de Goodstein - Comment compléter une axiomatique :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R92>

[1-z3] Les systèmes interprétatifs :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#SystemesIntepretatifs>

[1-z4] L'espace-temps :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#EspaceTemps>

[1-z5] Résumé d'affirmations concernant la causalité et le déterminisme étendu des lois de la nature :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#QueComprendre>

[1-z6] Principe d'exclusion de Pauli :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Pauli>

[1-z7] Mécanismes psychiques non algorithmiques ou imprévisibles :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#MecanismesNonDeterministes>

[1-z8] Symétrie temporelle et réversibilité. Systèmes conservatifs ou dissipatifs :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Conservatif>

[1-z9] Le rationalisme critique de Karl Popper :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Popper>

[1-z10] Axiomatique : définitions et applications :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R67>

[1-z11] Les 4 types d'interactions :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R18>

[1-z12] Faiblesse de la preuve téléologique :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#ErreurFinalisme>

[1-z13] Principe de moindre action de Maupertuis :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Maupertuis>

[1-z14] Paquet d'ondes et étalement dans le temps :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#PaquetDondes>

Voir aussi la notion de fonction d'onde [\[1-z18\]](#).

[1-z15] Condition de causalité entre deux événements :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#ConditionCausalite>

[1-z16] Changement de loi d'évolution par bifurcation – Valeur critique :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#Bifurcation>

[1-z17] Nombres de Reynolds, de Prandtl et de Rayleigh :

<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R293>

#### [1-z18] Etat quantique d'un système - Fonction d'onde

L'état quantique d'un système à un instant donné est l'ensemble de ses variables de mécanique quantique, chacune ayant une certaine valeur à cet instant-là. Ainsi, l'état quantique d'un électron comprend ses variables de position, de vitesse et de spin (moment cinétique intrinsèque de la rotation de l'électron sur lui-même). Toutes ces variables sont des scalaires.

*L'état quantique représente tout ce que l'on peut savoir sur le système à l'instant donné (toute l'information à son sujet) il prend en compte toutes les variables ; il n'y a pas de variable supplémentaire (cachée) qui pourrait nous apprendre quelque chose de plus sur le système ; on dit que la mécanique quantique est complète.*

Deux électrons ont même masse et même charge électrique, caractéristiques qui sont constantes et identiques pour tous les électrons, donc ne sont pas des variables, donc ne font pas partie de leur état quantique. On peut distinguer deux électrons seulement par une différence d'état quantique, c'est-à-dire une différence de position, de vitesse ou de spin. Même remarque pour deux protons ou d'autres paires de particules : *deux particules de même type sont toujours identiques, interchangeables, elles ne diffèrent que par une ou plusieurs valeurs de variables de leur état quantique.*

L'état quantique d'un système est décrit par sa fonction d'onde  $\psi(\mathbf{r}, t)$ , prenant ses valeurs dans le corps des nombres complexes, et qui contient toutes les informations que l'on peut connaître sur le système. Dans  $\psi(\mathbf{r}, t)$ , la variable  $t$  représente le temps (l'instant), et la variable vectorielle  $\mathbf{r}$  a pour composantes les coordonnées  $r_x ; r_y ; r_z$  dans un espace de position, ou dans un espace produit tensoriel de l'espace de position et de l'espace de spin si on prend en compte ce dernier.

*La fonction d'onde évolue dans le temps de manière parfaitement déterministe au sens traditionnel. Elle est interprétée comme une amplitude de probabilité de présence, nombre complexe ayant un module et une phase. Les positions possibles  $\mathbf{r}$  formant un continuum (espace continu), la probabilité pour que la particule soit, à l'instant  $t$ , dans un élément de volume  $d^3r = dx dy dz$  autour du point  $\mathbf{r}(r_x ; r_y ; r_z)$  est proportionnelle à  $d^3r$  et infinitésimale : on la note  $dP(\mathbf{r}, t)$ . La densité de probabilité correspondante est  $|\psi(\mathbf{r}, t)|^2$ .*

Au concept classique de *trajectoire* d'un corpuscule la mécanique quantique substitue celui *d'état dépendant du temps  $t$* . L'évolution dans le temps de l'état du corpuscule (notion qui se substitue à celle de trajectoire) est alors décrite par les solutions de l'équation linéaire de Schrödinger [1-w] - solutions déterministes au sens traditionnel - et toute combinaison linéaire de telles solutions correspondant à une distribution de probabilités.

[1-z19] Equation différentielle du mouvement d'un pendule simple  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#PenduleSimple>

[1-z20] Le Big Bang, phénomène irréversible  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#BigBang>

[1-z21] Complexité des connexions par neurones et des mécanismes des synapses : voir <http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R307>

[1-z22] Principe d'identité et cause première  
<http://www.danielmartin.eu/Philo/Determinisme.htm#R16>

[2] Exemple d'approximation

La dynamique d'un pendule simple est décrite par une équation différentielle non linéaire [1-z19]. Pour simplifier la résolution de cette équation, on recourt à « l'approximation des petites oscillations », qui assimile un sinus à son angle en radians. Cette simplification entraîne des erreurs de prédiction qui croissent avec l'angle considéré.

[3] Animations montrant de la turbulence :

- Site efluids media galleries  
[http://media.efluids.com/galleries/turbulence?filter\\_by=image](http://media.efluids.com/galleries/turbulence?filter_by=image)
- CENTER FOR TURBULENCE RESEARCH  
<http://www.stanford.edu/group/ctr/gallery.html>

[4] René Thom, mathématicien médaille Fields, "Halte au hasard, silence au bruit", article publié dans "La querelle du déterminisme" (1990), éditions Gallimard.

Extrait :

*"Je voudrais dire d'emblée que cette fascination de l'aléatoire témoigne d'une attitude antiscientifique par excellence. De plus, dans une large mesure, elle procède d'un certain confusionnisme mental, excusable chez les auteurs à formation littéraire, mais difficilement pardonnable chez des savants en principe rompus aux rigueurs de la rationalité scientifique.*

*Qu'est-ce en effet que l'aléatoire ? On ne peut en donner une définition que purement négative : **est aléatoire un processus qui ne peut être simulé par aucun mécanisme, ni décrit par aucun formalisme.** Affirmer que "le hasard existe", c'est donc prendre cette position ontologique qui consiste à affirmer qu'il y a des phénomènes naturels que nous ne pourrons jamais décrire, donc jamais comprendre. C'est renouveler le célèbre ignorabimus de Du Bois-Reymond...*

*Le monde est-il astreint à un déterminisme rigoureux, ou y a-t-il un "hasard" irréductible à toute description ? Ainsi posé, évidemment, le problème est de nature métaphysique et seule une option également métaphysique est en mesure de le trancher. En tant que philosophe, le savant peut laisser la question ouverte ; mais en tant que savant, c'est pour lui une obligation de principe - sous peine de contradiction interne - d'adopter une position optimiste et de postuler que rien, dans la nature, n'est inconnaissable à priori."*

[5] Le principe anthropique

Les physiciens ont remarqué des coïncidences troublantes entre diverses constantes de l'Univers et la possibilité d'une vie terrestre. En voici deux *parmi bien d'autres* (concernant l'âge de l'Univers, la masse du proton, la constante universelle de gravitation G, etc.) :

- L'astronome anglais Fred Hoyle a remarqué qu'une valeur à *peine différente* de l'intensité de l'interaction nucléaire [1-z11] aurait pratiquement réduit à néant la génération de carbone dans les réactions de fusion stellaires, les seules dans l'Univers à en fabriquer. Puisque sans carbone la vie telle que nous la connaissons est inconcevable, il semble que l'interaction nucléaire ait juste l'intensité qu'il faut pour que la vie apparaisse dans l'Univers.

Pour les tenants du principe anthropique, *cela ne peut s'expliquer que par l'influence d'une volonté divine, si l'on tient compte du fait qu'il y a de nombreuses coïncidences comme celle-là.*

- Le physicien prix Nobel Steven Weinberg a remarqué dans son livre "Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature" qu'il y a un rapport entre la valeur de la constante cosmologique (introduite par Einstein dans ses équations de la Relativité générale) et l'existence de la vie sur la Terre. Une valeur trop élevée de cette constante aurait empêché toute formation de galaxie, donc aussi la formation du système solaire. Sa valeur connue est compatible avec la répartition de matière observée et l'expansion de l'Univers, donc la vie terrestre.

Ces coïncidences sont si nombreuses et si troublantes que des physiciens comme Robert Dicke ont postulé l'existence d'un « *principe anthropique* », selon lequel elles ne sont pas le fruit du hasard. Ce principe postule que *ces constantes ont exactement « les bonnes valeurs » pour que la vie apparaisse et se développe vers la complexité que nous constatons, sans avoir besoin de la sélection naturelle de Darwin.* Tout se passe comme si l'Univers était soumis à un *déterminisme global, comme si une volonté téléologique externe à l'Univers l'avait fait tel qu'il est, avec les lois qu'il a, pour que la vie apparaisse et évolue en complexité jusqu'à l'homme qui l'observe aujourd'hui.* Le principe anthropique est donc une forme moderne de la « preuve » téléologique de l'existence de Dieu [1-z12].

## Discussion

### Le principe anthropique est-il un déterminisme divin ?

Les coïncidences de valeurs de constantes ci-dessus étant réelles, chacun est libre de les interpréter comme il veut, notamment *en postulant l'existence à l'échelle de l'Univers d'un déterminisme de niveau supérieur à tous les autres.* Ce déterminisme-là régirait les divers déterminismes des lois physiques, comme le principe physique de moindre action de Maupertuis [1-z13] détermine *globalement* un choix de trajectoire au lieu de la détermination de proche en proche résultant du déterminisme *ponctuel* des lois de Newton. On peut aussi y voir une manifestation du dessein d'un Créateur.

### Il faut rappeler le principe d'identité

Le *principe d'identité* fait que la réalité à un instant donné est ce qu'elle est et ne peut être autre, même si notre esprit s'en étonne, le regrette ou y trouve des coïncidences. Considérons alors les diverses constantes et lois de l'Univers telles que si l'une était un tant soit peu différente l'homme ne pourrait exister. *Sachant qu'il existe, il est impossible de trouver le moindre fait qui contredise cette existence ; si on en trouvait un, ce serait à coup sûr une erreur !* Toutes les valeurs de constantes et lois physiques remarquables que certains ont associées à l'existence de l'homme

*n'auraient pu être différentes*, du fait du principe d'identité. S'étonner, alors, que telle constante ait une valeur très proche d'une limite qui rendrait la vie impossible est humain, mais ne prouve rien car elle ne peut avoir que la valeur exacte qu'elle a.

### Des probabilités qui n'ont pas de sens

Un autre argument faux que j'ai vu en faveur du principe anthropique fait intervenir *une probabilité pour qu'une constante de l'Univers importante pour l'existence de l'homme ait (ou n'ait pas) la valeur précise qu'elle a.*

La probabilité d'une situation étant le rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas équiprobables possibles, on ne peut la calculer que si l'on connaît ces deux nombres ; par exemple, la probabilité pour qu'un lancer de dé donne un 3 est calculable car ce cas "favorable" unique fait partie de 6 cas "possibles" équiprobables. On calcule aussi, par exemple, une telle probabilité en mécanique quantique, lorsque la valeur d'une variable mesurée est une valeur propre d'un ensemble (le *spectre* de l'observable) qui en a un nombre connu, chacune assortie d'une probabilité calculable.

Lorsque la constante de l'Univers est un nombre réel, le nombre de cas possibles est infini. La probabilité d'une valeur donnée n'a alors de sens que pour un certain intervalle autour de cette valeur et si l'on connaît la loi de *densité de probabilité de la constante* ; sans cette densité de probabilité, la notion de « *faible* différence entre une variable et une valeur critique » n'a pas de sens. Or je n'ai jamais vu qu'un partisan du principe anthropique qui s'étonne de la proximité d'une valeur de constante avec une valeur critique pour l'existence de la vie ait pris soin de citer la densité de probabilité dans leur voisinage ; et je ne l'ai pas vu parce que la loi de densité de probabilité d'une constante n'existe pas !

Ce que j'ai vu, en revanche, c'est l'argument qu'une constante « *a une valeur contingente car elle aurait pu en avoir une autre* ». C'est là pure spéculation, puisque la constante ne peut pas, justement, avoir une valeur autre que celle qu'elle a.

Tout calcul de la probabilité pour qu'une situation *qui s'est produite* se soit effectivement produite car *on peut imaginer* qu'elle ne se fut pas produite, est une spéculation sans valeur lorsqu'il est impossible de connaître ou de dénombrer toutes les évolutions qui ont fait qu'elle s'est produite et toutes celles qui auraient pu se produire. De même, calculer la probabilité de non-survenance d'un événement du passé qui ne s'est pas produit est absurde.

### Le besoin de l'homme que l'Univers ait un sens conforme aux valeurs morales

Le principe anthropique a souvent été utilisé par des spiritualistes, pour qui l'idée matérialiste que l'homme est le produit d'un Univers dominé par des forces aveugles et indifférentes est insupportable. Certains rejettent cette idée parce qu'elle ne permet pas de justifier l'origine des valeurs morales, origine qui pour eux ne peut être que divine parce que ces valeurs sont par essence universelles et éternelles, conformément (par exemple) à l'enseignement de Saint Thomas d'Aquin.

Les matérialistes répondent à cette objection que les scientifiques savent aujourd'hui – preuves ethnologiques à l'appui - que *les principes de morale humains sont des*

*conséquences évidentes de l'évolution des sociétés humaines, qui les ont définis progressivement siècle après siècle.*

### Origine de la supériorité de l'homme sur les autres êtres vivants

Pour sa part, Darwin répond aux spiritualistes dans [6] page 448 en attribuant la noblesse de la lignée humaine à son ancienneté, à qui des centaines de milliers d'années de perfectionnements successifs ont permis de résister à la sélection naturelle. Pour lui, *la morale humaine, indissociable de sa pensée, est consubstantielle de l'être social qu'est l'homme.* Elle représente une des supériorités de son espèce, qui ont permis sa survie et finalement sa domination.

### Un principe infalsifiable

Le principe anthropique est comme l'existence de Dieu, un énoncé *infalsifiable* ; en vertu du rationalisme critique [1-z9] il n'a donc rien de scientifique. C'est donc un émerveillement de spiritualiste ou le fruit de l'imagination. On peut toujours spéculer que, dans un autre Univers où les lois seraient différentes, l'homme n'aurait pu apparaître, mais c'est là pure spéculation métaphysique et il n'y aura jamais d'avancée scientifique permettant de le savoir ; nous ne saurons jamais rien de scientifique concernant un hypothétique espace extérieur à l'Univers ou l'ayant précédé.

### Conclusion

*Le principe anthropique est une spéculation spiritualiste irrationnelle qui introduit un déterminisme divin, finalité destinée à combattre le déterminisme matérialiste.*

### La recherche d'exoplanètes

On peut cependant interpréter l'existence d'un ensemble de conditions à satisfaire pour que la vie apparaisse pour délimiter des régions, au voisinage d'autres étoiles que le Soleil, où une vie telle que nous la connaissons serait possible. Dans une telle région, par exemple, la température doit permettre l'existence de l'eau à l'état liquide, l'étoile ne doit pas émettre de rayonnement mortel, etc. Sous cette forme-là (ensemble de conditions de la vie) le principe anthropique est utile aux astronomes qui cherchent des planètes (appelées exoplanètes) où la vie pourrait exister.

[6] "*De l'origine des espèces*" (Charles Darwin, 1859) disponible gratis en français à l'adresse <http://www.danielmartin.eu/Arg/Darwin.pdf>

[7] "Economie : rationalité des décisions et validité des théories traditionnelles" (Daniel MARTIN, 2009) : <http://www.danielmartin.eu/Economie/RatDecEco.pdf>

[8] "Démonstration élémentaire du théorème de M. Borel sur les nombres absolument normaux et détermination effective d'un tel nombre" (W. Sierpinski, Bulletin de la S. M. F., tome 45 (1917), p. 125-132)  
[http://archive.numdam.org/article/BSMF\\_1917\\_45\\_125\\_1.pdf](http://archive.numdam.org/article/BSMF_1917_45_125_1.pdf)

## 4. Résumé des cas d'imprédictibilité

| Type d'imprédictibilité   | Détermination ou évolution impactée  | Probabilité de choix ou imprécision  |
|---|--|--|
| Hasard (en mécanique quantique seulement)   | Choix d'un élément dans un ensemble de valeurs propres par décohérence, effet tunnel, solution stationnaire, etc. lors d'une interaction entre échelles atomique et macroscopique  | <p>Probabilité selon le 4<sup>ème</sup> principe de la mécanique quantique :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Spectre discret : <math display="block">P(a_n) = \sum_{i=1}^{g_n}  \langle u_n^i   \Psi \rangle ^2</math> </li> <li>Spectre continu non dégénéré : <math display="block">dP(\alpha) =  \langle v_\alpha   \Psi \rangle ^2 d\alpha</math> </li> </ul>   |
| Imprécision à l'échelle atomique (en mécanique quantique seulement)                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Etat d'un corpuscule dans son paquet d'ondes : Corpuscule en mouvement ou stationnaire, orbitale électronique</li> <li>Extension spatiale de la fonction d'onde associée au corpuscule</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Imprécision = demi-largeur d'un paquet d'ondes d'équation : <math display="block">\psi(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(k) e^{i(kx - \omega t)} dk</math> </li> <li>d'où aspect flou, étalement dans le temps du paquet d'ondes de position</li> <li>Erreur possible sur la position ou la dimension de l'ordre de la longueur d'onde de Compton : <math display="block">\lambda_c = \frac{h}{mc}</math> </li> </ul> |
| Indétermination ("incertitude") à l'échelle atomique et contextualisme (en mécanique quantique seulement) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Détermination de variable(s) lorsque des observables ne commutent pas (Heisenberg, Kochen-Specker)</li> <li>Instabilité énergétique : noyaux atomiques, fluctuation quantique...</li> </ul>   | $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{1}{2}\hbar$ $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2}\hbar,$ $\Delta \alpha \cdot \Delta l \geq \frac{1}{2}\hbar,$ <p>etc.</p> <p>Violation temporaire de la conservation d'énergie</p>  |
| Sensibilité aux conditions initiales (à l'échelle macroscopique)  | Amplification mathématique d'une erreur physique (chaos déterministe)  | L'erreur possible croît avec l'éloignement du début de l'évolution   |
| Erreur physique (à l'échelle macroscopique)   | Connaissance des constantes ou paramètres, erreurs de mesure   | Prédiction de variables statistiques si on a un modèle et un nombre de déterminations suffisant  |
| Calcul ou raisonnement algorithmique impossible   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Complexité (nombre de processus ou d'interactions entre eux)</li> <li>Algorithme non convergent ou trop lent</li> <li>Proposition prouvée indécidable</li> <li>Problème ou nombre prouvé non calculable</li> <li>Phénomène extérieur à l'Univers</li> </ul> | -  |

